

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA  
CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**INFLUÊNCIA DA DENSIDADE BÁSICA E DA COMPOSIÇÃO  
QUÍMICA DA MADEIRA PARA O PROCESSO DE CARBONIZAÇÃO:  
UM ESTUDO DE CASO**

**GUILHERME SAMPAIO PEREIRA**

**VITÓRIA DA CONQUISTA  
BAHIA – BRASIL  
MAIO – 2023**

**GUILHERME SAMPAIO PEREIRA**

**INFLUÊNCIA DA DENSIDADE BÁSICA E DA COMPOSIÇÃO  
QUÍMICA DA MADEIRA PARA O PROCESSO DE CARBONIZAÇÃO:  
UM ESTUDO DE CASO**

Monografia apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia como parte das exigências do curso de Engenharia Florestal para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

**Orientador: Prof. DALTON LONGUE JUNIOR (UESB)**

**VITÓRIA DA CONQUISTA  
BAHIA – BRASIL  
MAIO – 2023**

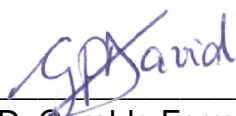
**GUILHERME SAMPAIO PEREIRA**

**INFLUÊNCIA DA DENSIDADE BÁSICA E DA COMPOSIÇÃO  
QUÍMICA DA MADEIRA PARA O PROCESSO DE CARBONIZAÇÃO:  
UM ESTUDO DE CASO**

Monografia apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia como parte das exigências do curso de Engenharia Florestal para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

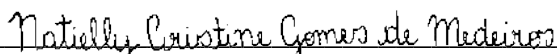
Avaliada em 30 de Maio de 2023.

Comissão examinadora:



---

Ph.D. Geraldo Ferreira David - UFRRJ



---

Eng. Ftal. Natielly Cristine Gomes de Medeiros - UESB



---

Prof. D. Sc. Dalton Longue Júnior - UESB  
Orientador

## RESUMO

PEREIRA, Guilherme Sampaio. Discente do Curso de Engenharia Florestal da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, maio de 2023. **Estudo da densidade básica e da composição química da madeira para o processo de carbonização: uma revisão bibliográfica.** Orientador: Dalton Longue Júnior.

A produção de carvão vegetal é uma das mais importantes atividades do setor florestal brasileiro, e abastece principalmente o setor siderúrgico a partir de madeiras de espécies de rápido crescimento (eucalipto) e nativas. Muitos estudos foram realizados e publicados em revistas ou apresentados em dissertações/teses envolvendo qualidade da madeira, variáveis do processo de carbonização e qualidade do carvão vegetal. O objetivo foi realizar uma revisão bibliográfica correlacionando a densidade básica da madeira e a sua composição química com as características e a qualidade final do carvão vegetal, e as variáveis do processo de carbonização. Foram consultados artigos, dissertações e teses dos principais veículos técnicos de universidades brasileiras que pesquisam nessa área. Os resultados apontam que existe uma maior variabilidade da qualidade da madeira de espécies nativas em relação a madeira de eucalipto e a densidade básica é a característica mais medida e que relaciona melhor com as propriedades do carvão. O teor de lignina também é uma importante característica da madeira, mas não reflete de forma isolada a qualidade do carvão vegetal, devendo ser observadas as variáveis do processo. Sobre as variáveis do processo, a temperatura mais utilizada é de 450 °C, com tempos e taxas de aquecimento variáveis. O poder calorífico superior é uma importante característica do carvão vegetal que não é avaliada pela maioria dos trabalhos publicados.

**Palavras-chave:** carvão vegetal, densidade básica, composição química, qualidade da madeira.

## **ABSTRACT**

PEREIRA, Guilherme Sampaio. Student of the Forestry Engineering Course at the State University of Southwest Bahia, May 2023. **Study of basic density and chemical composition of wood for the carbonization process: a literature review.** Advisor: Dalton Longue Júnior.

Charcoal production is one of the most important activities in the Brazilian forestry sector and primarily supplies the steel industry using wood from fast-growing species (eucalyptus) and native trees. Many studies have been conducted and published in journals or presented in dissertations/theses regarding wood quality, carbonization process variables, and charcoal quality. The objective was to perform a literature review correlating the basic density of wood and its chemical composition with the characteristics and final quality of charcoal, as well as the variables of the carbonization process. Articles, dissertations, and theses from the main technical outlets of Brazilian universities researching in this area were consulted. The results indicate that there is greater variability in the quality of wood from native species compared to eucalyptus wood, and basic density is the most measured characteristic that correlates well with charcoal properties. The lignin content is also an important wood characteristic, but it does not reflect the quality of charcoal in isolation, and process variables should be considered. Regarding the process variables, the most commonly used temperature is 450 °C, with variable heating times and rates. The higher heating value is an important characteristic of charcoal that is not evaluated by the majority of published works.

**Keywords:** charcoal, basic density, chemical composition, wood quality.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>4</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>5</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>11</b>
2.1 O setor de carvão vegetal no Brasil .....	11
2.2 Qualidade da madeira para produção de carvão vegetal .....	12
2.3 Importância das variáveis do processo de carbonização na qualidade do carvão vegetal .....	14
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>16</b>
3.1 Pesquisa e seleção do material bibliográfico. ....	16
3.2 Elaboração das planilhas de dados organizados a partir do material bibliográfico selecionado.....	17
3.3 Estabelecimento das correlações entre a qualidade da madeira, variáveis do processo de carbonização e características do carvão vegetal.....	17
3.4 Tabela comparativa das características do carvão vegetal e das variáveis do processo de carbonização.....	17
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>19</b>
4.1 Estudo da densidade básica da madeira na qualidade do carvão vegetal .....	20
4.2 Estudo da composição química da madeira na qualidade do carvão vegetal..	24
4.3 Estudo dos parâmetros de processo de carbonização na qualidade do carvão vegetal. ....	31
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>35</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>36</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O carvão vegetal é o produto sólido da carbonização da madeira, um produto energético e renovável utilizado em muitas aplicações industriais. É um insumo relevante para diversas cadeias produtivas, e coloca o Brasil como o principal produtor mundial, com uma contribuição de 12% na produção global (INDUSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ, 2021). Em sua maioria oriundo de florestas plantadas, ele é uma alternativa ao uso do carvão mineral, um exemplo de sustentabilidade na indústria siderúrgica, que coloca a nação como potencial fornecedor do insumo energético para o restante do mundo.

Entretanto, o setor florestal brasileiro ocupa apenas 1,12% da superfície do Brasil com plantios florestais (9,55 milhões de hectares) de acordo com IBÁ (2021), enquanto outros países como EUA detém 27,9% da sua extensão territorial (274,4 milhões de hectares) com florestas plantadas ou manejadas para produção madeireira (EMBRAPA TERRITORIAL, 2020), o que significa que o setor norte-americano é 28,7 vezes maior que o brasileiro. Isso mostra que a indústria florestal no Brasil tem muito espaço para crescer em formações florestais.

Diante da grande dependência europeia da utilização de carvão mineral importado da Rússia, e da crise ocasionada por sua guerra contra a Ucrânia, o Brasil poderia vir a ser, nos próximos anos, um fornecedor alternativo para o continente europeu. Além disso, segundo a IBÁ (2021), o carvão vegetal brasileiro alimenta a maioria das indústrias produtoras de ferro-gusa, ferro liga e aço do país. Esse setor industrial se concentra principalmente na região Sudeste, nos estados de Minas Gerais e São Paulo.

Uma das maiores dificuldades na utilização de carvão vegetal é a grande variação na sua qualidade, como a densidade aparente, o teor de carbono fixo e o poder calorífico superior, entre outros, conforme cita o selo *Premium* do estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2003). Esse produto sofre grande influência da madeira que o origina e do processo de fabricação, o que pode gerar prejuízos ocasionados pela dificuldade em sua utilização nos fornos siderúrgicos (ALMEIDA et al., 2015; TRUGILHO et al., 2001).

Com relação a qualidade da madeira, uma das propriedades físicas de maior importância para a produção do carvão vegetal é a sua densidade básica, porque ela

está diretamente relacionada com os outros atributos do carvão vegetal, como a densidade aparente, o teor de carbono fixo e o poder calorífico superior (ALMEIDA et al., 2015). Além disso, no processo de carbonização, ao selecionar-se uma madeira com maior densidade, se produz uma maior quantidade de carvão para um mesmo volume de forno (MEDEIROS NETO et al., 2012). O material escolhido para a produção do carvão vegetal deve, além de uma elevada densidade, possuir uma alta concentração de lignina e um baixo teor de holocelulose (CASTRO et al., 2016).

Com relação ao processo de carbonização da madeira, a escolha adequada das características dos fornos (tamanho, tecnologia, reaproveitamento de subprodutos, tipo de material na construção, tempo de carbonização, etc.) também são fatores relevantes e que afetam a qualidade do carvão vegetal produzido. O acompanhamento da carbonização e das suas variáveis de controle (tempo, temperatura e taxa de aquecimento), quando possíveis, permite melhorar ainda mais a qualidade do carvão e o rendimento do processo de carbonização.

Portanto, a caracterização e a qualidade da madeira unidos a um bom controle do processo de carbonização são fundamentais para a produção de carvão vegetal de alta qualidade.

Diante disso, o objetivo principal desse trabalho foi realizar uma revisão bibliográfica correlacionando a densidade básica da madeira e a sua composição química com as características e a qualidade final do carvão vegetal, e as variáveis do processo de carbonização.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 O setor de carvão vegetal no Brasil

O carvão vegetal é o produto resultante da carbonização da madeira e abastece os setores residenciais, comerciais e industriais. É um insumo energético de baixo custo, oriundo de florestas renováveis e que tem contribuído na substituição do carvão mineral, como opção industrial para redução das emissões de gases poluentes, como CO<sub>2</sub> (IBÁ, 2023).

A produção e o consumo de carvão vegetal oriundo de florestas plantadas no Brasil representam 12% dos valores mundiais (FAO, 2020a), e está em torno de 6,4 milhões de toneladas (FAO, 2020b), o que o torna o maior produtor e consumidor do mundo.

O setor florestal brasileiro é responsável pela produção em larga escala de carvão vegetal a partir de madeira. O carvão produzido nesse processo é utilizado principalmente como combustível em fornos, caldeiras e aquecedores, além de ser um insumo importante em diversas indústrias, como siderurgia, produção de ferro ligas, cimento, entre outras (ARANTES et al., 2013).

No Brasil, o setor é representado por empresas de diferentes portes, desde pequenos produtores até grandes empresas com produção em escala industrial. A produção é concentrada principalmente na região Sudeste do país, onde se encontram grandes áreas de florestas plantadas (IBÁ, 2021).

A produção de carvão vegetal realizada por grandes empresas e médios produtores para o abastecimento da siderurgia a carvão vegetal, é também uma importante fonte de renda para pequenos e médios produtores, especialmente em Minas Gerais (GLOBO RURAL, 2021). A indústria siderúrgica é a principal consumidora de carvão vegetal no Brasil. Mesmo apresentando uma queda no ano de 2020 de 0,9% em relação a 2019, o setor ainda foi responsável por utilizar 4,19 milhões de toneladas, representando cerca de 65,7% do consumo total brasileiro (IBÁ, 2021).

O setor de carvão vegetal possui a vantagem de ordem econômica e de qualidade dos produtos industrialmente obtidos, além dos ganhos ambientais que podem ser alcançados, comparativamente, por exemplo, ao uso do coque mineral.

Nesse último aspecto, os Mecanismos e Desenvolvimento Limpo, direta e indiretamente atrelados às regras do Protocolo de Kyoto, são estímulos adicionais à intensificação do uso do carvão vegetal na siderurgia nacional. (BRITO, 2008)

Ainda, segundo Brito (2008), muitos desafios ainda são enfrentados pelos produtores e indústrias deste setor. O primeiro refere-se à oferta de matéria-prima sustentável para sua produção, pois é sabido que uma boa parcela da madeira usada na obtenção do produto ainda é originária de florestas não-renovadas e em regime não-sustentado. Isso tem levado as principais indústrias do setor a se empenharem no estabelecimento de programas de plantios florestais, visando a produção total de carvão oriunda de madeiras de florestas plantadas.

Outro grande desafio ligado ao carvão vegetal diz respeito à tecnologia empregada na sua produção. O carvão vegetal brasileiro ainda é obtido, na sua maior proporção, da mesma forma como era séculos atrás. A tecnologia é antiga, o controle operacional dos fornos de carbonização é pequeno, e muito pouco se pratica em termos de controle qualitativo e quantitativo da produção. Além de produzir carvão vegetal de qualidade, o investimento em novas tecnologias permitirá diminuir a emissão de gases e a sua recuperação a partir da produção de subprodutos químicos importantes (licor pirolenhoso e alcatrão) (BRITO, 2008).

## 2.2 Qualidade da madeira para produção de carvão vegetal

A qualidade da madeira para produção de carvão vegetal está relacionada às suas características físico-químicas, que influenciam na eficiência do processo de carbonização e na qualidade do carvão produzido. Algumas das características que definem a qualidade da madeira para produção de carvão vegetal incluem a densidade básica, a umidade e a sua composição química, que podem ser afetados pela espécie e/ou híbridos utilizados e a sua idade (ALMEIDA et al., 2015; CASTRO et al., 2016). Outros fatores como espaçamento, local de plantio, tipo de manejo do plantio, variações climáticas e qualidade nutricional do solo também podem afetar na qualidade da madeira (ASSIZ et al., 2018; ZANUNCIO et al., 2019).

A variação na qualidade da madeira está muito relacionada à sua origem, se de espécies nativas ou de espécies de rápido crescimento. As madeiras oriundas de florestas nativas advêm de uma maior diversidade de espécies que, por consequência, apresentam uma grande variação da qualidade da madeira (densidade

básica e composição química, principalmente), dificuldade de autorização para extração, maior dificuldade do sistema operacional de colheita e transporte e características silviculturais desfavoráveis, como madeiras tortuosas e galhos grossos. Por outro lado, as madeiras oriundas de espécies florestais de rápido crescimento são plantadas e menos diversas, proporcionando uma menor variação na sua qualidade; por serem plantios formados para produção, possuem autorização para extração, o planejamento das operações florestais é mais fácil e menos custoso e as características silviculturais das madeiras, como tronco retilíneo, quase sem galhos e no diâmetro desejado, favorecem a uma maior produção e melhor qualidade do carvão vegetal.

Diante dessa busca por madeira para produção de carvão vegetal de qualidade, o estado de São Paulo lançou uma resolução que define esses padrões para o carvão vegetal ser comercializado no estado (SÃO PAULO, 2023). Esta Resolução SAA – 10/2003 ficou conhecida como selo *Premium* do carvão vegetal e é seguido por vários órgãos que discutem e avaliam a qualidade do carvão vegetal em circulação no país. Entre os padrões definidos na resolução, tem-se a densidade aparente e a granel do carvão, a distribuição granulométrica, a umidade e a composição química imediata.

A densidade básica está relacionada à quantidade de massa de madeira que está presente em um determinado volume, e quanto mais densa a madeira, maior a quantidade de carbono presente nela. Em geral, madeiras mais densas produzem carvão vegetal de melhor qualidade, pois a maior quantidade de carbono presente na madeira significa mais carbono fixado, maior concentração de lignina, maior rendimento gravimétrico e maior densidade aparente (FREDERICO, 2009).

Com relação a composição química da madeira, a celulose é um dos principais componentes da madeira. Ela é como um esqueleto repleto de compostos de polioses (celulose e hemiceluloses) que são envolvidos pela lignina, que atua como um cimento que dá rigidez ao conjunto. A sua presença é de cerca de 34,2% da composição do carvão até 300 °C e a partir dessa temperatura, a sua decomposição é acelerada a ponto de apresentar uma discreta participação na composição final do carvão e ser responsável por uma expressiva produção de gases (ALMEIDA et al., 2015).

O teor de lignina também é uma característica importante na qualidade do carvão vegetal e a madeira utilizada para a sua produção deve possuir uma elevada porcentagem desse composto (CASTRO et al., 2016). No seu trabalho, Frederico

(2009) encontrou um rendimento de lignina em carvão vegetal de 55% e de celulose de 19%.

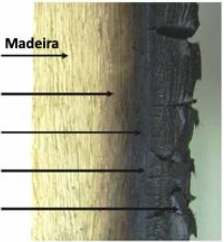
O conteúdo de lignina tem relação direta com o teor de carbono fixo do carvão vegetal, que, por sua vez, tem uma relação inversa com o conteúdo celulósico. A lignina reage lentamente ao longo do processo, o que indica que matéria prima com teores mais altos desse composto ou com baixas quantidades de hemiceluloses são mais indicados para a produção carbonífera (QUINHONES, 2011).

Os extrativos também são importantes para a qualidade do carvão vegetal. Eles são, em grande parte, formados por substâncias voláteis que se degradam a uma menor temperatura sem contribuir, significativamente, para o rendimento gravimétrico em carvão (CASTRO, 2011).

### 2.3 Importância das variáveis do processo de carbonização na qualidade do carvão vegetal

Além das características que definem a qualidade da madeira é necessário seguir um processo de carbonização ideal para se produzir um carvão vegetal de qualidade de acordo com o fim que se almeja e visando maior rendimento possível. Utilizando-se uma marcha de carbonização mais demorada e com temperaturas finais mais altas, a madeira sofre uma degradação maior, gerando um menor rendimento gravimétrico, uma menor densidade aparente do carvão, menor resistência e um teor de carbono fixo mais elevado (CASTRO, 2011).

A temperatura final de carbonização é uma das variáveis mais importantes e que afeta diretamente sua qualidade. Como a carbonização ocorre em 3 fases distintas, em cada uma delas ocorre uma série de reações, conforme Figura 1 (FIGUEROA e MORAES, 2009; OLIVEIRA, 2013).

Fenômeno	Fase	Faixa de temperatura (°C)	Madeira
Liberação de vapor de água – secagem da madeira, fase endotérmica	I	100-150	
Degradação das hemiceluloses, eliminação de gases, fase endotérmica	II	150-275	
Degradação da celulose, grande produção de gases, fase exotérmica. Formação do carvão vegetal	III	275-400	
Redução da emissão de gases, fase exotérmica. Aumento da concentração de carbono no carvão vegetal	IV	400-470	

**Figura 1** – Faixas teóricas de temperatura para o controle da carbonização da madeira.

O incremento da temperatura ao longo do tempo é o que determina a taxa de aquecimento da carbonização, e ela é uma variável importante na produção de carvão vegetal, uma vez que afeta a qualidade do produto final. Uma taxa de aquecimento acelerada diminui o rendimento gravimétrico, o teor de materiais voláteis e a densidade aparente e, também causa aumento no teor de carbono fixo e de cinzas do carvão vegetal. Assim, uma taxa de aquecimento baixa pode aumentar o tempo de produção, acrescentando custos ao processo. Portanto, a taxa de aquecimento deve ser ajustada para equilibrar a qualidade do produto e o tempo de produção (SOUZA, 2018).

O tempo total de carbonização, que é o período em que a madeira é submetida à temperatura elevada para a produção de carvão, também é uma variável crítica na produção de carvão vegetal. Essa variável pode afetar a qualidade do carvão em vários aspectos, como o rendimento, a densidade aparente, a resistência mecânica, o teor de cinzas, a composição química, a porosidade, a superfície específica e o poder calorífico.

Em geral, o tempo de carbonização deve ser suficiente para que ocorra a formação completa do carvão, mas não tão longo a ponto de prejudicar a sua qualidade, gerando um produto final mais degradado. Um tempo excessivamente longo resulta em um carvão com baixo rendimento, baixa densidade, alta porosidade e alto teor de cinzas. Por outro lado, um tempo insuficiente pode resultar em um carvão com alto teor de voláteis, muita fumaça e baixo poder calorífico, já que parte da energia será utilizada para terminar o processo de carbonização no momento em que o carvão estiver sendo utilizado. Portanto, é importante encontrar um equilíbrio entre o tempo de carbonização e a qualidade do carvão desejada.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Pesquisa e seleção do material bibliográfico.

O trabalho seguiu uma estrutura de estudo exploratório por meio de uma revisão de literatura elaborada a partir da seleção de material publicado, composto por artigos, dissertações e teses.

O material foi coletado em revistas científicas nacionais, como: Revista *Árvore*, Revista *Cerne*, Revista *Ciência Florestal*, Revista *Floresta e Ambiente*; e repositórios de teses e dissertações de universidades brasileiras, como: Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Universidade Federal de Lavras (UFLA) e Universidade Federal de Viçosa (UFV), utilizando as seguintes palavras-chave: carbonização, carvão vegetal, pirólise e madeira. Foram selecionados 26 artigos e 8 dissertações/teses publicadas no período de 2001 a 2021.

Em seguida foi feita uma leitura/triagem considerando como critério de seleção as bibliografias que abordassem a qualidade da madeira (densidade básica e composição química) com as variáveis do processo de carbonização da madeira e, como resultado, a avaliação da qualidade do carvão obtido no processo.

Num terceiro nível de seleção dos os materiais, foram considerados os clones/espécies em idade (6 e 7 anos) e espaçamento (3x2, 3x3 e 3,5x2.5 m) mais usuais pelos fabricantes de carvão no Brasil ou os que foram relatados nas pesquisas utilizadas nesse trabalho (2 e 3 anos), que realizaram estudos de qualidade da madeira e do carvão vegetal.

Num terceiro nível de seleção, foram consideradas as publicações que especificavam os gêneros dos clones/espécies (*Eucalyptus* e Nativas) e demais informações sobre a madeira, e que apresentaram claramente as variáveis de carbonização mais usuais pelas instituições de pesquisa no Brasil. Nessa seleção foram considerados 9 artigos e 4 dissertações/teses.

Essa seleção foi importante para padronizar o material de pesquisa e permitir a visualização mais clara das relações entre as características da madeira, as variáveis do processo de carbonização e as características do carvão vegetal.

### 3.2 Elaboração das planilhas de dados organizados a partir do material bibliográfico selecionado

As informações extraídas das bibliografias selecionadas foram organizadas em planilhas contendo as informações mais relevantes para esse estudo, com informações sobre as espécies/clones, idade, espaçamento e local, conforme Anexo I-A para as madeiras do gênero *Eucalyptus* e Anexo II-A para as madeiras de espécies nativas.

Com relação as características da madeira (densidade e composição química), variáveis do processo de carbonização (tempo total de carbonização, temperatura final de carbonização e taxa de aquecimento), características do carvão vegetal (rendimento, teor de carbono fixo, densidade básica e poder calorífico) e autor/data, essas informações foram disponibilizadas no anexo I-B para as madeiras do gênero *Eucalyptus* e II-B para as madeiras de espécies nativas.

### 3.3 Estabelecimento das correlações entre a qualidade da madeira, variáveis do processo de carbonização e características do carvão vegetal.

Para a realização dos estudos foram criados gráficos de correlação entre todas as variáveis selecionadas. Foi feita a correlação entre a densidade básica e a composição química da madeira (teor de holocelulose, lignina total, extrativo e relação SG da lignina); com as variáveis do processo (tempo total de carbonização, temperatura final de carbonização e taxa de aquecimento) e com as características do carvão vegetal (teor de carbono fixo, densidade aparente e poder calorífico superior), tanto para as madeiras de eucalipto quanto nativas.

A partir da observação da relação entre todas as variáveis acima, foi inserida uma linha de tendência linear, de modo a auxiliar no entendimento do nível de relação entre as variáveis.

### 3.4 Tabela comparativa das características do carvão vegetal e das variáveis do processo de carbonização.

Para finalizar o trabalho e tentar entender ainda melhor a relação da qualidade da madeira (densidade básica e composição química) no processo de carbonização

e na qualidade do carvão vegetal, dentre os trabalhos selecionados, foi elaborada uma tabela comparativa, conforme Anexo I-C para madeiras de eucalipto e Anexo II-C para madeiras de espécies nativas.

Foram escolhidos três diferentes tempos de carbonização para as madeiras de eucalipto (240, 360 e 740 min) e três diferentes tempos para madeiras nativas (150, 240 e 330 min), consideradas condições extremas, para estabelecer as comparações entre as variáveis da qualidade da madeira e as características do carvão vegetal (rendimento, teor de carbono fixo, densidade aparente e poder calorífico). Essa comparação busca entender em que condições deve-se alterar as variáveis de processo (taxa de aquecimento), devido a variação da qualidade da madeira (densidade básica e composição química), e o reflexo dessa combinação na qualidade do carvão vegetal.

A comparação nas condições extremas de processo não foi possível de ser realizada para madeira de mesma idade/espaçamento, pois essas condições extremas foram justamente utilizadas devido a grande variação da qualidade da madeira utilizada nessas pesquisas.



#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos trabalhos publicados utilizados nesta pesquisa (Anexo I-A e 1-B), foram coletados dados de 53 materiais genéticos (clones e nativas), dentre os quais 71,7% eram relativos ao gênero *Eucalyptus* (38 clones) e 28,3% das madeiras de espécies nativas (15 espécies), sendo todos os trabalhos relativos à produção de carvão vegetal.

Outro fato importante de ser relatado foi sobre a falta de informação dos plantios florestais. A idade do clone foi informada em 100% dos trabalhos de eucalipto e em apenas 6,7% dos trabalhos com nativas; o espaçamento dos plantios não foi informado em 31,6% dos trabalhos de eucalipto e 93,3% dos trabalhos de espécies nativas; e o local de procedência foi informado em todos os trabalhos, tanto de eucalipto quanto de nativas.

Considerando todas as informações do plantio como importantes (idade, espaçamento e procedência), 68,4% dos trabalhos de eucalipto e apenas 6,7% dos trabalhos de nativas apresentaram todas as informações.

Sobre a falta de informações da qualidade da madeira (densidade básica e composição química completa), todos os trabalhos de eucalipto apresentaram a densidade básica, teor de lignina total e extrativos. Porém, 39,5% dos trabalhos de eucalipto não apresentaram o teor de holocelulose (celulose e hemicelulose), e 63,2% não apresentou a relação S/G da lignina. A qualidade das madeiras das espécies nativas, em termos de densidade básica, teor de lignina total e extrativos, foi informada em todos os trabalhos. Por outro lado, o teor de holocelulose não foi informado em 6,7% dos trabalhos, e a relação S/G da lignina não foi informada em nenhum trabalho.

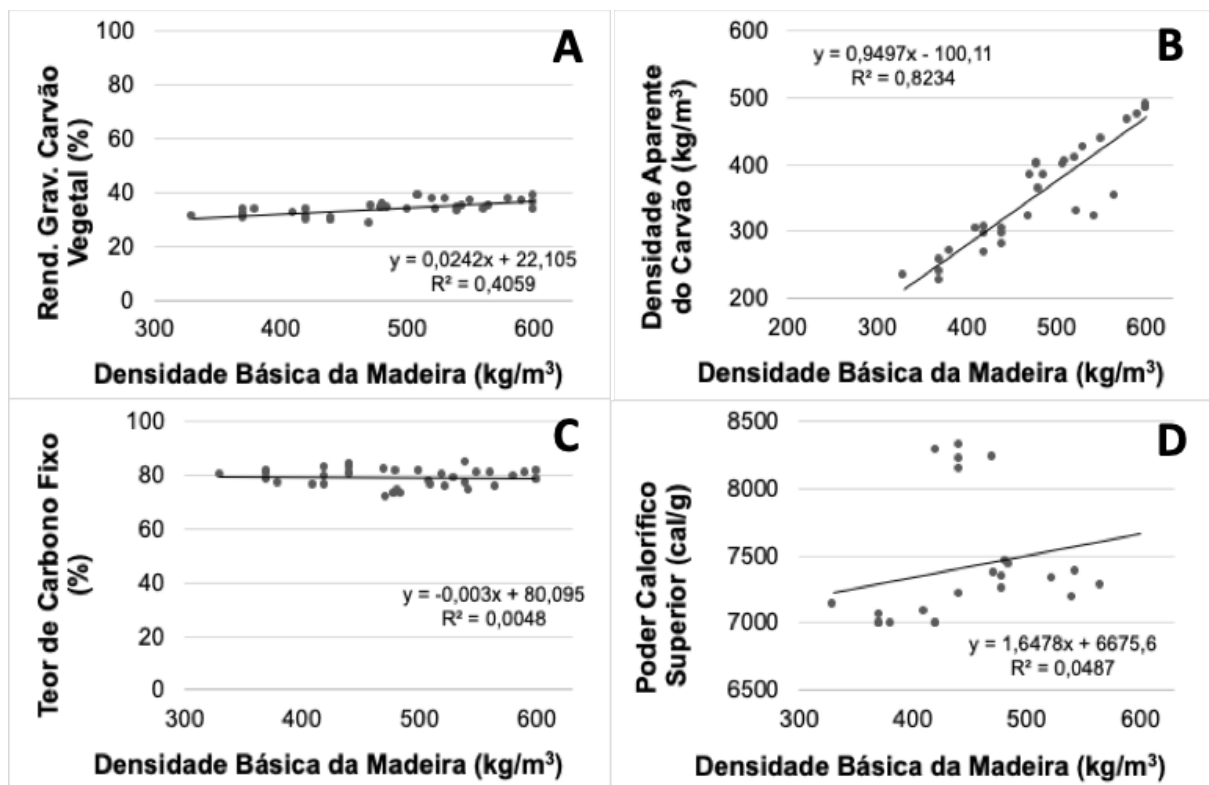
Considerando todas as informações da qualidade da madeira como importantes (densidade básica e composição química completa), apenas 36,8% dos trabalhos de eucalipto apresentaram todas as informações e 0% dos trabalhos de madeiras de espécies nativas.

Isso demonstra que é preciso um maior investimento na realização de análises de qualidade da madeira para a avaliação do processo de carbonização e qualidade do carvão vegetal.

#### 4.1 Estudo da densidade básica da madeira na qualidade do carvão vegetal

O carvão vegetal de eucalipto avaliado neste estudo foi oriundo de madeiras com densidade básica que variou de 331 kg/m<sup>3</sup> (*E. urophylla* x *E. grandis*) a 600 kg/m<sup>3</sup> para (*E. saligna* e *E. grandis*), indicando uma considerável variação na densidade da madeira entre as espécies de rápido crescimento (Figura 2A).

Com relação aos resultados para as madeiras de eucalipto, o rendimento gravimétrico em carvão vegetal teve uma leve tendência de aumento à medida que a densidade básica da madeira aumentou. Isso acontece porque para uma determinada capacidade de forno, uma madeira mais densa proporciona uma maior produção em massa de carvão vegetal (MEDEIROS NETO et al., 2012), conforme Figura 2A.



**Figura 2** – Relação da densidade básica da madeira de eucalipto com o rendimento gravimétrico do carvão vegetal (A); densidade aparente do carvão (B); teor de carbono fixo (C); e poder calorífico superior (D).

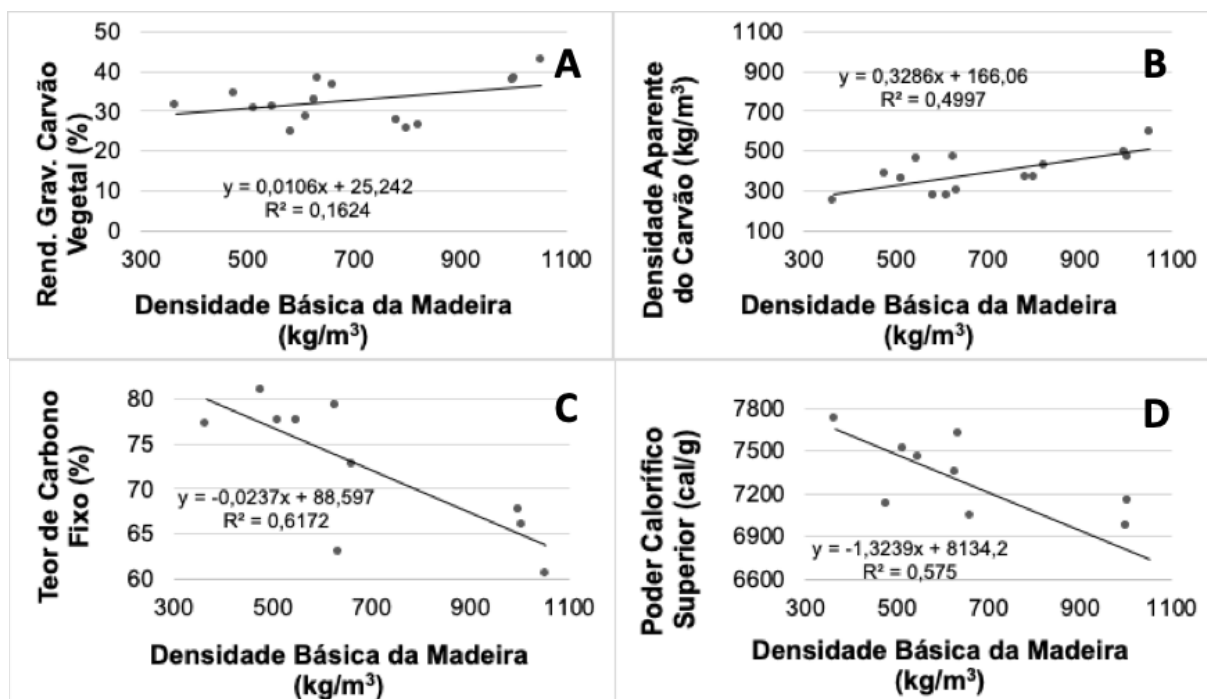
Quanto ao rendimento gravimétrico em carvão, a variação foi menor, entre 28,7% e 39,1%. A espécie *E. grandis* apresentou o maior rendimento gravimétrico médio (36,4%), enquanto *E. grandis* x *E. urophylla* apresentou o menor rendimento (30,9%).

A densidade aparente do carvão vegetal aumentou consideravelmente com a elevação da densidade básica da madeira. Apesar das variáveis do processo de carbonização interferirem na densidade do carvão, foi verificada uma forte influência da densidade básica da madeira. De acordo com Costa (2014), existe uma alta correlação entre a densidade básica da madeira e a densidade aparente do carvão vegetal, por isso, quanto mais densa a madeira, mais denso será o carvão vegetal dela proveniente, conforme Figura 2B.

O teor de carbono fixo do carvão vegetal de eucalipto não apresentou tendência de aumento com o aumento da densidade básica da madeira (Figura 2C), tendo apresentando um valor mínimo de 71,9% (*E. grandis* x *E. urophylla*) e máximo de 84,4% (*E. grandis* x *E. camaldulensis*). Segundo Soares (2014), o teor de carbono fixo do carvão vegetal é mais influenciado pelos teores de extrativos, que acabam não sendo fixados no produto, mas volatilizados devido às condições do processo, e também pela presença de uma maior relação C/H, sugerindo maior presença de carbono elementar não pirolisável.

Por fim, o poder calorífico superior (PCS) do carvão aumentou com a elevação da densidade básica da madeira (Figura 2D). O poder calorífico do carvão variou de 6996 cal/g (*E. grandis* x *E. urophylla*) a 8326 cal/g (*E. grandis*). Isso ocorre pela maior quantidade de carbono fixo, que é o principal elemento combustível presente na biomassa (FREDERICO, 2009). Os híbridos apresentaram grande variação na densidade básica da madeira e no poder calorífico do carvão vegetal, sugerindo uma ampla variabilidade genética nesses materiais.

Com relação ao carvão vegetal oriundo de madeiras de espécies nativas, foi possível verificar que a densidade básica da madeira variou de 364 kg/m<sup>3</sup> para *Trema micrantha* a 1052 kg/m<sup>3</sup> para *Poincianella pyramidalis*, indicando uma grande variação na densidade da madeira entre as espécies nativas (Figura 3A). Os trabalhos consultados com madeiras de espécies nativas apresentaram uma maior variação de densidade básica da madeira do que a variação apresentada pelas espécies comerciais (eucalipto). Isso é explicado pela grande diversidade de espécies nativas com potencial para serem cultivadas para a produção de carvão vegetal.



**Figura 3** – Relação da densidade básica das madeiras de espécies nativas com o rendimento gravimétrico do carvão vegetal (A); densidade aparente do carvão (B); teor de carbono fixo (C); e poder calorífico superior (D).

O rendimento gravimétrico em carvão vegetal aumentou com o aumento da densidade básica da madeira das espécies nativas (Figura 2A), mesma tendência observada com as madeiras de eucalipto. O maior rendimento foi observado para a espécie *Poincianella pyramidalis* (43,0%), e o menor rendimento para a espécie *Vochysia thyrsoidea* (24,9%).

Assim, é possível notar que os eucaliptos apresentaram uma variação no rendimento gravimétrico em carvão vegetal inferior em relação as madeiras nativas. Porém, é importante lembrar que outros fatores, como a umidade da madeira e a temperatura de carbonização, também influenciam no rendimento gravimétrico.

Quando se trata da comparação entre a densidade básica da madeira e a densidade aparente do carvão vegetal nas espécies nativas (Figura 3B), é possível perceber uma mesma tendência, porém com um efeito menor (Figura 2B).

A densidade aparente do carvão vegetal de nativas apresentou uma variação maior que a observada nos carvões de eucalipto, com valores entre 255 kg/m<sup>3</sup> para *Trema micrantha* e 600 kg/m<sup>3</sup> para *Poincianella pyramidalis*. Isso sugere que essa maior variação na densidade básica da madeira promoveu uma maior variação na densidade aparente do carvão vegetal de nativas (Figura 3B).

Quanto ao teor de carbono fixo do carvão, a maioria das espécies nativas apresentou valores em torno de 70% (Anexo II-B), e decresceu com o aumento da densidade básica da madeira, tendência diferente àquela apresentada pelo carvão de eucalipto. Esse comportamento pode ser explicado devido às madeiras mais densas exigirem condições de carbonização diferenciadas/drásticas, e por isso o comprometimento do teor de carbono fixo no carvão vegetal (Figura 2C). O teor de carbono fixo é importante porque influencia no poder calorífico da madeira.

A variação no teor de carbono fixo do carvão de madeiras nativas (60,6 a 81,0%) foi maior que a observada nos carvões de madeiras de eucalipto (71,9 a 84,4%). Assim, é possível notar que os carvões de eucalipto apresentam um teor de carbono fixo um pouco mais elevado e com uma variação menor em comparação com aos carvões de árvores nativas (maior controle do processo de carbonização devido a menor heterogeneidade da madeira).

Ao comparar os dados de densidade básica da madeira e do poder calorífico do carvão vegetal das espécies listadas, foi possível notar uma relação inversa (Figura 3D), ou seja, o aumento da densidade básica da madeira levou a um decréscimo do poder calorífico do carvão vegetal. Esse comportamento foi contrário ao observado com as espécies de eucalipto, e foi similar ao observado para o teor de carbono fixo do carvão vegetal de nativas, ou seja, devido às madeiras mais densas demandarem condições mais extremas de carbonização, o poder calorífico do carvão também diminuiu.

Isso pode ser confirmado pelo carvão vegetal de elevado poder calorífico, como na espécie *Trema micrantha* (7730 cal/g) ter apresentado baixa densidade básica da madeira (364 kg/m<sup>3</sup>); enquanto outras espécies com um carvão de menor poder calorífico, como *Poincianella pyramidalis* (6248 cal/g), terem apresentado elevada densidade básica da madeira (1052 kg/m<sup>3</sup>).

A variação do poder calorífico superior do carvão vegetal de espécies nativas (6248 a 7730 cal/g) foi próxima à variação observada com os carvões de eucalipto (6996 a 8326 cal/g), porém os valores observados para carvões de eucalipto foram superiores. Isso pode ser explicado pois um carvão vegetal com teor de carbono fixo mais elevado tende a ter um maior poder calorífico, o que pode torná-lo mais adequado para a utilização como fonte de energia.

#### 4.2 Estudo da composição química da madeira na qualidade do carvão vegetal

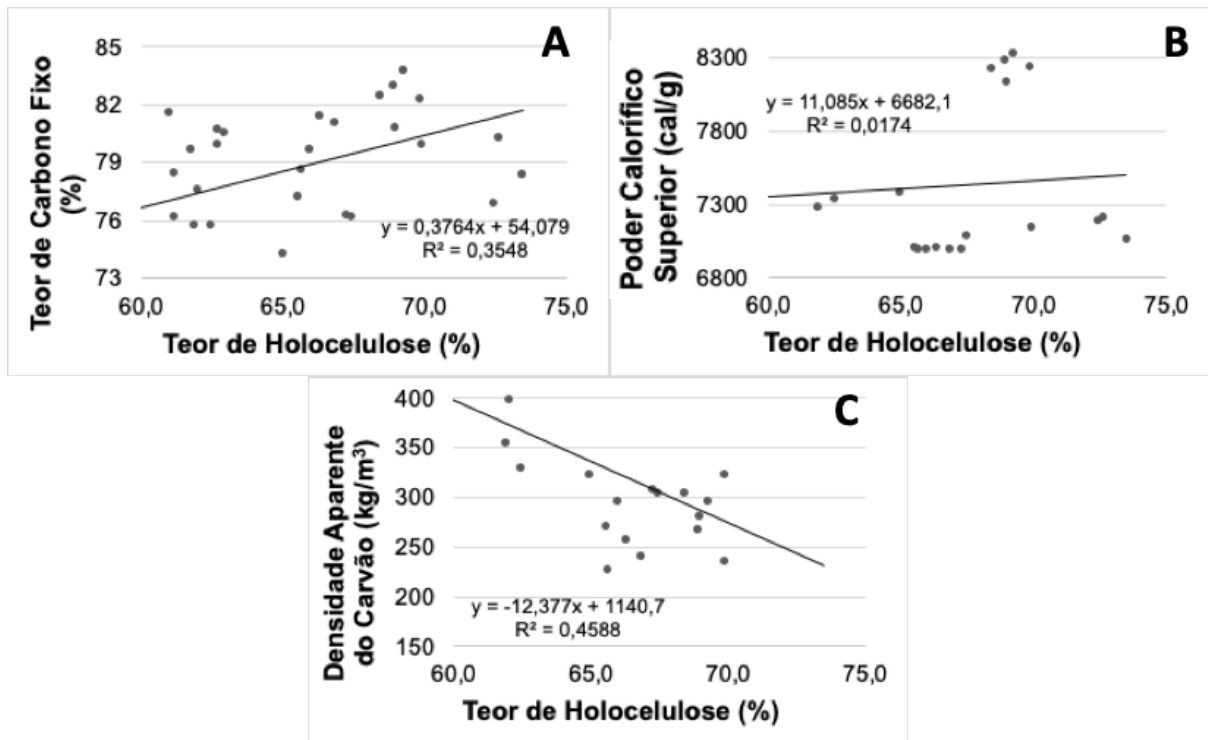
A holocelulose é definida como a fração polissacarídica da madeira e é composta por celulose e hemicelulose, importante na composição química da madeira. A determinação do teor de holocelulose em diferentes tipos de madeira pode ser útil para a caracterização da qualidade da madeira para diferentes finalidades, e pode ser realizada por diferentes métodos, incluindo por diferença após a determinação do teor de extrativos e lignina (CASTRO, 2011).

O teor de holocelulose das madeiras de eucalipto variou de 61,9% (*E. urophylla* x *E. grandis*) a 73,5% (*E. urophylla* x *E. grandis*) enquanto o teor de carbono fixo do carvão vegetal variou de 71,9% (*E. grandis* x *E. urophylla*) a 84,4% (*E. camaldulensis* x *E. urophylla*).

Embora o teor de holocelulose seja um dos principais componentes da biomassa vegetal e seja convertida em produtos voláteis, como água e gases, durante a carbonização, a relação entre o teor de holocelulose e o teor de carbono fixo pode variar dependendo das características específicas da biomassa. Pelos dados pesquisados, o aumento no teor de holocelulose promoveu um aumento no teor de carbono fixo do carvão vegetal (Figura 4A). Apesar da lignina ser o principal componente da madeira responsável pela fixação do carbono, nem todo o carbono presente na holocelulose é volatilizado, colaborando também com o rendimento, com o teor de carbono fixo e com o poder calorífico do carvão.

O poder calorífico do carvão vegetal variou de 6996 cal/g (*E. grandis* x *E. urophylla*) a 8326 cal/g (*E. grandis*). Ao analisar o poder calorífico superior em relação ao teor de holocelulose, não foi perceptível uma correlação clara entre essas variáveis. Por exemplo, a espécie *Eucalyptus grandis* apresentou o maior poder calorífico, com 8326 cal/g, mas não apresentou o maior teor de holocelulose, com 69,2%. No entanto, outros materiais, como *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, com um teor de holocelulose de 72,4 a 73,5% têm um poder calorífico mais baixo, de 7062 a 7215 cal/g.

Esses resultados indicam que outros fatores, além da composição celulósica, podem influenciar o poder calorífico da madeira, como a diferença de idade ou teor de lignina. Portanto é importante levar em consideração vários fatores ao avaliar o potencial energético de diferentes espécies de madeira.



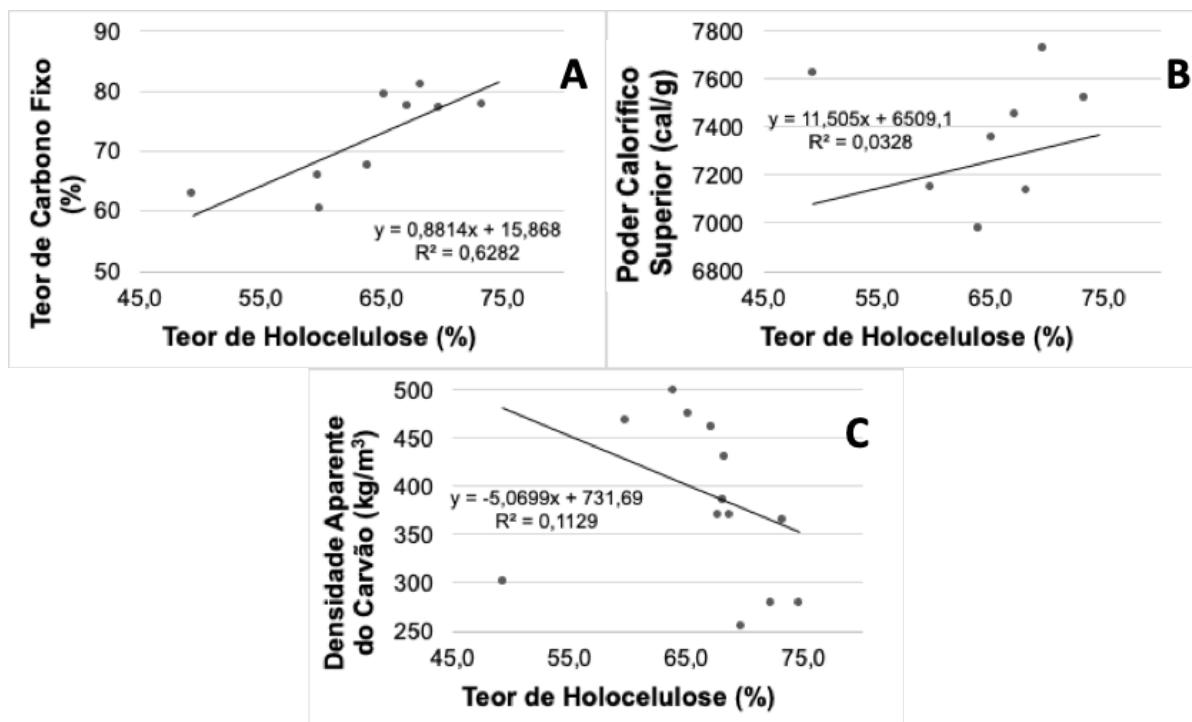
**Figura 4** – Relação do teor de holocelulose da madeira de eucalipto com o teor de carbono fixo (A); poder calorífico superior (B); e densidade aparente do carvão (C).

A densidade aparente do carvão vegetal variou de  $227 \text{ kg/m}^3$  (*E. grandis* x *E. urophylla*) a  $404 \text{ kg/m}^3$  (*E. grandis* x *E. urophylla*). A comparação entre o teor de holocelulose da madeira e a densidade aparente do carvão vegetal, conforme a Figura 4C, apresentou uma correlação inversa, ou seja, o aumento do teor de holocelulose levou a uma redução da densidade aparente do carvão vegetal. A explicação para essa relação está no fato da maior parte desses compostos químicos da madeira se volatilizarem durante a carbonização, produzindo um carvão menos denso. A compreensão dessa relação pode ser útil em processos industriais, na seleção de espécies para produção de carvão vegetal, onde a densidade é um fator crítico a ser considerado.

Com relação às madeiras nativas, a relação entre o teor de carbono fixo e o teor de holocelulose apresentou o mesmo comportamento que o percebido para madeira de eucalipto, ou seja, uma relação direta e positiva entre as duas variáveis, conforme Figura 5A.

O teor de holocelulose das madeiras de espécies nativas variou de 49,3% (*Amburana cearensis*) a 74,6% (*Vochysia thyrsoidea*), conforme Figura 5B. Essa variação é maior do que a observada na madeira de eucalipto (Figura 4A), mostrando

a maior diversidade de qualidade dessas espécies. O teor de carbono fixo variou de 60,6 % (*Poincianella pyramidalis*) a 81,0% (*Luehea divaricata*), variação maior do que a observada na madeira de eucalipto (Figura 4A).



**Figura 5** – Relação do teor de holocelulose de madeiras de espécies nativas com o teor de carbono fixo (A); poder calorífico superior (B); e densidade aparente do carvão (C).

O poder calorífico superior do carvão de madeiras nativas, conforme a Figura 5B, também aumentou quando houve um aumento no teor de holocelulose. O poder calorífico variou entre 7730 cal/g (*Trema micrantha*) e 6248 cal/g (*Poincianella pyramidalis*), variação similar à observada para o carvão das madeiras de eucalipto (Figura 4B).

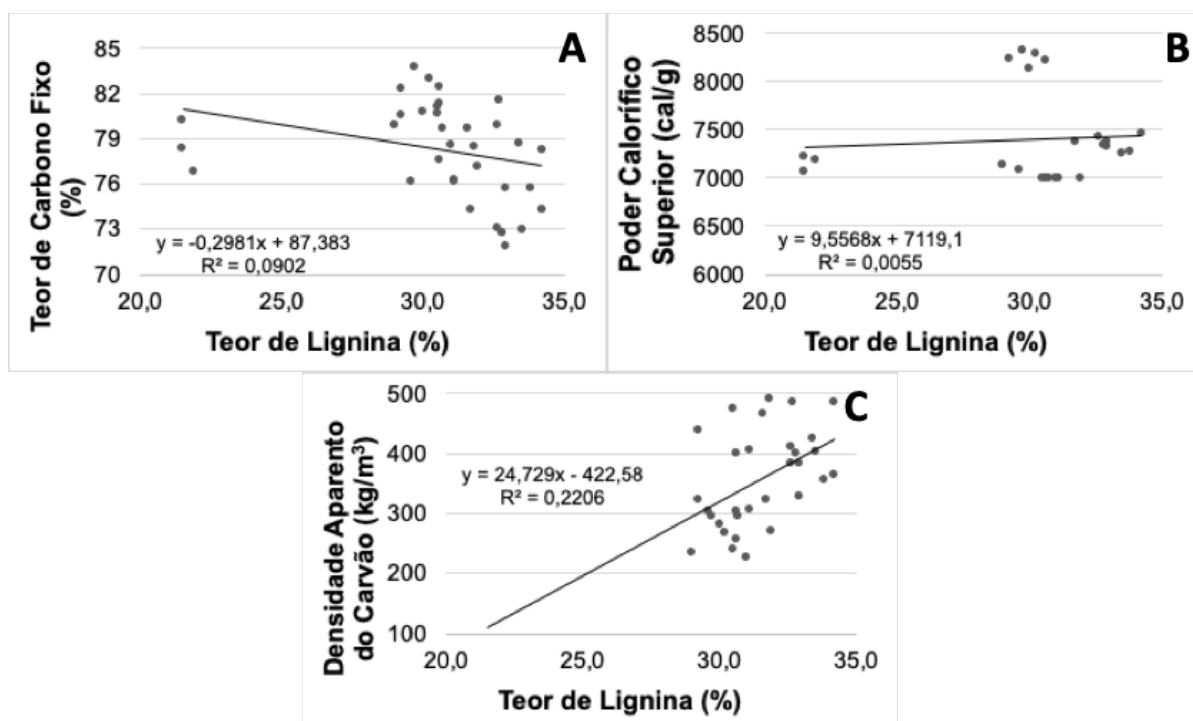
O mesmo comportamento foi observado na relação entre o teor de holocelulose e a densidade aparente do carvão vegetal (Figura 5C): quanto mais holocelulose um indivíduo apresentou, menos carvão em massa ele produziu; mas esse carvão produzido teve cada vez mais carbono fixado e cada vez mais uma maior quantidade de energia foi armazenada.

A densidade aparente do carvão vegetal de madeiras nativas apresentou uma variação maior que a observada nos carvões de eucalipto, com valores entre 255 kg/m³ para *Trema micrantha* e 600 kg/m³ para *Poincianella pyramidalis*.



O teor de lignina das madeiras de eucalipto variou de 21,5% (*E. urophylla* x *E. grandis*) a 34,3% (*E. grandis*), e as relações entre o teor de lignina e as características do carvão obtido de madeiras de eucalipto podem ser observadas na Figura 6 A-C.

O aumento do teor de lignina na madeira mostrou uma relação negativa com o teor de carbono fixo do carvão vegetal (Figura 6A). Ao contrário do que poderia se esperar, o teor de lignina isoladamente não conseguiu explicar o comportamento do teor de carbono fixo. Castro (2011) também relatou a dificuldade em explicar a relação entre essas duas variáveis e atribuiu esse comportamento à variação na temperatura e no tempo de carbonização.



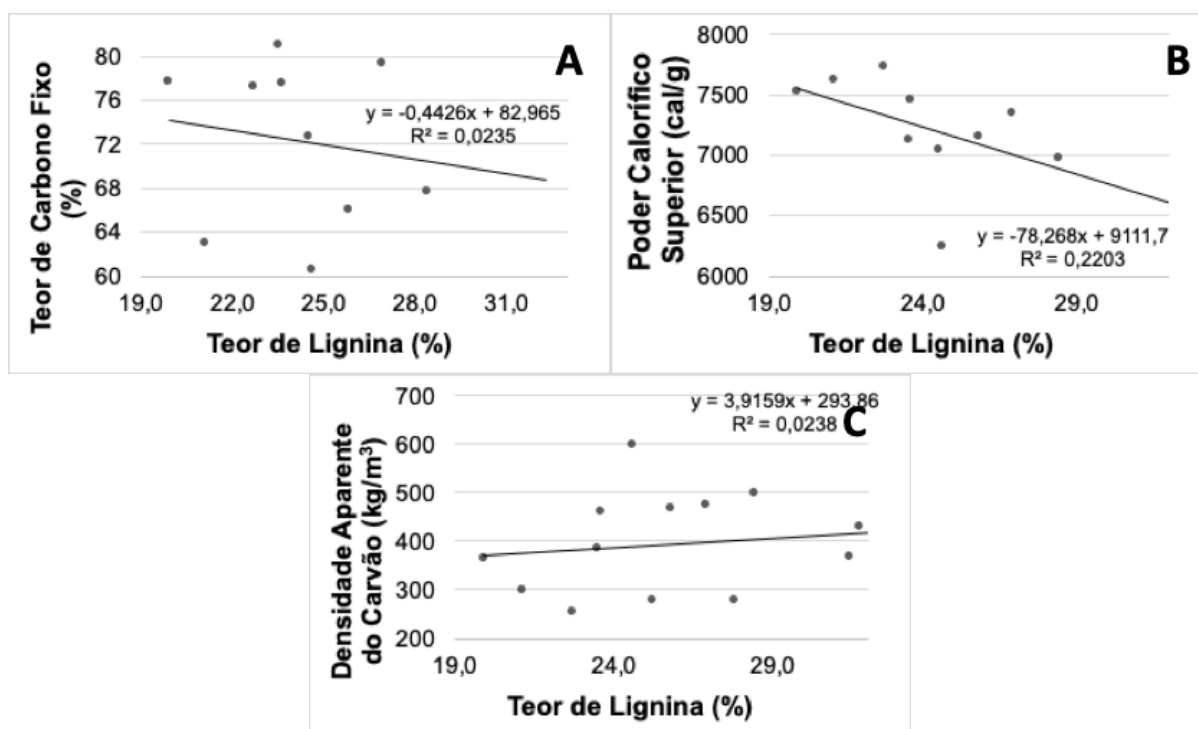
**Figura 6** – Relação do teor de lignina da madeira de eucaliptos com o teor de carbono fixo (A); poder calorífico superior (B); e densidade aparente do carvão (C).

Na Figura 6B pode-se observar que os maiores teores de lignina produziram um carvão vegetal de maior poder calorífico. A amostra com o maior teor de lignina (34,2%) apresentou um poder calorífico de 7466 cal/g, enquanto a amostra com menor teor de lignina (21,5%) teve poder calorífico de 7062 e 7215 cal/g. Como pode ser observado no Figura 6B, indivíduos na faixa de 30% de lignina apresentaram poder calorífico superior variando de 7001 cal/g até 8326 cal/g, mostrando que há uma variação nos dados (Anexo I-B). Mas é importante destacar que a relação entre o teor de lignina da madeira e o poder calorífico do carvão vegetal é esperada, por essa ser

uma molécula que se degrada menos a altas temperaturas e que armazena mais energia.

A respeito da relação entre o teor de lignina e a densidade aparente do carvão, houve uma tendência linear bem mais clara, como pode ser observado na Figura 6C, justamente por causa da estabilidade térmica da lignina em relação a celulose. Como a lignina é muito mais estável, os indivíduos que apresentam maiores teores desse composto conservam uma quantidade maior de massa no carvão. Os indivíduos com menos lignina podem ter uma quantidade maior de celulose em sua composição, que se perde a altas temperaturas.

Os indivíduos com menos lignina podem ter uma quantidade maior de celulose em sua composição, que se perde a altas temperaturas. Entretanto, há duas amostras com o mesmo teor de lignina (30,6%), mas com densidades aparentes diferentes (305 kg/m<sup>3</sup> e 399 kg/m<sup>3</sup>). Além disso, há amostras com teores de lignina diferentes e densidades aparentes com valores próximos, que foram influenciadas pelas condições do processo de carbonização (Anexo I-B).



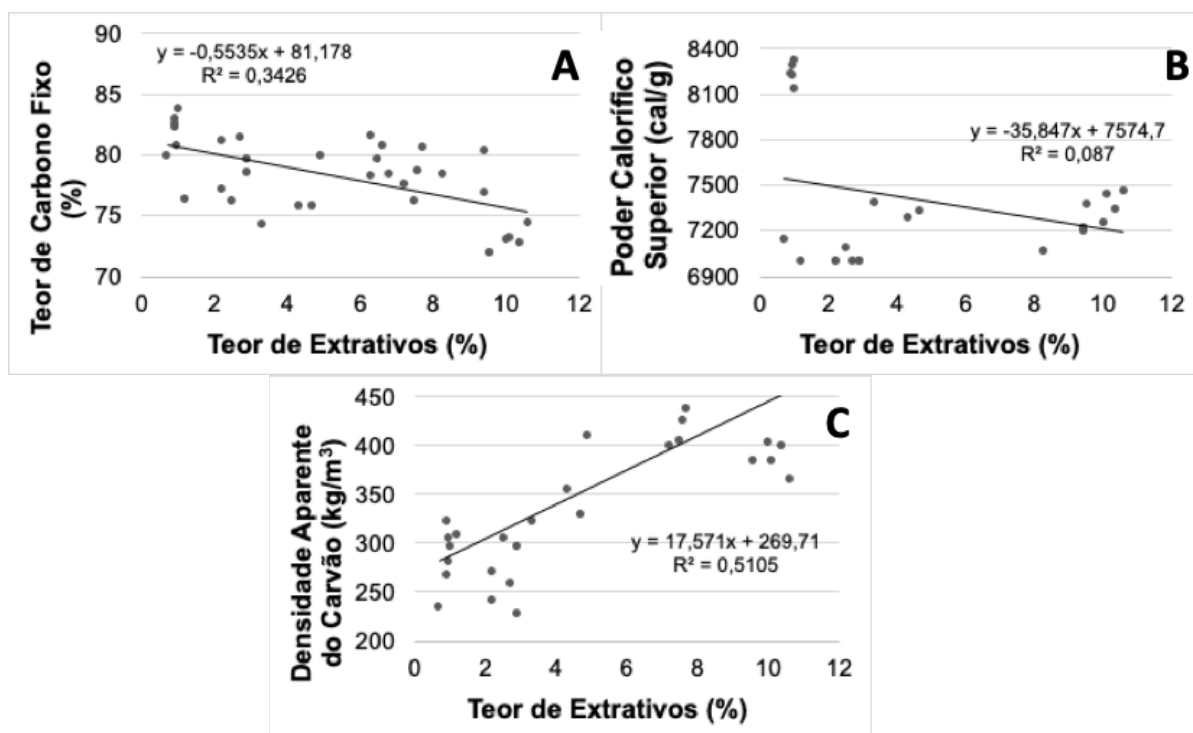
**Figura 7** – Relação do teor de lignina de madeiras de espécies nativas com o teor de carbono fixo (A); poder calorífico superior (B); e densidade aparente do carvão (C).

Com relação aos carvões oriundos de madeiras nativas, como pode ser visto na Figura 7A, a relação entre o teor de lignina e o teor de carbono fixo apresentou um

resultado similar ao que foi obtido para os eucaliptos. Mais uma vez, o teor de lignina da madeira não conseguiu explicar isoladamente o teor de carbono fixo do carvão vegetal.

Para as relações entre o teor de lignina das madeiras nativas e poder calorífico superior (Figura 7B) e a densidade aparente do carvão (Figura 7C), os resultados encontrados foram diferentes daqueles observados nos eucaliptos. O PCS, para os carvões de madeiras nativas, reduziu com o aumento do teor de lignina (Figura 7B), enquanto para o grupo de madeiras de eucalipto, a relação foi praticamente constante (Figura 6B). Para a densidade aparente do carvão vegetal das madeiras nativas, a tendência foi praticamente constante (Figura 7C) e diferente da tendência observada nas madeiras de eucalipto, que apresentou um aumento da densidade aparente com o aumento da lignina (Figura 6C).

Ao analisar a relação do teor de extrativos das madeiras de eucalipto com as características do carvão obtido foi possível perceber que quanto maior a sua quantidade, menores foram o teor de carbono fixado e PCS. Isso ocorre, na maioria das vezes, porque os extrativos se volatilizam durante a carbonização, como pode ser observado na Figuras 8A e 8B, respectivamente.

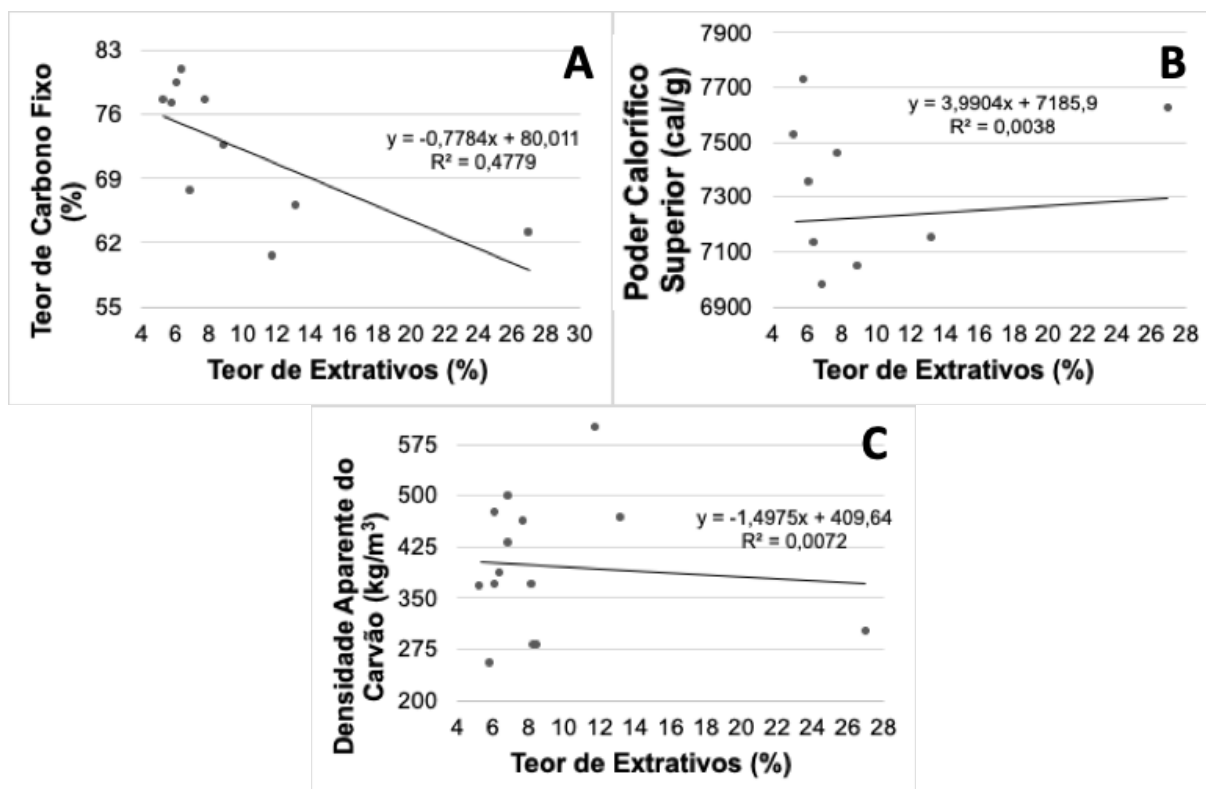


**Figura 8** – Relação do teor de extrativos da madeira de eucaliptos com o teor de carbono fixo (A); poder calorífico superior (B); e densidade aparente do carvão (C).

A densidade aparente do carvão vegetal aumentou com o aumento do teor de extrativos da madeira. Essa relação pode ser explicada também por outros fatores, como a idade, já que os indivíduos de *Eucalyptus spp.* que apresentaram carvões com maiores densidades aparentes eram mais velhos (6 a 7 anos) que os indivíduos que apresentaram menor densidade (3 anos), conforme Anexos I-A e I-B.

O teor de carbono fixo do carvão de nativas apresentou uma diminuição considerável com o aumento no teor de extrativos da madeira (Figura 9A). As espécies de madeiras nativas apresentaram dois grupos distintos de extrativos, um com um teor que variou de 5,3 a 8,9% (mais baixo) e outro que variou de 11,8 até 27,0% (Anexo II-B). O primeiro grupo apresentou um teor de carbono fixo de 72,7 até 81%, e o segundo grupo de 60,6 até 66,1% demonstrando o quão determinante é essa relação.

Este comportamento foi similar ao encontrado nas madeiras de eucalipto e também se justifica pela volatilização dos extrativos quando a madeira é exposta a elevadas temperaturas. Isso é intensificado nas madeiras de nativas por se tratarem de espécies com elevado teor de extrativos.



**Figura 9** – Relação do teor de extrativos das madeiras de espécies nativas com o teor de carbono fixo (A); poder calorífico superior (B); e densidade aparente do carvão (C).

O PCS do carvão de nativas aumentou levemente com o aumento do teor de extrativos da madeira, o que demonstra a importância desses compostos em madeiras nativas com elevados teores de extrativos que não se volatilizam durante a carbonização (Figura 9B).

A densidade aparente do carvão vegetal de nativas também decresceu levemente com o aumento do teor de extrativos na madeira (Figura 9C), mais uma vez justificado pela grande volatilização desse material durante o processo de carbonização.

#### 4.3 Estudo dos parâmetros de processo de carbonização na qualidade do carvão vegetal.

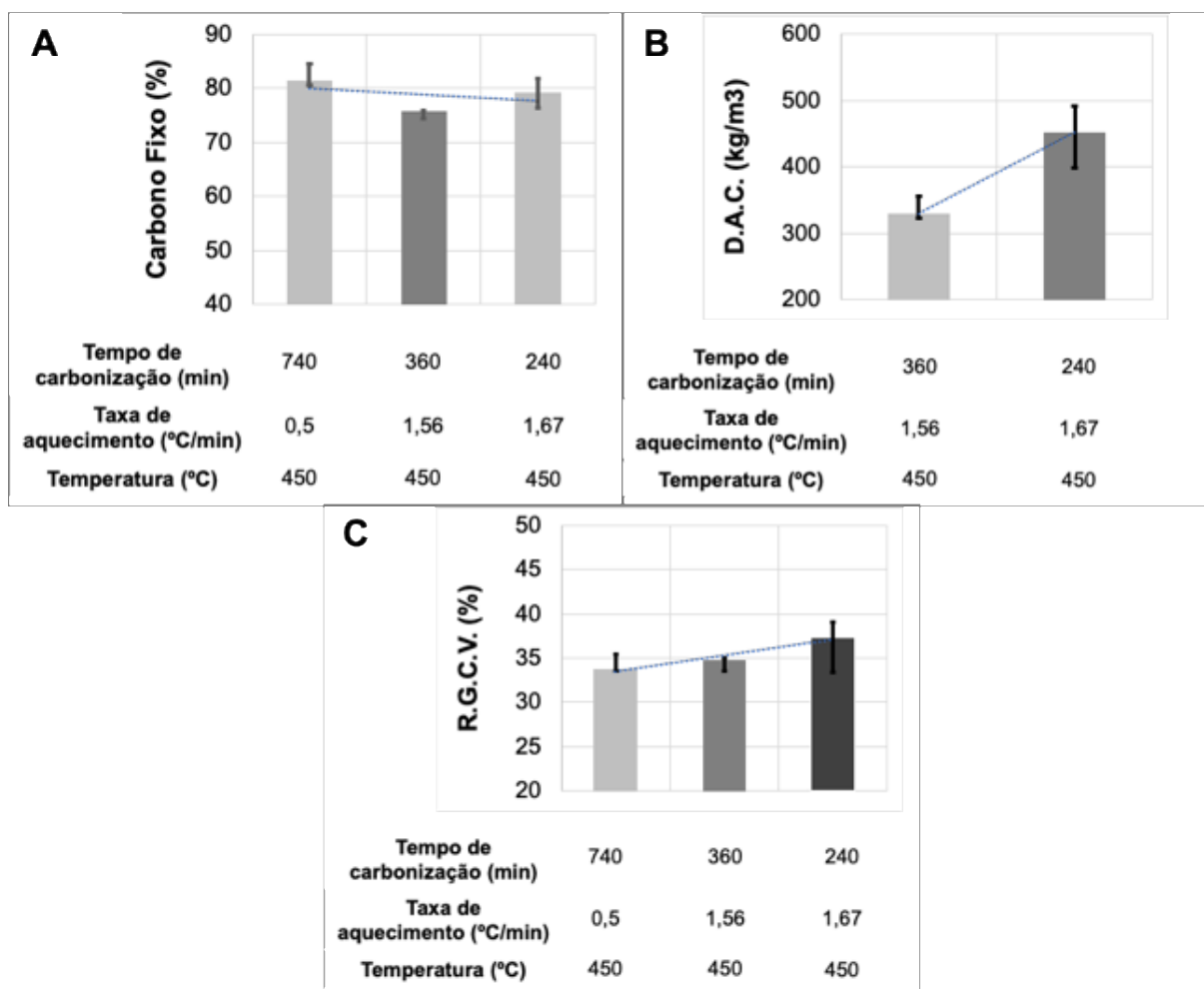
As informações sobre as variáveis dos processos de carbonização das madeiras de eucaliptos oriundos dos materiais científicos avaliados apresentaram tempos variando entre 240 a 740 min, taxa de aquecimento variando entre 0,50 a 1,67 °C/min, e temperatura de carbonização fixa em 450 °C.

O teor de carbono fixo não apresentou grandes diferenças entre a menor taxa de aquecimento (79,2%) e a maior (81,5%), sendo que a condição que apresentou o menor valor (75,8%) foi a taxa intermediária (1,56 °C/min). O tempo de carbonização mais longo (740 minutos) combinado a uma taxa de aquecimento mais lenta (0,5 °C/min) produziram um carvão com um teor de carbono fixo de apenas 2,3%, superior ao tempo de carbonização mais curto (240 minutos) associado a uma taxa de aquecimento mais acelerada (1,67 °C/min), conforme Figura 10A.

Em relação à densidade aparente do carvão vegetal e ao rendimento gravimétrico, estes apresentaram uma tendência oposta à do teor de carbono fixo, sendo que quanto mais rápido o processo, utilizando uma taxa de aquecimento superior (1,67 °C/min) e um tempo mais curto de carbonização (240 minutos), maiores foram os resultados encontrados, com um carvão mais denso (453 kg/m<sup>3</sup>) e um rendimento gravimétrico superior (37,4%). A taxa de aquecimento mais lenta (1,56 °C/min) associada a um tempo de carbonização mais prolongado (360 minutos) apresentaram um carvão menos denso (330 kg/m<sup>3</sup>) e com um menor rendimento gravimétrico (34,8%), conforme Figuras 10B e 10C, respectivamente.

Os valores de poder calorífico superior do carvão vegetal oriundo de madeiras de eucalipto foram informados por poucos trabalhos consultados. A escolha, portanto,

da indústria, deveria ser pautada nas outras três informações (densidade aparente, teor de carbono fixo e rendimento gravimétrico), sendo que a densidade aparente do carvão foi a variável que apresentou uma variação bem mais significativa nos valores que as outras duas variáveis. Em outras palavras, a marcha 240 min / 1,67 °C/min apresentou um aumento de 37,1% na densidade aparente do carvão vegetal em relação a marcha 360 min / 1,56 °C/min.



**Figura 10** – Relação dos parâmetros do processo de carbonização das madeiras de eucalipto com o teor de carbono fixo do carvão (A); densidade aparente do carvão (B); e rendimento gravimétrico em carvão vegetal (C).

As informações das carbonizações das madeiras de espécies nativas dos materiais científicos avaliados apresentaram tempos variando entre 150 a 330 min, taxa de aquecimento variando entre 1,36 a 3,00 °C/min e temperatura de carbonização fixa em 450 °C. Em relação à carbonização da madeira de eucalipto, esses tempos de carbonização apresentaram menor variação e menores valores, e as taxas de aquecimento foram superiores. A temperatura final de carbonização, tanto para

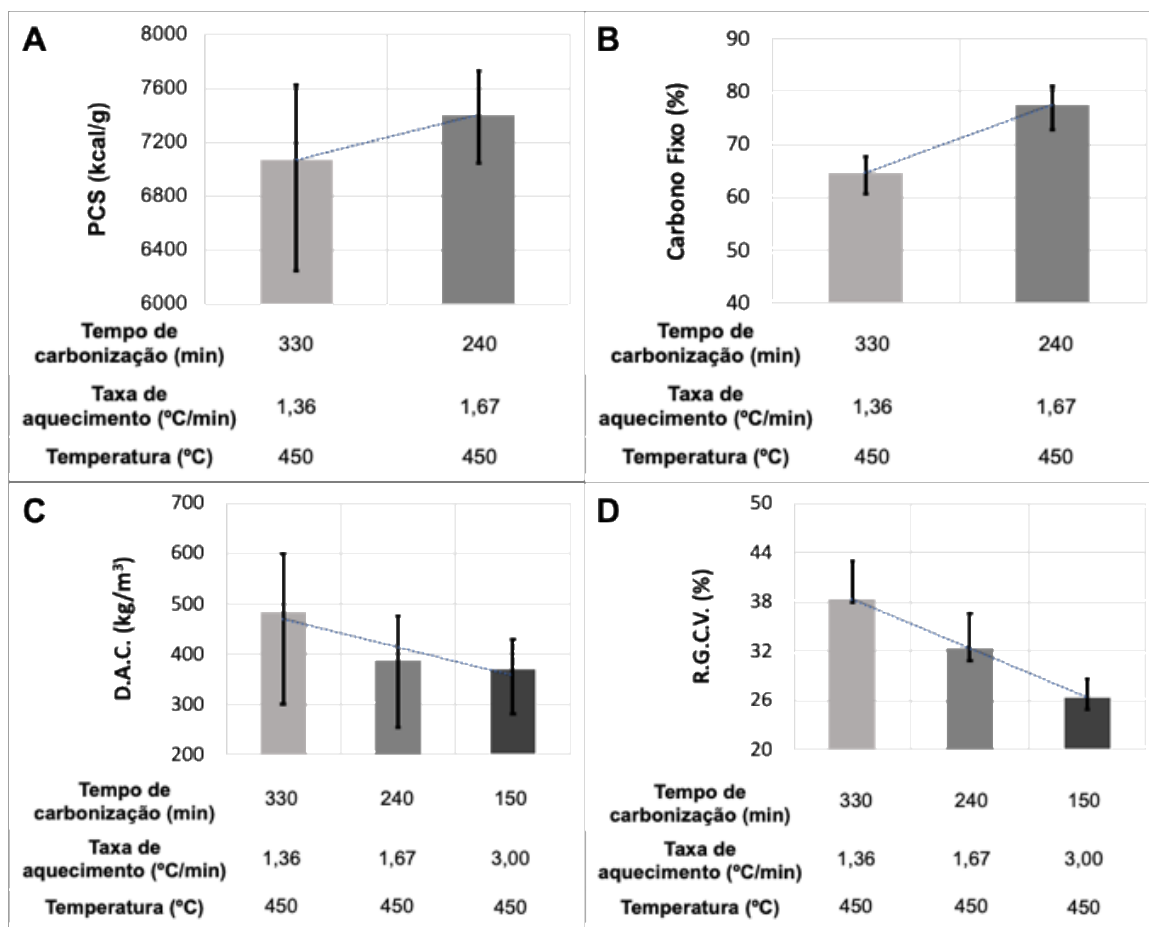
madeira de eucalipto quanto para madeiras de espécies nativas, foi similar e igual a 450 °C.

A partir desses dados foi possível observar que o poder calorífico superior do carvão vegetal de nativas (PCS) foi maior (7406 cal/g) quando utilizadas as condições de tempo de 240 min e taxa de aquecimento de 1,67 °C/min, na temperatura de 450 °C, conforme Figura 11A, em relação à taxa de 1,36 °C/min e um tempo de 330 minutos de carbonização (7065,7 cal/g). Isso demonstra que mesmo madeiras diferentes podem produzir carvão vegetal com elevado PCS, desde que utilizada elevada taxa de aquecimento e menor tempo de carbonização.

O teor de carbono fixo do carvão vegetal de nativas apresentou comportamento muito similar ao do PCS, ou seja, foi maior quando foi utilizada maior taxa de aquecimento e menor tempo de carbonização (Figura 11B). Isso porque quanto mais carbono fixado no carvão vegetal, maior é a quantidade de energia acumulada no material, representado pelo PCS. Quando utilizado um tempo de carbonização mais curto (240 min) e uma taxa de aquecimento mais rápida (1,67 °C/min), a média de carbono fixado foi de 77,7% e quando utilizado um aquecimento mais lento (1,36 °C/min) com um tempo de carbonização mais longo (330 min) a média obtida foi de 64,6% (Figura 11B).

A partir dessas constatações pode-se observar que há uma dupla vantagem a ser explorada durante o processo de carbonização, tanto na velocidade em que se aquecem os fornos quanto no tempo em que a madeira permanece carbonizando. Isso torna o processo mais curto, podendo gerar uma economia massiva para as indústrias.

A densidade aparente do carvão vegetal de nativas e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal apresentaram comportamentos bastante similares. A maior densidade aparente do carvão (484 kg/m<sup>3</sup>) e o maior rendimento em carvão (38,4%) foram observados na condição com maior tempo de carbonização (330 min) e menor taxa de aquecimento (1,36 °C/min), para a temperatura de 450 °C, conforme Figuras 11C e 11D, respectivamente.



**Figura 11** – Relação dos parâmetros do processo de carbonização das madeiras de espécies nativas com o poder calorífico superior do carvão vegetal (A); teor de carbono fixo do carvão (B); densidade aparente do carvão (C); e rendimento gravimétrico em carvão vegetal (D).

Pode-se observar que três taxas de carbonização foram empregadas (1,36, 1,67 e 3,00 °C/min) e que quanto mais rápido esse aquecimento aconteceu, menores foram tanto o rendimento gravimétrico quanto a densidade aparente do carvão vegetal. Mas essas variáveis não podem ser levadas em consideração isoladamente das outras, porque um carvão mais denso pode muito bem apresentar um maior teor de compostos voláteis, apresentar uma carbonização incompleta e possuir um poder calorífico menor.

Sempre o grupo com maior taxa de aquecimento (1,67 °C/min) foi o que apresentou maior poder calorífico e teor de carbono fixo, em detrimento da menor densidade aparente do carvão e do menor rendimento gravimétrico em carvão vegetal. O grupo com menor taxa de aquecimento (1,36 °C/min) foi o que apresentou maior densidade do carvão e maior rendimento, mas ao custo de produzir um carvão com menos carbono fixo e, conseqüentemente, menor poder calorífico superior (Figuras 11 A-D).



## 5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho permitiram concluir que dentre as características da madeira, a densidade básica, o teor de lignina total e o teor de extrativos são as mais utilizadas nas indústrias de carvão para nortear o rendimento do processo, enquanto o teor de holocelulose e a relação S/G da lignina foram pouco usadas nas pesquisas, tanto para eucalipto quanto para madeiras nativas.

Foi perceptível a menor quantidade de estudos usando a madeira de espécies nativas, quanto a qualidade do carvão vegetal. Com relação aos parâmetros do processo de carbonização na qualidade do carvão, a temperatura final é uma variável praticamente fixa, enquanto se varia mais o tempo total de carbonização e a taxa de aquecimento.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. M. C. *et al.* Avaliação físico-química e energética da madeira das espécies *Piptadenia stipulacea* (Benth.) Ducke e *Amburana cearenses* (Allemão) A. C. Smith de ocorrência no semiárido nordestino brasileiro. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 165-173, jan.-mar., 2015.

ARANTES, M. D. C. *et al.* Características do carvão de um clone de *eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Cerne**, Lavra, v. 19, n. 3, p. 423-431, 2013.

ASSIS, C. O. *et al.* Efeito da aplicação de nitrogênio na produção e qualidade da madeira e carvão vegetal de um híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 1, p. , 2018.

BRITO, J. O. Os principais desafios da prática de produção de carvão vegetal no Brasil. **Revista Opiniões**, Ribeirão Preto, v. 12, p. 24, 2008.

CASTRO, A. F. N. M. *et al.* Correlations between age, wood quality and charcoal quality of eucalyptus clones. **Revista Árvore**, Viçosa, v.40, n.3, p.551-560, 2016.

COSTA, T. G. *et al.* Qualidade da madeira de cinco espécies de ocorrência no cerrado para produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 1, p. 37-46, jan./mar. 2014.

EMBRAPA TERRITORIAL. **Agricultura e preservação ambiental**: uma análise do cadastro ambiental rural. Campinas, 2020. Disponível em: < [www.embrapa.br/car](http://www.embrapa.br/car) >. Acesso em: 10 out. 2022

FIGUEROA, M. J. M. e MORAES, P. D. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4. out./dez. 2009.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Forest products statistics**. 2020a. Disponível em:

< <https://www.fao.org/forestry/statistics/80938@180723/en/>> . Acesso em: 11 mai. 2023.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Forest products statistics**. 2020b. Disponível em: < <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>> . Acesso em: 11 mai. 2023.

FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. 85 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

GLOBO RURAL. **Informativo** – sistema de fornos permite a produção de carvão vegetal de maneira sustentável. Viçosa: 2021. Disponível em: < <https://poscienciaflorestal.ufv.br/informativo/sistema-de-fornos-permite-a-producao-de-carvao-vegetal-de-maneira-sustentavel/>>. Acesso em: 14 jun. 2023.

IBÁ – Indústria Brasileira de produtores de Árvores. **Carvão Vegetal**. Brasília: 2023. Disponível em: <<https://www.iba.org/carvao-vegetal-2#:~:text=O%20carv%C3%A3o%20vegetal%20%C3%A9%20o,sectores%20industriais%2C%20como%20as%20sider%C3%BArgicas>>. Acesso em: 14 jun. 2023.

IBÁ – Indústria Brasileira de produtores de Árvores. Relatório IBÁ 2021 ano base 2020. Brasília: 2022. 178 p.

MEDEIROS NETO, P. N. *et al.* Características físico-químicas e energéticas de duas espécies de ocorrência no semiárido brasileiro. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 3, p. 579-588, jul.-set., 2012.

OLIVEIRA, A. C. *et al.* Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**, Viçosa, v 37 n.3, 2013.

QUINHONES, R. **Relações entre as características da madeira de *Eucalyptus* sp. e as do carvão produzido a diferentes temperaturas finais de carbonização**. 2011. 79 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

SÃO PAULO. **Resolução nº 10 SAA, de 11 de julho de 2003**. Diário Oficial do Estado de São Paulo, São Paulo, SP, 11 jul. 2003. Disponível em: <[http://www.codeagro.sp.gov.br/arquivos/selo/saa\\_1031a0ff69a85454e1cde89c327a490f5.pdf](http://www.codeagro.sp.gov.br/arquivos/selo/saa_1031a0ff69a85454e1cde89c327a490f5.pdf)>. Acesso em: 14 mai. 2023

SOARES, V. C. *et al.* Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v.38, n.3, p.543-549, 2014.

SOUZA, C. O. **Potencial energético da madeira e carvão vegetal de angico vermelho (*anadenanthera peregrina*) jovem**. 2018. 52 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2018.

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

VALE, A. T.; DIAS, I. S.; SANTANA, M. A. E. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 137-145, jan.-mar., 2010.

VIEIRA, R. S. **Propriedades mecânicas da madeira de clones de *Eucalyptus* e do carvão produzido entre 350°C e 900°C**. 2009. 97p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

ZANUNCIO, A. J. V. Chemical and energetic characterization of *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* clones subject to wind damage. **Revista Árvore**, Viçosa, v.42, n.4, p., 2019.

## ANEXO I

A - Planilha de dados do gênero *Eucalyptus* contendo espécies/clones, idade, espaçamento e local a partir do material bibliográfico selecionado

Material	Classe de Madeira	Idade	Espaçamento	Local de origem	Referências Bibliográficas
<i>Espécie ou Clone</i>		anos	m	cidade/estado/país	
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Eucaliptos	6	3x3	Itamarandiba - MG	Assis et al., 2018
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Eucaliptos	6	3x3	Itamarandiba - MG	Assis et al., 2018
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Eucaliptos	6	3x3	Itamarandiba - MG	Assis et al., 2018
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Eucaliptos	6	3x3	Itamarandiba - MG	Assis et al., 2018
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Eucaliptos	6	3x3	Itamarandiba - MG	Assis et al., 2018
<i>Eucalyptus urophylla</i>	Eucaliptos	7	3,5x2,5	MG	Castro et al., 2016
<i>Eucalyptus urophylla</i>	Eucaliptos	7	3,5x2,5	MG	Castro et al., 2016
<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	Eucaliptos	7	3,5x2,5	MG	Castro et al., 2016
<i>Eucalyptus grandis</i>	Eucaliptos	3	3x3,3	Ipaba - MG	Frederico, 2009
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Eucaliptos	3	3x3,3	Ipaba - MG	Frederico, 2009
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Eucaliptos	3	3x3,3	Ipaba - MG	Frederico, 2009
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Eucaliptos	3	3x3,3	Ipaba - MG	Frederico, 2009
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Eucaliptos	3	3x3,3	Ipaba - MG	Frederico, 2009
<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. urophylla</i>	Eucaliptos	6,7	3x3	Paraopeba - MG	Quinhones, 2011
<i>Eucalyptus urophylla</i>	Eucaliptos	6,8	3x3	Paraopeba - MG	Quinhones, 2011
<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	Eucaliptos	3	ni	SP	Soares et al., 2014
<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	Eucaliptos	5	ni	SP	Soares et al., 2014
<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	Eucaliptos	7	ni	SP	Soares et al., 2014
<i>Eucalyptus grandis</i>	Eucaliptos	7	3x2	Bom Despacho - MG	Trugilho et al., 2001
<i>Eucalyptus grandis</i>	Eucaliptos	7	3x2	Bom Despacho - MG	Trugilho et al., 2001
<i>Eucalyptus grandis</i>	Eucaliptos	7	3x2	Bom Despacho - MG	Trugilho et al., 2001
<i>Eucalyptus grandis</i>	Eucaliptos	7	3x2	Bom Despacho - MG	Trugilho et al., 2001
<i>Eucalyptus grandis</i>	Eucaliptos	7	3x2	Bom Despacho - MG	Trugilho et al., 2001
<i>Eucalyptus grandis</i>	Eucaliptos	7	3x2	Bom Despacho - MG	Trugilho et al., 2001
<i>Eucalyptus grandis</i>	Eucaliptos	7	3x2	Bom Despacho - MG	Trugilho et al., 2001
<i>Eucalyptus saligna</i>	Eucaliptos	7	3x2	Bom Despacho - MG	Trugilho et al., 2001
<i>Eucalyptus saligna</i>	Eucaliptos	7	3x2	Bom Despacho - MG	Trugilho et al., 2001
<i>Eucalyptus saligna</i>	Eucaliptos	7	3x2	Bom Despacho - MG	Trugilho et al., 2001
<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. urophylla</i>	Eucaliptos	7	3x3	Paraopeba - MG	Vieira, 2009
<i>Eucalyptus urophylla</i>	Eucaliptos	7	ni	Paraopeba - MG	Vieira, 2009
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Eucaliptos	2	ni	Belo Oriente - MG	Zanuncio et al., 2019
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Eucaliptos	2	ni	Belo Oriente - MG	Zanuncio et al., 2019
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Eucaliptos	2	ni	Belo Oriente - MG	Zanuncio et al., 2019
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Eucaliptos	2	ni	Belo Oriente - MG	Zanuncio et al., 2019
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Eucaliptos	2	ni	Belo Oriente - MG	Zanuncio et al., 2019
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Eucaliptos	2	ni	Belo Oriente - MG	Zanuncio et al., 2019
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Eucaliptos	2	ni	Belo Oriente - MG	Zanuncio et al., 2019
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Eucaliptos	2	ni	Belo Oriente - MG	Zanuncio et al., 2019

ni = não informado

B - Planilha de dados do gênero *Eucalyptus* contendo as características da madeira (composição química e densidade), as variáveis do processo de carbonização (tempo total de carbonização, temperatura final, taxa de aquecimento e rendimento), as características do carvão (carbono fixo, densidade aparente e poder calorífico) e as referências bibliográficas (autor/data)

Material	Composição Química					DB (kg/m <sup>3</sup> )	Condições			Rend. GCV	CF (%)	DA (kg/m <sup>3</sup> )	PC (cal/g)	Referências Bibliográficas
	C (%)	H (%)	TL (%)	SG	E (%)		T (min)	Temp (°C)	Tx. Aq. (°C/min)					
<i>Espécie ou Clone</i>	madeira					madeira	carbonização			carvão				
<i>E. grandis x E. urophylla</i>	ni	32,9	ni	9,6	471	ni	450	ni	34,7	71,9	385	7375	Assis et al., 2018	
<i>E. grandis x E. urophylla</i>	ni	32,6	ni	10,1	485	ni	450	ni	34,0	73,1	385	7435	Assis et al., 2018	
<i>E. grandis x E. urophylla</i>	ni	34,2	ni	10,6	481	ni	450	ni	34,0	74,4	365	7466	Assis et al., 2018	
<i>E. grandis x E. urophylla</i>	ni	33,5	ni	10,0	479	ni	450	ni	34,2	73,0	404	7257	Assis et al., 2018	
<i>E. grandis x E. urophylla</i>	ni	32,8	ni	10,4	479	ni	450	ni	34,3	72,7	399	7345	Assis et al., 2018	
<i>Eucalyptus urophylla</i>	62,5	32,9	2,3	4,7	522	360	450	1,56	33,5	75,8	330	7332	Castro et al., 2016	
<i>Eucalyptus urophylla</i>	65,0	31,7	2,8	3,3	543	360	450	1,56	34,8	74,3	322	7383	Castro et al., 2016	
<i>E. urophylla x E. grandis</i>	61,9	33,8	2,4	4,3	565	360	450	1,56	35,0	75,8	355	7282	Castro et al., 2016	
<i>Eucalyptus grandis</i>	69,2	29,7	ni	1,0	440	270	450	1,67	29,6	83,7	ni	8326	Frederico, 2009	
<i>E. grandis x E. urophylla</i>	68,9	30,2	ni	0,9	420	270	450	1,67	29,6	83,0	ni	8284	Frederico, 2009	
<i>E. grandis x E. urophylla</i>	69,9	29,2	ni	0,9	470	270	450	1,67	28,7	82,3	ni	8239	Frederico, 2009	
<i>E. grandis x E. urophylla</i>	69,0	30,0	ni	1,0	440	270	450	1,67	29,6	80,8	ni	8139	Frederico, 2009	
<i>E. grandis x E. urophylla</i>	68,4	30,6	ni	0,9	440	270	450	1,67	29,5	82,5	ni	8221	Frederico, 2009	
<i>E. camaldulensis x E. urophylla</i>	65,0	28,8	ni	6,0	480	225	450	0,5	35,5	81,7	ni	ni	Quinhones, 2011	
<i>Eucalyptus urophylla</i>	67,0	27,3	ni	5,4	560	225	450	0,5	33,6	80,5	ni	ni	Quinhones, 2011	
<i>E. urophylla x E. grandis</i>	73,5	21,5	3,5	8,3	370	ni	450	1,67	31,6	78,4	ni	7062	Soares et al., 2014	
<i>E. urophylla x E. grandis</i>	72,6	21,5	3,2	9,4	440	ni	450	1,67	30,6	80,3	ni	7215	Soares et al., 2014	
<i>E. urophylla x E. grandis</i>	72,4	21,9	2,3	9,4	540	ni	450	1,67	33,1	76,9	ni	7193	Soares et al., 2014	
<i>Eucalyptus grandis</i>	ni	30,6	ni	7,2	508	240	450	1,67	39,1	77,6	ni	ni	Trugilho et al., 2001	
<i>Eucalyptus grandis</i>	ni	32,6	ni	4,9	520	240	450	1,67	37,8	79,9	ni	ni	Trugilho et al., 2001	
<i>Eucalyptus grandis</i>	ni	29,2	ni	7,7	550	240	450	1,67	37,0	80,5	ni	ni	Trugilho et al., 2001	
<i>Eucalyptus grandis</i>	ni	32,7	ni	6,3	600	240	450	1,67	33,4	81,6	ni	ni	Trugilho et al., 2001	
<i>Eucalyptus grandis</i>	ni	34,2	ni	6,3	600	240	450	1,67	36,3	78,2	ni	ni	Trugilho et al., 2001	
<i>Eucalyptus grandis</i>	ni	30,5	ni	6,6	590	240	450	1,67	36,8	80,7	ni	ni	Trugilho et al., 2001	
<i>Eucalyptus grandis</i>	ni	33,4	ni	7,6	530	240	450	1,67	37,4	78,7	ni	ni	Trugilho et al., 2001	
<i>Eucalyptus saligna</i>	ni	31,6	ni	6,5	580	240	450	1,67	37,4	79,7	ni	ni	Trugilho et al., 2001	
<i>Eucalyptus saligna</i>	ni	31,1	ni	7,5	510	240	450	1,67	38,9	76,2	ni	ni	Trugilho et al., 2001	
<i>Eucalyptus saligna</i>	ni	31,8	ni	6,8	600	240	450	1,67	38,6	78,5	ni	ni	Trugilho et al., 2001	
<i>E. camaldulensis x E. urophylla</i>	65,3	28,7	ni	6,0	540	ni	450	0,5	34,0	84,4	ni	ni	Vieira, 2009	
<i>Eucalyptus urophylla</i>	66,6	28,2	ni	5,2	500	ni	450	0,5	33,6	81,2	ni	ni	Vieira, 2009	
<i>E. grandis x E. urophylla</i>	67,4	29,6	2,9	2,5	412	230	450	1,67	32,3	76,2	305	7089	Zanuncio et al., 2019	
<i>E. grandis x E. urophylla</i>	69,9	29,0	3,9	0,7	331	230	450	1,67	31,0	79,9	235	7139	Zanuncio et al., 2019	
<i>E. grandis x E. urophylla</i>	66,8	30,5	3,4	2,2	372	230	450	1,67	31,7	81,1	241	6996	Zanuncio et al., 2019	
<i>E. grandis x E. urophylla</i>	66,0	30,7	3,1	2,9	423	230	450	1,67	31,1	79,7	296	6996	Zanuncio et al., 2019	
<i>E. grandis x E. urophylla</i>	67,3	31,1	3,1	1,2	421	230	450	1,67	33,4	76,3	308	6998	Zanuncio et al., 2019	
<i>E. grandis x E. urophylla</i>	65,6	31,0	2,9	2,9	370	230	450	1,67	33,5	78,6	227	6998	Zanuncio et al., 2019	
<i>E. grandis x E. urophylla</i>	66,3	30,6	3,3	2,7	370	230	450	1,67	30,6	81,4	258	7001	Zanuncio et al., 2019	
<i>E. grandis x E. urophylla</i>	65,5	31,9	2,9	2,2	383	230	450	1,67	33,8	77,2	271	7001	Zanuncio et al., 2019	

C = Teor de Celulose; H = Teor de Hemicelulose; TL = Teor de Lignina; SG = Relação Siringila/Guaiacila da Lignina; E = Teor de Extrativos; DB = Densidade Básica; T= Tempo Total de Carbonização; Temp = Temperatura Final de Carbonização; Tx. Aq. = Taxa de aquecimento; Rend. GCV = Rendimento Gravimétrico em Carvão Vegetal; CF = Teor de Carbono Fixo; DA = Densidade Aparente; PC = Poder Caloríficos.

C - Planilha de dados do gênero *Eucalyptus* contendo as características da madeira (densidade e composição química), as variáveis do processo de carbonização (tempo total de carbonização, temperatura final de carbonização e taxa de aquecimento), as características do carvão vegetal (rendimento, teor de carbono fixo, densidade aparente e poder calorífico) e as referências bibliográficas (autor/data) utilizados para a construção das tabelas comparativas

Material	Classe de Madeira	Idade	Espaçamento	Local de origem	Referências Bibliográficas
<i>Espécie ou Clone</i>		anos	m	cidade/estado/país	
<i>Eucalyptus urophylla</i>	Eucaliptos	7	3,5x2,5	MG	Castro et al., 2016
<i>Eucalyptus urophylla</i>	Eucaliptos	7	3,5x2,5	MG	Castro et al., 2016
<i>E. urophylla x E. grandis</i>	Eucaliptos	7	3,5x2,5	MG	Castro et al., 2016
<b>Tempo total = 360 min</b>					
<i>Eucalyptus grandis</i>	Eucaliptos	7	3x2	Bom Despacho - MG	Trugilho et al., 2001
<i>Eucalyptus grandis</i>	Eucaliptos	7	3x2	Bom Despacho - MG	Trugilho et al., 2001
<i>Eucalyptus grandis</i>	Eucaliptos	7	3x2	Bom Despacho - MG	Trugilho et al., 2001
<i>Eucalyptus grandis</i>	Eucaliptos	7	3x2	Bom Despacho - MG	Trugilho et al., 2001
<i>Eucalyptus grandis</i>	Eucaliptos	7	3x2	Bom Despacho - MG	Trugilho et al., 2001
<i>Eucalyptus grandis</i>	Eucaliptos	7	3x2	Bom Despacho - MG	Trugilho et al., 2001
<i>Eucalyptus grandis</i>	Eucaliptos	7	3x2	Bom Despacho - MG	Trugilho et al., 2001
<i>Eucalyptus saligna</i>	Eucaliptos	7	3x2	Bom Despacho - MG	Trugilho et al., 2001
<i>Eucalyptus saligna</i>	Eucaliptos	7	3x2	Bom Despacho - MG	Trugilho et al., 2001
<i>Eucalyptus saligna</i>	Eucaliptos	7	3x2	Bom Despacho - MG	Trugilho et al., 2001
<b>Tempo total = 240 min</b>					
<i>E. camaldulensis x E. urophylla</i>	Eucaliptos	7	3x3	Paraopeba - MG	Quinhones, 2011
<i>Eucalyptus urophylla</i>	Eucaliptos	7	3x3	Paraopeba - MG	Quinhones, 2011
<i>E. camaldulensis x E. urophylla</i>	Eucaliptos	7	3x3	Paraopeba - MG	Vieira, 2009
<i>Eucalyptus urophylla</i>	Eucaliptos	7	3x3	Paraopeba - MG	Vieira, 2009
<b>Tempo total = 740 min</b>					

ni = não informado

(continuação...)

Material	Composição Química					DB (kg/m <sup>3</sup> )	Condições			Rend. GCV	CF (%)	DA (kg/m <sup>3</sup> )	PC (cal/g)	Referências Bibliográficas
	C (%)	H (%)	TL (%)	SG	E (%)		T (min)	Temp (°C)	Tx. Aq. (°C/min)					
<i>Espécie ou Clone</i>	madeira					madeira	carbonização			carvão				
<i>Eucalyptus urophylla</i>	62,5	32,9	2,3	4,7	522	360	450	1,56	33,5	75,8	330	7332	Castro et al., 2016	
<i>Eucalyptus urophylla</i>	65,0	31,7	2,8	3,3	543	360	450	1,56	34,8	74,3	322	7383	Castro et al., 2016	
<i>E. urophylla x E. grandis</i>	61,9	33,8	2,4	4,3	565	360	450	1,56	35,0	75,8	355	7282	Castro et al., 2016	
<b>Tempo total = 360 min</b>	63,1	32,8	2,5	4,1	543	360	450	1,6	34,4	75,3	336	7332		
<i>Eucalyptus grandis</i>	62,0	30,6	ni	7,2	508	240	450	1,67	39,1	77,6	399	ni	Trugilho et al., 2001	
<i>Eucalyptus grandis</i>	62,7	32,6	ni	4,9	520	240	450	1,67	37,8	79,9	410	ni	Trugilho et al., 2001	
<i>Eucalyptus grandis</i>	62,9	29,2	ni	7,7	550	240	450	1,67	37,0	80,5	438	ni	Trugilho et al., 2001	
<i>Eucalyptus grandis</i>	61,0	32,7	ni	6,3	600	240	450	1,67	33,4	81,6	485	ni	Trugilho et al., 2001	
<i>Eucalyptus grandis</i>	59,7	34,2	ni	6,3	600	240	450	1,67	36,3	78,2	486	ni	Trugilho et al., 2001	
<i>Eucalyptus grandis</i>	62,7	30,5	ni	6,6	590	240	450	1,67	36,8	80,7	476	ni	Trugilho et al., 2001	
<i>Eucalyptus grandis</i>	58,7	33,4	ni	7,6	530	240	450	1,67	37,4	78,7	425	ni	Trugilho et al., 2001	
<i>Eucalyptus saligna</i>	61,7	31,6	ni	6,5	580	240	450	1,67	37,4	79,7	467	ni	Trugilho et al., 2001	
<i>Eucalyptus saligna</i>	61,2	31,1	ni	7,5	510	240	450	1,67	38,9	76,2	405	ni	Trugilho et al., 2001	
<i>Eucalyptus saligna</i>	61,2	31,8	ni	6,8	600	240	450	1,67	38,6	78,5	491	ni	Trugilho et al., 2001	
<b>Tempo total = 240 min</b>	61,4	31,8		6,7	559	240	450	1,7	37,3	79,1	448	ni		
<i>E. camaldulensis x E. urophylla</i>	65,0	28,8	ni	6,0	480	780	450	0,5	35,5	81,7	ni	ni	Quinhones, 2011	
<i>Eucalyptus urophylla</i>	67,0	27,3	ni	5,4	560	780	450	0,5	33,6	80,5	ni	ni	Quinhones, 2011	
<i>E. camaldulensis x E. urophylla</i>	65,3	28,7	ni	6,0	540	700	450	0,5	34,0	84,4	ni	ni	Vieira, 2009	
<i>Eucalyptus urophylla</i>	66,6	28,2	ni	5,2	500	700	450	0,5	33,6	81,2	ni	ni	Vieira, 2009	
<b>Tempo total = 740 min</b>	66,0	28,3	ni	5,7	520	740	450	0,5	34,2	82,0	ni	ni		

C = Teor de Celulose; H = Teor de Hemicelulose; TL = Teor de Lignina; SG = Relação Siringila/Guaiacila da Lignina; E = Teor de Extrativos; DB = Densidade básica; T = Tempo Total de Carbonização; Temp = Temperatura Final de Carbonização; Tx. Aq. = Taxa de aquecimento; Rend. GCV = Rendimento Gravimétrico em Carvão Vegetal; CF = Teor de Carbono Fixo; DA = Densidade Aparente; PC = Poder Caloríficos.



## ANEXO II

A - Planilha de dados das espécies nativas contendo espécies/clones, idade, espaçamento e local a partir do material bibliográfico selecionado

Material	Classe de Madeira	Idade	Espaçamento	Local de origem	Referências Bibliográficas
<i>Espécie ou Clone</i>		anos	m	cidade/estado/país	
<i>Piptadenia stipulacea</i>	Nativas	ni	ni	Patos - PB	Almeida, 2015
<i>Amburana cearensis</i>	Nativas	ni	ni	Patos - PB	Almeida, 2015
<i>Casearia sylvestris</i>	Nativas	ni	ni	Itumirim-MG	Costa, 2014
<i>Guazuma ulmifolia</i>	Nativas	ni	ni	Itumirim-MG	Costa, 2014
<i>Rapanea ferruginea</i>	Nativas	ni	ni	Itumirim-MG	Costa, 2014
<i>Trema micrantha</i>	Nativas	ni	ni	Itumirim-MG	Costa, 2014
<i>Luehea divaricata</i>	Nativas	ni	ni	Itumirim-MG	Costa, 2014
<i>Poincianella pyramidalis</i>	Nativas	ni	ni	São Mamede-PB	Medeiros Neto et al., 2012
<i>Handroanthus impertiginosus</i>	Nativas	ni	ni	São Mamede-PB	Medeiros Neto et al., 2012
<i>Anadenanthera peregrina</i>	Nativas	4,5	3x2	Alegre - ES	Souza, 2018
<i>Dalbergia miscolobium</i>	Nativas	ni	ni	Brasília	Vale et al., 2010
<i>Pterodon pubescens</i>	Nativas	ni	ni	Brasília	Vale et al., 2010
<i>Sclerolobium paniculatum</i>	Nativas	ni	ni	Brasília	Vale et al., 2010
<i>Stryphnodendron adstringens</i>	Nativas	ni	ni	Brasília	Vale et al., 2010
<i>Vochysia thyrsoidea</i>	Nativas	ni	ni	Brasília	Vale et al., 2010

ni = não informado

B - Planilha de dados das madeiras de espécies nativas contendo as características da madeira (composição química e densidade), as variáveis do processo de carbonização (tempo total de carbonização, temperatura final, taxa de aquecimento e rendimento), as características do carvão (carbono fixo, densidade aparente e poder calorífico) e as referências bibliográficas (autor/data)

Material	Composição Química				DB (kg/m3)	Condições			Rend.	CF (%)	DA (kg/m3)	PC (cal/g)	Referências Bibliográficas
	C (%)	H (%)	TL (%)	SG		E (%)	T (min)	Temp (°C)	Tx. Aq. (°C/min)				
<i>Espécie ou Clone</i>	madeira				madeira	carbonização				carvão			
<i>Piptadenia stipulacea</i>	59,7	25,8	ni	13,2	1002	330	450	1,36	38,3	66,1	468	7154	Almeida, 2015
<i>Amburana cearensis</i>	49,3	21,1	ni	27,0	632	330	450	1,36	38,4	63,1	301	7626	Almeida, 2015
<i>Casearia sylvestris</i>	65,1	26,9	ni	6,1	625	ni	450	1,67	33,1	79,4	475	7356	Costa, 2014
<i>Guazuma ulmifolia</i>	67,1	23,6	ni	7,8	546	ni	450	1,67	31,4	77,6	462	7456	Costa, 2014
<i>Rapanea ferruginea</i>	73,2	19,9	ni	5,3	511	ni	450	1,67	30,9	77,7	366	7524	Costa, 2014
<i>Trema micrantha</i>	69,6	22,7	ni	5,8	364	ni	450	1,67	31,7	77,2	255	7730	Costa, 2014
<i>Luehea divaricata</i>	68,1	23,5	ni	6,4	475	ni	450	1,67	34,4	81,0	386	7135	Costa, 2014
<i>Poincianella pyramidalis</i>	59,9	24,6	ni	11,8	1052	330	450	1,36	43,0	60,6	600	6248	Medeiros Neto et al., 2012
<i>Handroanthus impertiginosus</i>	63,9	28,4	ni	6,9	998	330	450	1,36	37,9	67,7	500	6977	Medeiros Neto et al., 2012
<i>Anadenanthera peregrina</i>	ni	24,5	ni	8,9	660	240	450	1,67	36,6	72,7	ni	7048	Souza, 2018
<i>Dalbergia miscolobium</i>	68,3	31,7	ni	6,9	820	150	450	ni	26,4	ni	430	ni	Vale et al., 2010
<i>Pterodon pubescens</i>	67,7	32,3	ni	8,2	800	150	450	ni	25,8	ni	370	ni	Vale et al., 2010
<i>Sclerolobium paniculatum</i>	68,6	31,4	ni	6,1	780	150	450	ni	27,9	ni	370	ni	Vale et al., 2010
<i>Stryphnodendron adstringens</i>	72,2	27,8	ni	8,3	610	150	450	ni	28,7	ni	280	ni	Vale et al., 2010
<i>Vochysia thyrsoidea</i>	74,6	25,2	ni	8,5	580	150	450	ni	24,9	ni	280	ni	Vale et al., 2010

C = Teor de Celulose; H = Teor de Hemicelulose; TL = Teor de Lignina; SG = Relação Siringila/Guaiacila da Lignina; E = Teor de Extrativos; DB = Densidade Básica; T= Tempo Total de Carbonização; Temp = Temperatura Final de Carbonização; Tx. Aq. = Taxa de aquecimento; Rend. GCV = Rendimento Gravimétrico em Carvão Vegetal; CF = Teor de Carbono Fixo; DA = Densidade Aparente; PC = Poder Caloríficos.

C - Planilha de dados de madeiras de espécies nativas contendo as características da madeira (densidade e composição química), as variáveis do processo de carbonização (tempo total de carbonização, temperatura final de carbonização e taxa de aquecimento), as características do carvão vegetal (rendimento, teor de carbono fixo, densidade aparente e poder calorífico) e as referências bibliográficas (autor/data) utilizados para a construção das tabelas comparativas

Material	Classe de Madeira	Idade	Espaçamento	Local de origem	Referências Bibliográficas
<i>Espécie ou Clone</i>		anos	m	cidade/estado/país	
<i>Piptadenia stipulacea</i>	Nativas	ni	ni	Patos - PB	Almeida, 2015
<i>Amburana cearensis</i>	Nativas	ni	ni	Patos - PB	Almeida, 2015
<i>Poincianella pyramidalis</i>	Nativas	ni	ni	São Mamede-PB	Neto et al., 2012
<i>Handroanthus impertiginosus</i>	Nativas	ni	ni	São Mamede-PB	Neto et al., 2012
<b>Tempo total = 330 min</b>					
<i>Casearia sylvestris</i>	Nativas	ni	ni	Itumirim-MG	Costa, 2014
<i>Guazuma ulmifolia</i>	Nativas	ni	ni	Itumirim-MG	Costa, 2014
<i>Rapanea ferruginea</i>	Nativas	ni	ni	Itumirim-MG	Costa, 2014
<i>Trema micrantha</i>	Nativas	ni	ni	Itumirim-MG	Costa, 2014
<i>Luehea divaricata</i>	Nativas	ni	ni	Itumirim-MG	Costa, 2014
<i>Anadenanthera peregrina</i>	Nativas	ni	3x2	Alegre - ES	Souza, 2018
<b>Tempo total = 240 min</b>					
<i>Dalbergia miscolobium</i>	Nativas	ni	ni	Brasília	Vale et al., 2010
<i>Pterodon pubescens</i>	Nativas	ni	ni	Brasília	Vale et al., 2010
<i>Sclerolobium paniculatum</i>	Nativas	ni	ni	Brasília	Vale et al., 2010
<i>Stryphnodendron adstringens</i>	Nativas	ni	ni	Brasília	Vale et al., 2010
<i>Vochysia thyrsoidea</i>	Nativas	ni	ni	Brasília	Vale et al., 2010
<b>Tempo total = 150 min</b>					

ni = não informado

(continuação...)

Material	Composição Química					DB (kg/m <sup>3</sup> )	Condições			Rend. GCV	CF (%)	DA (kg/m <sup>3</sup> )	PC (cal/g)	Referências Bibliográficas
	C (%)	H (%)	TL (%)	SG	E (%)		T (min)	Temp (°C)	Tx. Aq. (°C/min)					
<i>Espécie ou Clone</i>	madeira					madeira	carbonização			carvão				
<i>Piptadenia stipulacea</i>	59,7	25,8	ni	13,2	1002	330	450	1,36	38,3	66,1	468	7154	Almeida, 2015	
<i>Amburana cearensis</i>	49,3	21,1	ni	27,0	632	330	450	1,36	38,4	63,1	301	7626	Almeida, 2015	
<i>Poincianella pyramidalis</i>	59,9	24,6	ni	11,8	1052	330	450	1,36	43,0	60,6	600	6248	Neto et al., 2012	
<i>Handroanthus impertiginosus</i>	63,9	28,4	ni	6,9	998	330	450	1,36	37,9	67,7	500	6977	Neto et al., 2012	
<b>Tempo total = 330 min</b>	58,2	25,0	ni	14,7	921	330	450	1,36	39,4	64,3	467	7001		
<i>Casearia sylvestris</i>	65,1	26,9	ni	6,1	625	240	450	1,67	33,1	79,4	475	7356	Costa, 2014	
<i>Guazuma ulmifolia</i>	67,1	23,6	ni	7,8	546	240	450	1,67	31,4	77,6	462	7456	Costa, 2014	
<i>Rapanea ferruginea</i>	73,2	19,9	ni	5,3	511	240	450	1,67	30,9	77,7	366	7524	Costa, 2014	
<i>Trema micrantha</i>	69,6	22,7	ni	5,8	364	240	450	1,67	31,7	77,2	255	7730	Costa, 2014	
<i>Luehea divaricata</i>	68,1	23,5	ni	6,4	475	240	450	1,67	34,4	81,0	386	7135	Costa, 2014	
<i>Anadenanthera peregrina</i>	ni	24,5	ni	8,9	660	240	450	1,67	36,6	72,7	ni	7048	Souza, 2018	
<b>Tempo total = 240 min</b>	68,6	23,5	ni	6,7	530	240	450	1,67	33,0	77,6	389	7375		
<i>Dalbergia miscolobium</i>	68,3	31,7	ni	6,9	820	150	450	3,00	26,4	ni	430	ni	Vale et al., 2010	
<i>Pterodon pubescens</i>	67,7	32,3	ni	8,2	800	150	450	3,00	25,8	ni	370	ni	Vale et al., 2010	
<i>Sclerolobium paniculatum</i>	68,6	31,4	ni	6,1	780	150	450	3,00	27,9	ni	370	ni	Vale et al., 2010	
<i>Stryphnodendron adstringens</i>	72,2	27,8	ni	8,3	610	150	450	3,00	28,7	ni	280	ni	Vale et al., 2010	
<i>Vochysia thyrsoidea</i>	74,6	25,2	ni	8,5	580	150	450	3,00	24,9	ni	280	ni	Vale et al., 2010	
<b>Tempo total = 150 min</b>	70,3	29,7	ni	7,6	718	150	450	3,00	26,7	ni	346	ni		

C = Teor de Celulose; H = Teor de Hemicelulose; TL = Teor de Lignina; SG = Relação Siringila/Guaiacila da Lignina; E = Teor de Extrativos; DB = Densidade básica; T = Tempo Total de Carbonização; Temp = Temperatura Final de Carbonização; Tx. Aq. = Taxa de aquecimento; Rend. GCV = Rendimento Gravimétrico em Carvão Vegetal; CF = Teor de Carbono Fixo; DA = Densidade Aparente; PC = Poder Caloríficos.