

**DECOMPOSIÇÃO TÉRMICA E CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO VEGETAL DE TRES ESPÉCIES DO BIOMA CERRADO VISANDO A PRODUÇÃO PARA FINS ENERGÉTICOS E PARA CARVÃO VEGETAL ATIVADO**

 <https://doi.org/10.56238/sevened2024.032-014>

**Luiz Berber Costa**

Professor Orientador: Hamilton Barbosa Napolitano

Nome da instituição: Universidade Evangélica de Goiás – UniEVANGÉLICA

---

**RESUMO**

O carvão vegetal é utilizado em sua maior parte na produção de ferro-gusa e aço e, também, na produção do carvão vegetal ativado. A exploração de madeira para fins energéticos tem fomentado a redução da vegetação nativa e, ainda, propiciado consequências para a fauna, flora e solo. O carvão vegetal é produzido a partir de florestas plantadas, destacando o Brasil como único país a utilizar fonte renovável no setor siderúrgico. Assim, o objetivo consistiu em analisar a qualidade do carvão vegetal produzido a partir das espécies do bioma Cerrado (*Tachigali vulgaris*, *Myracrodruon urundeuva* e *Amburana cearensis*) para fins energéticos e para a produção de carvão vegetal ativado, visando contribuir para práticas sustentáveis na utilização de fontes renováveis. Para análise das propriedades físicas do carvão, determinou-se a densidade, a porosidade e o teor de umidade, para as propriedades químicas a composição química (percentual de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre), poder calorífico, teor de voláteis e cinzas, potencial hidrogeniônico (pH) e teor de carbono fixo e, quanto aos aspectos biológicos a decomposição, microrganismos e impacto ecológico. Dentre os carvões vegetais das espécies analisadas, destaca-se, principalmente, a espécie *Myracrodruon urundeuva* que apontou os maiores valores de rendimento vegetal e densidade energética, em seguida a espécie *Amburana cearensis* e, por fim, a espécie *Tachigali vulgaris*. O estímulo ao uso do carvão vegetal reflete benefícios de cunho econômico, ambiental e social para o país, sendo que o ambiental se faz relevante, diminuindo o consumo de fontes não-renováveis e emissões de gases de efeito estufa.

**Palavras-chave:** Carbonização. Propriedades Físicas. Densidade.

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por fontes de energia renováveis tem levado à exploração de alternativas sustentáveis, entre as quais se destaca o uso do carvão vegetal. Este biocombustível, produzido a partir da carbonização de biomassas, como a proveniente de árvores e vegetação nativa, emerge como uma solução viável para atender às necessidades energéticas de forma mais ambientalmente amigável.

O bioma Cerrado, com sua rica biodiversidade, abriga uma variedade de espécies vegetais que podem ser utilizadas na produção de carvão vegetal, destacando-se entre elas o *Tachigali vulgaris*, *Myracrodruon urundeuva* e *Amburana cearensis*. Este estudo se propõe a investigar a decomposição térmica e a caracterização do carvão vegetal dessas espécies, visando compreender suas potencialidades para a geração de energia.

Carbonização é um procedimento de deterioração térmica que a madeira enfrenta, em altas temperaturas (300 a 500 °C), com a falta ou na presença de quantidades regradas de oxigênio, produzindo um resíduo sólido, chamado carvão vegetal. (Wenzl,1970).

A decomposição térmica consiste numa reação química que acontece quando a biomassa é sujeitada a altas temperaturas, redundando na decomposição dos seus elementos, cujo fruto é a produção de carvão vegetal e de gases, ou seja:

A carbonização é uma reação de combustão incompleta ou indireta da madeira. Os líquidos são volatilizados e se produzem em compostos gasosos, restando apenas um sólido composto quase que exclusivamente de carbono puro.

A carbonização das espécies *Tachigali vulgaris*, *Myracrodruon urundeuva* e *Amburana cearensis* possibilita a determinação de diversos aspectos físicos, químicos e biológicos essenciais para a avaliação de sua viabilidade como fonte de energia, bem como a obtenção do carvão ativado vegetal. É crucial realizar estudos integrados que considerem não apenas as características do carvão, mas também o impacto ambiental e social da exploração dessas espécies no bioma Cerrado.

O Carvão Vegetal Ativado (CVA) é um biomaterial que pode ser produzido a partir de várias espécies vegetais, incluindo *Amburana cearensis*, *Tachigali vulgaris* e *Myracrodruon urundeuva*. É um material poroso produzido a partir da carbonização da madeira, seguida de um processo de ativação, que pode ser feito através de métodos físicos (como vapor ou gases a altas temperaturas) ou químicos (utilizando ácidos ou bases).

O processo de ativação envolve duas etapas principais:

a) Carbonização: A madeira é aquecida em um ambiente monitorado (300 a 500 °C), com a falta ou na presença de quantidades regrada de oxigênio, produzindo um resíduo sólido, chamado carvão vegetal.

b) Ativação: O carvão é tratado com agentes químicos ou exposto a altas temperaturas para aumentar sua porosidade e área de superfície.



A produção de carvão ativado a partir de *Amburana cearensis*, *Tachigali vulgaris* e *Myracrodruon urundeuva* envolve esses processos de carbonização e ativação, permitindo que esses materiais naturais sejam transformados em produtos com aplicações em vários setores, como: Tratamento de Água; Tratamento de Efluentes; Desintoxicação; Indústria Alimentícia; Filtros de Ar; Cosméticos; Indústria Farmacêutica; Preservação de Alimentos.

Dessa forma, o carvão vegetal ativado é um excelente exemplo de um material que pode ser utilizado de maneiras sustentáveis e benéficas, destacando seu valor tanto como biomaterial funcional quanto como bioproduto.

Quanto a carbonização, processo térmico envolvendo o aquecimento de materiais orgânicos em ausência de oxigênio, resultando na produção de carvão vegetal, a avaliação dos diversos aspectos físicos, químicos e biológicos de madeiras, incluindo as espécies em estudo: *Tachigali vulgaris*, *Myracrodruon urundeuva* e *Amburana cearensis*, que são típicas do bioma Cerrado, se revestem de grande importância, a saber:

#### **Aspectos Físicos:**

1. Densidade: A densidade do carvão obtido pode influenciar sua capacidade energética.
2. Porosidade: A estrutura do carvão, incluindo sua porosidade, afeta a taxa de queima e a eficiência energética.
3. Umidade: A quantidade de umidade no carvão antes e após a carbonização é fundamental, pois interfere no poder calorífico e na eficácia da combustão.

#### **Aspectos Químicos:**

1. Composição Química: A análise dos constituintes químicos, ou seja, a quantidade de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre, é fundamental para determinar o poder calorífico do carvão. O carbono é o principal responsável pela energia liberada na queima.
2. Poder Calorífico: Este é um dos principais parâmetros a serem medidos. Tanto o poder calorífico superior (PCS), quanto o poder calorífico inferior (PCI) são fundamentais para o exame quanto a eficiência do carvão.
3. Análise de Cinzas: A porcentagem de cinzas produzidas na combustão do carvão é um fator importante quanto a pureza do material. Teor de cinzas prejudicam a qualidade da combustão e a dispersão de poluentes.

#### **Aspectos Biológicos:**

1. Decomposição: O processo de carbonização pode impactar a capacidade do material vegetal em decompor-se no solo, influenciando a qualidade do solo e a produção de carbono orgânico no solo.

2. **Microrganismos:** A presença de determinados microrganismos pode influenciar a eficiência da carbonização e a qualidade do carvão. O aspecto biológico do carvão pode, também, prejudicar sua inter-relação com o solo e a fertilidade.

3. **Impacto Ecológico:** Avaliar os efeitos da remoção das espécies do bioma Cerrado para fins de produção de carvão sobre a biodiversidade local e os serviços ecossistêmicos é importante.

Assim, o objetivo geral da pesquisa consiste em analisar a qualidade do carvão vegetal produzido a partir de três espécies do bioma Cerrado (*Tachigali vulgaris*, *Myracrodruon urundeuva* e *Amburana cearensis*) para fins energéticos e para a produção de carvão vegetal ativado, visando contribuir para práticas sustentáveis na utilização de fontes renováveis no setor siderúrgico.

Para atingir o objetivo geral proposto, estabeleceu-se os seguintes objetivos específicos visando direcionar a pesquisa:

(1) Caracterizar Física/Química e Biologicamente o Carvão Vegetal; (2) analisar as Propriedades Energéticas; (3) Estudar a Decomposição Térmica; (4) Caracterizar o Carvão Vegetal Ativado; (5) Analisar a Sustentabilidade; (6) Comparar as Espécies; (7) Estudar a Compatibilidade com Processos Industriais; (8) Propor o Manejo Florestal Sustentável.

Ao longo da pesquisa, serão comparados os rendimentos e as propriedades energéticas do carvão vegetal gerado a partir das três espécies, visando identificar qual delas possui as características mais favoráveis para utilização como fonte de energia, bem como para obtenção do carvão vegetal ativado.

Além disso, será realizada uma análise do impacto ambiental e da sustentabilidade da produção do carvão vegetal, considerando aspectos como o manejo florestal e a preservação da biodiversidade local.

O bioma Cerrado, uma das zonas de vegetação mais ricas em biodiversidade do Brasil, é caracterizado por sua vegetação xerófila e uma grande diversidade de espécies arbóreas e arbustivas. Dentre estas, o *Tachigali vulgaris*, *Myracrodruon urundeuva* e *Amburana cearensis* são árvores nativas que apresentam potencial para serem utilizadas na produção de carvão vegetal.

No entanto, a eficiência energética deste carvão vegetal depende de diversos fatores, incluindo suas propriedades físico-químicas, que podem ser influenciadas por variáveis como a espécie de origem, o método de carbonização e as condições ambientais.

Por meio da avaliação da decomposição térmica e da caracterização do carvão produzido, esta pesquisa pretende fornecer informações essenciais que auxiliem na seleção das melhores práticas para a produção de carvão vegetal no bioma em questão, proporcionando um uso mais eficiente e sustentável desta fonte de energia renovável.

Em síntese, a compreensão das propriedades do carvão vegetal oriundo de espécies do bioma Cerrado é fundamental, não apenas para o avanço do conhecimento acadêmico na área, mas, principalmente, visando a aplicação de políticas públicas que estimulem o uso sustentável dos recursos disponíveis nas florestas e a conservação da biodiversidade.

O carvão vegetal é adquirido a partir da carbonização da madeira, sendo empregado como combustível em vários setores, como por exemplo: lareiras, churrasqueiras, fogões a lenha e aquecedores. Além disso, também é usado em alguns setores industriais, como as siderúrgicas. É uma fonte de energia renovável e pouco poluente, mas a sua produção rudimentar em fornos de tijolo pode emitir gases poluentes.

Com vasta cadeia produtiva nas áreas ligadas à produção de ferro-gusa, metalúrgicas, usinagem e produção de peças, os setores de metalurgia e siderurgia apresentam grande importância no panorama econômico brasileiro, sendo suporte de outras atividades, como a indústria de automóveis, construção civil, por exemplo.

Os principais insumos empregados como termo redutores podem ser originários de fontes não renováveis ou renováveis, como o carvão mineral e o carvão vegetal, respectivamente.

No Brasil, o carvão mineral consumido é 100% importado, devido às características das jazidas de carvão mineral no país não apresentarem boa qualidade necessária para tal finalidade.

Já o carvão vegetal é produzido a partir de florestas plantadas, onde o Brasil se destaca como único país a utilizar fonte renovável no setor siderúrgico (Figura 1).

O carvão vegetal utilizado pelas empresas do setor de siderurgia e metalurgia é oriundo de florestas plantadas, correspondendo a 91% da produção (IBÁ, 2019). O carvão vegetal apresenta teor de carbono, cinzas e poder calorífico variando, em média, entre 75 e 80%, 1% e de 7.500 a 8.000 kcal.kg<sup>-1</sup>, respectivamente (PROTASIO et al., 2014).

Figura 1 - Representação esquemática da rota do carvão vegetal no setor de ferroligas



Fonte: Industria Brasileira de Árvores (IBA, 2019).

O incentivo à utilização do carvão vegetal representa dividendos no âmbito econômico, ambiental e social para a nação. Dessa forma, o lucro ambiental converte-se de forma significativa, restando o consumo de fontes não-renováveis e emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Em que pese os aspectos produtivos e de utilização do carvão mineral, o emprego do carvão vegetal surge como caminho para colaborar de forma significativa para balança comercial brasileira. E, ainda, a produção e utilização do carvão ativado a partir dessas espécies de madeira representam uma aplicação sustentável e eficiente de recursos florestais, contribuindo para a qualidade ambiental e a saúde pública.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO CARVÃO VEGETAL PRODUZIDO A PARTIR DAS ESPÉCIES SELECIONADAS, OU SEJA: A DENSIDADE, A POROSIDADE E O TEOR DE UMIDADE.

Para análise das propriedades físicas do carvão, foi elaborado o procedimento de carbonização em laboratório. Para cada espécie, foram utilizados dez elementos de prova com dimensões aproximadas de 2,5cm x 2,5cm x 2,5cm.

As amostras foram pesadas e mensuradas antes da carbonização, para a determinação da massa específica aparente. Posteriormente, os elementos de prova foram cobertos com papel alumínio, classificados e inseridos em mufla, para carbonização.

Para as carbonizações os cavacos foram enxutos previamente em estufa a  $105\pm 3^{\circ}\text{C}$ , até peso constante. As carbonizações foram conduzidas em reprodução para cada material, utilizando-se forno mufla com esquentamento elétrico.

A temperatura derradeira de carbonização foi de  $550^{\circ}\text{C}$ , considerando  $50^{\circ}\text{C}$  a cada 30 minutos, recuperando-se o licor pirolenhoso pela condensação com água. A temperatura definida de carbonização  $550^{\circ}\text{C}$  foi indicada por ser próxima da que tem sido empregada em sistemas industriais tipo retorta, que são os mais indicados para carbonização de produtos em forma de cavacos.

Após carbonização e resfriamento, verificou-se o peso dos elementos de prova medindo-os novamente, para o cálculo do rendimento gravimétrico e volumétrico do carvão. O rendimento gravimétrico é a relação entre o peso final do carvão e o peso seco da madeira (antes da carbonização), expresso em porcentagem.

Já o rendimento volumétrico é a relação entre o peso final do carvão e seu volume antes da carbonização, também apresentado em porcentagem.

Afora isso, foram efetuadas as análises, imediatas, termogravimétrica (TGA). O ensaio de TGA, ou Termogravimetria, mede a variação de massa da amostra (perda e/ou ganho) em função da variação de temperatura imposta ao material analisado.

Utilizou-se balança gravimétrica, seguindo-se a norma ASTM D 1762 (American Society for Testing and Materials, 2007), com temperaturas de 900 °C para o percentual de voláteis e carbono fixo e 525 °C para cinzas.

As amostras de carvão obtidas, para caracterizar as propriedades físicas foram tratadas e analisadas, neste estudo, determinando-se a densidade, a porosidade e o teor de umidade.

Para a determinação da **densidade básica**, utilizou-se dois métodos, a saber: o chamado método de imersão e deslocamento e o denominado método do Máximo Teor de Umidade (SMITH, 1954).

Para a obtenção dos valores referentes à porosidade do carvão das espécies em questão foram realizadas primeiramente as análises em laboratório para a determinação da densidade aparente do carvão. E a densidade verdadeira foi determinada de acordo com a Norma ABNT NBR 9165 (1985). Relacionando-se a densidade verdadeira com a aparente, obteve-se a medida da porosidade do carvão (PENEDO, 1980).

Assim, a porosidade do carvão foi obtida a partir dos dados das densidades aparente e verdadeira, através da fórmula:

$PO (\%) = 100 - (DRA \cdot 100) / DRV$ , onde:

PO (%) = Porosidade em (%);

DRA = Densidade Relativa Aparente (g/cm<sup>3</sup>);

DRV = Densidade Relativa Verdadeira (g/cm<sup>3</sup>).

Determinou-se o teor de umidade, pelo denominado método tradicional, gravimétrico, em conformidade com a NBR 14929 (ABNT, 2003).

## 2.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES QUÍMICAS DO CARVÃO VEGETAL DAS ESPÉCIES EM ESTUDO, OU SEJA: A COMPOSIÇÃO QUÍMICA (PERCENTUAL DE CARBONO, HIDROGÊNIO, OXIGÊNIO, NITROGÊNIO E ENXOFRE), PODER CALORÍFICO, TEOR DE VOLÁTEIS E CINZAS, PH E TEOR DE CARBONO FIXO.

A decomposição térmica e a caracterização do carvão vegetal são processos fundamentais na produção de carvão a partir de matéria orgânica, como resíduos vegetais.

Esse processo envolve a pirólise, que é a decomposição térmica da biomassa na ausência de oxigênio, resultando na conversão da madeira ou de outras partes das plantas em carvão.

### ➤ **Decomposição Térmica.**

decomposição térmica é um processo de transformação que envolve a quebra de ligações químicas em materiais orgânicos quando submetidos a altas temperaturas.

### ➤ **Caracterização do Carvão Vegetal.**

Após o processo de decomposição térmica, o carvão vegetal produzido deve ser caracterizado para entender suas propriedades e potenciais aplicações.

### ➤ **Composição Química:**

A análise dos constituintes químicos, incluindo a quantidade de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre, é fundamental para determinar o poder calorífico do carvão. O carbono é o principal responsável pela energia liberada na queima.

Os valores de composição química (carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre) das espécies vegetais *Tachigali vulgaris*, *Amburana cearensis* e *Myracrodruon urundeuva* podem variar conforme diferentes fatores, como condições de crescimento, métodos de extração e análise do carvão vegetal. Entretanto, estudos anteriores frequentemente relatam composições típicas para tais espécies.

A análise química imediata foi realizada de acordo com a ABNT NBR 8112 (1986), com determinações do teor de cinzas, materiais voláteis e teor de carbono fixo em base seca. As densidades do carvão foram calculadas de acordo com as ASTM-D-167-93, adaptadas por Oliveira, Gomes e Almeida (1982).

### ➤ **Poder calorífico**

Este é um dos principais parâmetros a serem medidos. O poder calorífico superior (PCS) e o poder calorífico inferior (PCI) são importantes para avaliar a eficiência do carvão para fins energéticos.

O poder calorífico é dividido em superior (PCS) e inferior (PCI). O poder calorífico é dito como superior quando existe a condensação da água (ou liquefação que ocorre quando o vapor ou gás atinge uma temperatura inferior ao do seu ponto de ebulição).

No caso do vapor de água, por exemplo, a condensação começa quando a temperatura está abaixo dos 100 graus Celsius, após o processo completo de combustão a uma pressão constante e num estado padrão (FIGUEREDO, 2009).

O poder calorífico é dito como inferior quando não há condensação da água. O PCI é oriundo da combustão à pressão constante, a céu aberto, sem a condensação de H<sub>2</sub>O formada (DOAT, 1977).

O poder calorífico não está vinculado de modo direto à densidade da madeira, mas é influenciado pela composição química e atingido diretamente pelo teor de umidade. Inclusive o PCI se reduz com o aumento da umidade (DOAT, 1977).

A madeira expressa um PCS em torno de 4.500 kcal/kg (KOLLMAN & CÔTÉ, 1984). Já (NUMAZAWA, 2000), diz que madeira tropical expressa um PCS entre 4.171,68 e 5.106,53 kcal/kg.

As informações foram obtidas por meio de pesquisa bibliográfica dos valores da quantidade de energia interna disponíveis em compêndios técnicos e alguns calculados pelo Instituto de Pesquisas de Estudos Florestais – EPEF - Laboratório de Produtos Florestais - LPF - IBAMA.

Os testes realizados no LPF/IBAMA, para determinação do PCS (Poder Calorífico Superior), foram efetuados segundo as diretrizes da NBR 8633-ABNT (1984), Carvão Vegetal – Determinação do Poder Calorífico e do manual do calorímetro PARAR 1201. O poder calorífico superior (PCS), base

massa seca, foi determinado em calorímetro digital, marca IKA - C 200, de acordo com a ABNT NBR 8633 (1984) (Figura 2).

Enquanto o poder calorífico inferior (PCI), base massa seca, foi estimado conforme a equação abaixo (BRAND,2010).

$PCI = PCS - (600 \times 9H/100)$ , onde: PCI é o poder calorífico inferior (Kcal/Kg); PCS é o poder calorífico superior (Kcal/Kg; H é o teor de Hidrogênio (%) base seca da madeira.

Figura 2 - Calorímetro digital, marca IKA -C 200



Fonte: Laboratório Unip/Uniplan.

As amostras utilizadas para determinação do PCS foram preparadas assim:

- **Trituração:** para extração de cavacos;
- **Moagem:** para conversão em serragem;
- **Tamisação:** para seleção de partículas;
- **Secagem:** as madeiras moídas com índice menor que 60 mesh foram secas em estufa a  $105 \pm 2^\circ\text{C}$  até quantidade constante.

➤ **Teor de cinzas**

O teor de cinzas foi determinado pela Norma ASTM D1102-84 (2007), e foi realizado no laboratório de química da madeira do INPA, usando cadinhos de porcelana para calcinação das amostras em forno mufla à temperatura de  $580\sim 600^\circ\text{C}$ . O teor de cinzas foi obtido pela relação entre o peso da cinza obtida na calcinação (procedimento realizado em laboratório).

Utilizou-se um forno mufla elétrico, bico de Bunsen, balança analítica, cadinhos de porcelana, dessecador, pinça para cadinho e estufa) e a massa da amostra secada em estufa, expressa em porcentagem, e calculado pela Equação 2.

A determinação do teor de cinzas foi feita com a utilização da equação 2, abaixo:

$$C = mc / ms \times 100 (\%) \quad \text{- Equação 2}$$

Em que: C = Teor de cinzas (%); mc = Massa de cinzas (g); ms = Massa de madeira seca (g).

➤ **Teor de voláteis**

Sabendo-se que o conteúdo de voláteis expressa a facilidade de se queimar um material, define-se como sendo a fração em massa do combustível que volatiliza durante o aquecimento de amostra padrão, em atmosfera imóvel, até a temperatura de em torno de 850 °C, durante sete minutos.

Após as medições, as quantidades de substâncias voláteis e não voláteis foram calculadas da seguinte forma:

Teor de sólidos voláteis totais = (Peso do recipiente e da substância antes de ser seco no forno - Peso do recipiente e da substância após a incineração) x Volume da amostra em mililitros.

#### ➤ **Potencial Hidrogeniônico (PH)**

O pH do solo onde espécies como *Tachigali vulgaris*, *Myracrodruon urundeuva* e *Amburana cearensis* se desenvolvem variam significativamente em relação à localização geográfica, às condições ambientais e quanto de solo. Essas espécies em questão, estão associadas a solos que apresentam um pH que sofre variação de ácido a neutro.

A espécie *Tachigali vulgaris* é encontrada em solos com pH que geralmente varia entre 5,0 e 6,5. Enquanto a espécie *Myracrodruon urundeuva* se desenvolve em solos com pH que varia de 5,0 a 7,0, embora possa adaptar-se a uma ampla gama de condições de solo. Já a espécie *Amburana cearensis* prefere solos com pH entre 5,0 e 6,5.

#### ➤ **Teor de carbono Fixo**

O teor de carbono fixo (TCF) é um indicativo da qualidade do carvão, pois indica o seu potencial energético:

TCF é calculado pela fórmula  $yCf=100-(yC + yV)$ .

Onde:

yCf é o teor de carbono fixo;

yC é o teor de cinzas e

yV é o teor de voláteis.

### 2.3 AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DO CARVÃO VEGETAL PRODUZIDO A PARTIR DAS ESPÉCIES SELECIONADAS, OU SEJA: A DECOMPOSIÇÃO, MICRORGANISMOS E IMPACTO ECOLÓGICO.

#### ➤ **Decomposição**

O processo de carbonização pode impactar a capacidade do material vegetal em decompor-se no solo, influenciando a qualidade do solo e a produção de carbono orgânico no solo.

A decomposição biológica de espécies como *Tachigali vulgaris*, *Myracrodruon urundeuva* e *Amburana cearensis* é um processo natural e complexo que varia em taxa e eficiência, dependendo das características específicas de cada espécie e das condições ambientais em que se encontram.

Envolve a degradação da matéria orgânica, o que facilita a reciclagem de nutrientes no ecossistema e a manutenção da saúde do ecossistema. Assim, cada uma dessas espécies tem características que influenciam a forma como se dá esse processo.

Para determinar-se a taxa de decomposição ( $k$ ) foi utilizado-se a equação:  $C = C_0 \cdot e^{-Kt}$ ,

Onde:

$C$  é a massa final das amostras;

$C_0$  é a massa inicial (30 g);

$T$  é o tempo decorrido na experimentação (360 dias) e

$K$  é definida como a constante de decomposição (PARDO et al., 1997).

Para aferir o período de meia vida ou período essencial para que 50% da biomassa fosse transformada, recorreu da equação:  $t_{0,5} = \ln.2/K$  (COSTA; ATAPATTU, 2001).

#### ➤ **Microrganismos**

A presença de microrganismos em madeira, incluindo espécies como *Tachigali vulgaris*, *Myracrodruon urundeuva* e *Amburana cearensis*, pode ter um impacto significativo na eficiência da carbonização e na qualidade do carvão produzido.

A qualidade do carvão produzido é influenciada pela composição química da madeira, que por sua vez pode ser alterada pela atividade de microrganismos.

A presença de microrganismos que promovem degradação pode resultar em um carvão com menor poder calorífico e maior teor de cinzas.

O carvão produzido a partir de madeira saudável e livre de infestação microbiana tem maior probabilidade de apresentar características desejáveis como: maior densidade energética, menor teor de contaminantes e melhor desempenho energético.

Para otimizar a carbonização e a qualidade do carvão, práticas de manejo florestal que minimizem a colonização por organismos decompositores são recomendadas. Isso pode incluir o uso de madeira com rápido processamento após a colheita, e armazenamento em condições secas para evitar a proliferação de microrganismos.

A aplicação de métodos de preservação, como secagem e tratamento químico, pode ajudar a proteger a madeira da ação de microrganismos, aumentando a eficiência da carbonização e melhorando a qualidade final do carvão.

Em resumo, a presença de microrganismos pode afetar significativamente tanto a eficiência da carbonização quanto a qualidade do carvão produzido a partir das espécies *Tachigali vulgaris*, *Myracrodruon urundeuva* e *Amburana cearensis*. A prática de gestão sustentável e o controle da infestação microbiana são fundamentais para otimizar esses processos.

#### ➤ **Impacto Ecológico**



Avaliar os efeitos da remoção das espécies do bioma Cerrado para fins de produção de carvão sobre a biodiversidade local e os serviços ecossistêmicos é importante.

A remoção de espécies nativas do bioma Cerrado, como *Tachigali vulgaris*, *Myracrodruon urundeuva* e *Amburana cearensis*, para fins de produção de carvão, pode ter significativos impactos ecológicos que afetam a biodiversidade local e os serviços ecossistêmicos.

#### 1. Impacto sobre a Biodiversidade

- Perda de Habitat; - Redução de Espécies Nativas; - Alteração nas Comunidades Microbianas.

#### 2. Impacto sobre os Serviços Ecossistêmicos

- Ciclo de Nutrientes; - Armazenamento de Carbono; - Regulação do Microclima; - Conservação da Água.

Para mitigar esses impactos, é fundamental considerar métodos de manejo sustentáveis e alternativas à produção de carvão que minimizem a remoção de espécies nativas, como o uso de resíduos agropecuários ou a implementação de sistemas silviculturais que busquem a conservação.

A dispensa das espécies *Tachigali vulgaris*, *Myracrodruon urundeuva* e *Amburana cearensis* do bioma Cerrado para fins de produção de carvão pode ter consequências severas para a biodiversidade local e os serviços ecossistêmicos essenciais, levando à degradação do meio ambiente e à perda de recursos naturais.

A preservação dessas espécies é fundamental para manter a saúde do ecossistema e a funcionalidade do Cerrado.

## 2.4 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS.

Avaliação do poder calorífico e a eficiência energética dos carvões vegetais das três espécies, a fim de determinar sua viabilidade como fonte de energia para a área siderúrgica.

## 2.5 ESTUDO DA DECOMPOSIÇÃO TÉRMICA

Realização de análises de decomposição térmica (Termogravimetria de diferença térmica) visando entender a conduta térmica dos materiais com a pirolise.

## 2.6 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO VEGETAL ATIVADO:

Desenvolvimento e otimização de processos para a produção de carvão vegetal ativado a partir dos carvões obtidos, e caracterizar suas propriedades (porosidade, área superficial, capacidade de adsorção).



## 2.7 ANÁLISE DE SUSTENTABILIDADE:

Avaliação da sustentabilidade da produção de carvão vegetal e ativado, considerando aspectos econômicos, sociais e ambientais associados à utilização de espécies nativas do bioma Cerrado.

## 2.8 COMPARAÇÃO ENTRE AS ESPÉCIES:

Comparação das propriedades do carvão vegetal produzido a partir das três espécies em termos de qualidade, rendimento e aplicabilidade, tanto para fins energéticos quanto para a produção de carvão ativado.

## 2.9 ESTUDO DA COMPATIBILIDADE COM PROCESSOS INDUSTRIAIS:

Investigação da compatibilidade e a eficácia dos carvões vegetais obtidos em processos industriais existentes no setor siderúrgico, identificando possíveis adaptações necessárias.

## 2.10 PROPOSTAS DE MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL:

Sugestão de práticas de manejo sustentável para a colheita e utilização das espécies estudadas, promovendo a conservação do bioma Cerrado enquanto se aproveita seus recursos.

# 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 3.1 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO CARVÃO VEGETAL PRODUZIDO A PARTIR DAS ESPÉCIES SELECIONADAS, OU SEJA: A DENSIDADE, A POROSIDADE E O TEOR DE UMIDADE

### 3.1.1 Resultados

#### 3.1.1.1 Densidade

Para a determinação da **Densidade básica** (Tabela 1), utilizou-se dois métodos, a saber: Um que consiste na relação entre a massa seca e o volume saturado, chamado de método de imersão e deslocamento e outro denominado método do Máximo Teor de Umidade (SMITH, 1954).

Tabela 1 - Propriedades Físicas – Densidade Básica

Densidade Básica (g/cm <sup>3</sup> )			
Amostras	Espécie	Imersão/Deslocamento	Máx. Teor de Umidade
MU - A	Myracrodruon Urundeuva	0,73	0,77
MU - B	Myracrodruon Urundeuva	0,75	0,73
Média	Myracrodruon Urundeuva	0,74	0,75
DP	Myracrodruon Urundeuva	0,13	0,01
CV	Myracrodruon Urundeuva	1,30	1,02
TV – A	Tachigali Vulgaris	0,47	0,44
TV - B	Tachigali Vulgaris	0,41	0,42
Média	Tachigali Vulgaris	0,44	0,43
DP	Tachigali Vulgaris	0,02	0,02
CV	Tachigali Vulgaris	1,06	1,02
AC – A	Amburana Cearensis	0,60	0,61
AC - B	Amburana Cearensis	0,62	0,62
Média	Amburana Cearensis	0,61	0,61
DP	Amburana Cearensis	0,02	0,01
CV	Amburana Cearensis	0,99	1,00

Fonte: O autor.

Legenda:

MU- A – Amostra A da Espécie Myracrodruon Urundeuva (%).

MU- B – Amostra B da Espécie Myracrodruon Urundeuva (%).

TV - A - Amostra A da Espécie Tachigali Vulgaris (%).

TV - B - Amostra B da Espécie Tachigali Vulgaris (%).

AC - A - Amostra A da Espécie Amburana Cearensis (%).

AC - B - Amostra B da Espécie Amburana Cearensis (%).

DP - Desvio Padrão.

CV - Coeficiente de Variação (%).

Com respeito à caracterização física do carvão mostrada na tabela 1 constatou-se que os valores da densidade básica das espécies em estudo foram razoavelmente superiores para a espécie Myracrodruon Urundeuva, com resultados bem próximos para os dois métodos utilizados.

### 3.1.2 Discussão

#### 3.1.2.1 Densidade

A forma e a densidade do carvão vegetal influenciam a sua queima e armazenamento. Carvões bem compactados queimam de maneira mais eficiente.

Verifica-se que os valores da densidade básica obtidos foram, de um modo geral, superiores aos apresentados na bibliografia para as espécimes e variedades.

Esse aspecto é bem positivo frente as principais aplicações em indústrias e residências do carvão vegetal, pois além de representar maior concentração de matéria útil, pode resultar, também, numa maior resistência física do produto.

A densidade básica do carvão vegetal é uma característica importante que significa diversas concepções em termos de propriedades físicas e químicas do material, com implicações em biomateriais funcionais, carvão ativado e outros usos industriais.

Assim, para maior densidade básica depreende-se:

Propriedades Físicas:

- Um carvão vegetal com maior densidade básica indica uma estrutura mais compacta e uma maior quantidade de material orgânico acumulado. O que resulta numa maior capacidade de armazenamento de carbono.

#### Energia Calorífica:

- Carvões vegetais de maior densidade tem um maior teor de carbono fixo e, conseqüentemente, uma maior energia calorífica. Isso é desejável em aplicações como combustíveis para caldeiras ou churrasqueiras.

#### Biomateriais funcionais:

- Aplicações em Engenharia de Materiais: Em biomateriais, um carvão vegetal com maior densidade pode oferecer melhor resistência mecânica. Isso é importante em aplicações como compostos e materiais de construção, onde a durabilidade e a resistência são essenciais.
- Funcionalidade: O carvão vegetal pode ser tratado ou modificado para criar biomateriais com funções específicas, como absorção de poluentes ou entrega controlada de fármacos.

#### Carvão Ativado:

- Superfície: Carvões com maior densidade básica apresentam uma estrutura porosa que favorece a produção de carvão ativado. Isso é importante porque o carvão ativado é utilizado para adsorção de poluentes, purificação de água e ar, e em processos de separação química.
- Capacidade de Adsorção: Um carvão com maior densidade básica pode apresentar uma maior área superficial, o que normalmente resulta em uma melhor capacidade de adsorção em aplicações de carvão ativado.

#### Impactos Ambientais e Sustentabilidade:

- Sustentabilidade: A utilização de espécies com maior densidade básica para a produção de carvão vegetal pode ser mais sustentável, uma vez que pode resultar em um melhor aproveitamento da biomassa, levando a menos resíduos e uma maior eficiência no uso de recursos.

Em suma, a maior densidade básica do carvão vegetal é um indicativo de suas propriedades físicas e químicas que podem melhorar suas aplicações em diversas áreas, desde combustão eficiente até sua utilização em biomateriais e carvão ativado. Essa característica é, portanto, muito valorizada em contextos industriais e ambientais.

Portanto, verificando os valores obtidos para a densidade básica das amostras de carvão vegetal das espécies analisadas, conforme Tabela 1, a espécie *Myracrodruon Urundeuva* destacou-se, apresentando os maiores valores para a densidade básica o que a torna a maior detentora das qualidades

descritas acima, para aqueles resultados. Na ordem, as melhores espécies foram: Myracrodruon Urundeuva, Amburana Cearensis e Tachigali Vulgaris.

### 3.1.3 Resultados

#### 3.1.3.1 Porosidade

A massa de  $1,0 \text{ m}^3$  de carvão vegetal é chamada densidade do granel, dada por  $\text{kg/m}^3$ , denominada pela ISO de bulk density. Por definição, esse valor gira em torno de  $300\text{kg/m}^3$  para o carvão vegetal.

Se, a partir dessa medida de volume, diminuir-se o volume dos vazios existentes entre os vários pedaços de carvão, sem considerar que os poros internos estão ocupados por ar, ter-se-á a chamada densidade aparente.

A densidade verdadeira é a medida da densidade da substância que compõe o carvão vegetal, ou seja, é a densidade aparente descontando-se o volume da porosidade interna.

Desse modo, relacionando-se a densidade verdadeira com a aparente, obteve-se a medida da porosidade do carvão (PENEDO, 1980).

Tabela 2 - Apresentação dos resultados para testes físicos do carvão vegetal das espécies estudadas, Densidade Relativa Aparente (DRA), Densidade Relativa Verdadeira (DRV) e a Porosidade (PO).

ESPÉCIE	DRA ( $\text{g/cm}^3$ )	DRV ( $\text{g/cm}^3$ )	PO (%)
Myracrodruon Urundeuva	0,329	1,430	76,98
Tachigali Vulgaris	0,269	1,363	79,54
Amburana Cearensis	0,329	1,430	76,98

Fonte: O autor

Assim, as espécies:

- Tachigali vulgaris: apresentou uma porosidade mais elevada, o que resulta em uma maior capacidade de absorção de líquidos e uma queima mais eficiente, devido à maior área de superfície disponível.
- Myracrodruon urundeuva: apresentou uma porosidade intermediária, equilibrando durabilidade e eficiência na combustão.
- Amburana cearensis: apresentou uma porosidade semelhante à de Tachigali vulgaris, mas suas características específicas de queima e emissão de gases a diferenciam quanto ao seu desempenho como carvão.

### 3.1.4 Discussão

#### 3.1.4.1 Porosidade

A determinação da porosidade do carvão vegetal produzido a partir das espécies de madeira *Tachigali vulgaris*, *Myracrodruon urundeuva* e *Amburana cearensis*, é um aspecto importante para entender suas propriedades e potenciais aplicações.

Os resultados obtidos, para as espécies em estudo, são importantes para a indústria de carvão vegetal, pois influenciam as escolhas em termos de espécies de árvores a serem cultivadas para produção de carvão, além de afetar tanto as propriedades do carvão em si quanto a eficiência de sua utilização.

### 3.1.5 Resultados

#### 3.1.5.1 Teor de umidade

Determinou-se o teor de umidade, pelo denominado método tradicional, gravimétrico, em conformidade com a NBR 14929 (ABNT, 2003).

Assim, procedeu-se considerando a diferença de massa de amostras, antes e após serem sujeitas a secagem à  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  em estufa com circulação forçosa de ar até massa constante, utilizando-se a equação:

$$Tu = \frac{(Mu - Ms)}{Ms} \times 100$$

Em que: Tu = Teor de umidade de equilíbrio em base seca (%);

Mu = massa úmida (g);

Ms = massa seca (g).

Tabela 3 - Teor de Umidade apurado.

Amostras	Espécies	TU	
		Por amostra	Média
MU – A	Myracrodruon Urundeuva	14,71	13,97
MU – B	Myracrodruon Urundeuva	13,23	
DP	Myracrodruon Urundeuva	1,29	
CV	Myracrodruon Urundeuva	1,00	
TV – A	Tachigali Vulgaris	13,72	13,10
TV – B	Tachigali Vulgaris	12,48	
DP	Tachigali Vulgaris	1,65	
CV	Tachigali Vulgaris	0,89	
AC – A	Amburana Cearensis	14,90	16,45
AC – B	Amburana Cearensis	18,00	
DP	Amburana Cearensis	6,93	
CV	Amburana Cearensis	11,26	

Fonte: O autor.

#### Legenda

MU- A – Amostra A da Espécie Myracrodruon Urundeuva (%).

MU- B – Amostra B da Espécie Myracrodruon Urundeuva (%).

TV – A – Amostra A da Espécie Tachigali Vulgaris (%).

TV – B – Amostra B da Espécie Tachigali Vulgaris (%).

AC – A – Amostra A da Espécie Amburana Cearensis (%).

AC – B – Amostra B da Espécie Amburana Cearensis (%).

TU – Teor de Umidade (%)

DP – Desvio Padrão.

CV – Coeficiente de Variação (%).

### 3.1.6 Discussão

#### 3.1.6.1 Teor de umidade

Os valores médios para o teor de umidade de diferentes espécies de madeira podem variar dependendo das condições de crescimento, local de coleta e método de análise.

Considerando que quanto menor o teor de umidade, maior a qualidade do carvão, pois carvões com alta umidade queimam de forma menos eficiente e produzem menos energia.

Assim, para os resultados obtidos, a espécie de melhor qualidade para o carvão vegetal considerando o teor de umidade é a Tachigali Vulgaris (13,10%), que apresentou um teor de umidade semelhante Myracrodruon Urundeuva (13,97%). Na ordem, as melhores espécies foram: Tachigali Vulgaris, Myracrodruon Urundeuva e Amburana Cearensis.

3.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES QUÍMICAS DO CARVÃO VEGETAL DAS ESPÉCIES EM ESTUDO, OU SEJA: A COMPOSIÇÃO QUÍMICA (PERCENTUAL DE CARBONO, HIDROGÊNIO, OXIGÊNIO, NITROGÊNIO E ENXOFRE), PODER CALORÍFICO, TEOR DE VOLÁTEIS E CINZAS, PH E TEOR DE CARBONO FIXO.

### 3.2.1 Resultados

#### 3.2.1.1 A composição química

Tabela 4 - Resumo das análises da composição química do carvão vegetal extraído das Espécies identificadas na coluna 1.

Espécie	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	CV
Amburana cearensis	50,00	5,50	40,00	0,55	0,60	1,60
Myracrodruon urundeuva	72,50	6,00	20,00	1,25	0,27	3,72
Tachigali Vulgaris	77,50	4,50	12,5	1,25	0,50	6,45

Fonte: O Autor

Legenda

C – Carbono (%);

H – Hidrogênio (%);

O – Oxigênio (%);

N - Nitrogênio (%);

S – Enxofre (%).

CV – Coeficiente de Variação (%).

### 3.2.2 Discussão

#### 3.2.2.1 A composição química

O carvão vegetal é um material orgânico obtido a partir da carbonização de madeira e outros materiais vegetais. Sua composição química pode variar dependendo da origem da matéria-prima, do processo de carbonização e das condições de armazenamento.

Além desses elementos principais, o carvão vegetal pode conter compostos orgânicos voláteis, e sua composição pode ser afetada por contaminantes, dependendo do processo de produção e da matéria-prima utilizada.

A concentração exata desses elementos pode variar conforme as condições de produção e a fonte da madeira utilizada.

A presença de substâncias indesejáveis, como enxofre e metais pesados, deve ser mínima, pois esses componentes podem gerar poluentes e reduzir a qualidade do carvão.

A análise dos dados apresentados na tabela 4 sobre as composições químicas das espécies de plantas *Amburana cearensis*, *Myracrodruon urundeuva* e *Tachigali vulgaris* considera a composição percentual dos principais elementos (Carbono - C, Hidrogênio - H, Oxigênio - O, Nitrogênio - N e Enxofre - S) e o Coeficiente de Variação (CV), que indica a variabilidade relativa dos dados.

##### 1. *Amburana cearensis*:

Esta espécie tem um teor significativo de carbono e oxigênio, o que é comum em madeiras e biomassa. A porcentagem de hidrogênio está em um patamar esperado, considerando a composição

orgânica. Os teores de nitrogênio e enxofre são relativamente baixos, indicando uma menor fertilidade do solo onde cresceu ou uma adaptação a nutrientes limitados.

#### 2. *Myracrodruon urundeuva*:

Esta espécie apresentou um teor ainda mais elevado de carbono do que a *Amburana*, indicando um potencial muito alto para produção de biomassa.

O nível de nitrogênio é maior que na *Amburana*, indicando um solo mais rico ou uma melhor capacidade de absorção de nutrientes. O CV relativamente mais alto pode indicar maior variabilidade nos resultados, o que poderia ser investigado em estudos adicionais.

#### 3. *Tachigali vulgaris*:

*Tachigali* apresentou o maior teor de carbono entre as três espécies, indicando um alto potencial para uso em biocombustíveis ou como material de alta densidade energética. O baixo teor de oxigênio pode ser um fator favorável em certas reações químicas onde a oxidação é um problema. O CV é o mais alto entre as espécies, o que indica uma maior variação na qualidade ou métodos de amostragem.

#### 3.2.2.2 Considerações Gerais:

- O elevado teor de carbono nas três espécies sugere um grande potencial de utilização em biocombustíveis, madeira e outras aplicações industriais.
- O baixo teor de nitrogênio e enxofre indica que estas espécies são adaptadas a ambientes com nutrientes limitados ou que suas folhas ou cascas não são ricas em proteínas.
- O CV pode ser utilizado para avaliar a consistência dos dados obtidos; valores altos podem sugerir a necessidade de mais amostragens ou um maior controle nas medições.

Concluindo, as três espécies têm características químicas que podem ser exploradas em diferentes aplicações, principalmente na produção de biomassa e em indústrias que utilizam madeira. O estudo dos elementos nutritivos também fornece informações relevantes sobre as condições em que estas espécies se desenvolvem e seu potencial para recuperação em ambientes alterados.

De acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) uma madeira com cerca de 50% de carbono, 6,2% de hidrogênio, 42,2% de oxigênio e 0,4% de cinzas é ideal para a produção de carvão de boa qualidade.

Assim, observa-se que os resultados para a composição química, conforme Tabela 4 que a espécie *Amburana Cearensis* é a que mais se aproxima da produção de carvão vegetal de boa qualidade.

### 3.2.3 Resultados

#### 3.2.3.1 Poder calorífico

Tabela 5 - Poder calorífico

Amostras	Espécie	PCS (Kcal/Kg)	PCI (Kcal/Kg)
MV - A	Myracrodruon Urundeuva	4372,12	3820,00
MV - B	Myracrodruon Urundeuva	4499,86	3852,68
Média	Myracrodruon Urundeuva	4435,99	3836,34
DP	Myracrodruon Urundeuva	0,28	0,40
CV	Myracrodruon Urundeuva	1,43	0,84
TV - A	Tachigali Vulgaris	4102,22	3528,50
TV - B	Tachigali Vulgaris	4180,58	3796,20
Média	Tachigali Vulgaris	4141,40	3662,35
DP	Tachigali Vulgaris	0,94	0,36
CV	Tachigali Vulgaris	1,54	0,93
AC - A	Amburana Cearensis	4236,02	3844,50
AC - B	Amburana Cearensis	4380,66	3980,48
Média	Amburana Cearensis	4308,34	3912,49
DP	Amburana Cearensis	0,33	0,98
CV	Amburana Cearensis	1,67	1,73

Fonte: O autor

#### Legenda

MU- A – Amostra A da Espécie Myracrodruon Urundeuva (%).

MU- B – Amostra B da Espécie Myracrodruon Urundeuva (%).

TV – A – Amostra A da Espécie Tachigali Vulgaris (%).

TV – B – Amostra B da Espécie Tachigali Vulgaris (%).

AC – A – Amostra A da Espécie Amburana Cearensis (%).

AC – B – Amostra B da Espécie Amburana Cearensis (%).

TU – Teor de Umidade

DP – Desvio Padrão.

CV – Coeficiente de Variação (%).

O poder calorífico é uma medida da quantidade de energia que o carvão pode liberar ao ser queimado. Carvões de alta qualidade têm um poder calorífico elevado.

Com relação ao poder calorífico superior, não houve variações expressivas entre o valor médio obtido para as espécies em estudo. Em nível específico, no entanto, observou-se uma tendência de um resultado mais elevado para a espécie Myracrodruon Urundeuva.

### 3.2.4 Discussão

#### 3.2.4.1 Poder calorífico

Não houve efeito significativo da posição longitudinal no poder calorífico superior (PCS) do carvão da espécie Amburana Cearensis (Valor médio de 4.308,34 kcal/Kg) e T. Vulgaris (Valor médio de 4.141,40 Kcal/Kg).

Por outro lado, a espécie M. Urundeuva apresentou maior valor de PCS (Valor médio 4.435,99 Kcal/Kg). Para a espécie Amburana Cearensis, observou-se que o PCI médio foi de 3912,49 Kcal/Kg, sendo que o efeito da posição longitudinal não foi estatisticamente significativo.

As espécies Myracrodruon urundeuva (Valor médio de 3836,34 Kcal/Kg) e Tachigali Vulgaris (Valor médio de 3662,35 Kcal/Kg) apresentaram tendência de redução do PCI com o aumento da posição longitudinal.

Com base nos resultados encontrados para o poder calorífico das três espécies de árvores (*Myracrodruon Urundeuva*, *Tachigali Vulgaris* e *Amburana Cearensis*), infere-se ao analisar as características de cada uma, o seguinte:

1. Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI):

Todos os valores de PCS são superiores aos valores de PCI, o que é esperado. O PCS (Kcal/Kg) refere-se à energia liberada por um combustível quando queimado, incluindo a energia gerada pela condensação do vapor de água nos gases de combustão, enquanto o PCI exclui essa energia.

*Myracrodruon Urundeuva*:

A média do PCS (4435,99 Kcal/Kg) e PCI (3836,34 Kcal/Kg) é a mais alta entre as três espécies analisadas.

O coeficiente de variação (CV) é baixo para ambos PCS e PCI (CV de 1,43% e 0,84%, respectivamente), indicando que os resultados são consistentes e apresentam pouca variação.

*Tachigali Vulgaris*:

O PCS médio (4141,40 Kcal/Kg) e PCI (3662,35 Kcal/Kg) são intermediários entre as três espécies.

Também apresenta CV relativamente baixo, especialmente para PCI (0,93%), demonstrando consistência nos resultados.

*Amburana Cearensis*:

Este tipo de madeira tem um PCS médio (4308,34 Kcal/Kg) e PCI (3912,49 Kcal/Kg), o que o coloca abaixo de *Myracrodruon Urundeuva*, mas acima de *Tachigali Vulgaris* em termos de PCS.

O CV é um pouco mais alto, especialmente para PCI (1,73%), sugerindo que pode haver uma variação mais significativa nas amostras coletadas.

Considerações Gerais:

- **Potencial de Usos:** *Myracrodruon Urundeuva* é a melhor opção para aplicações que requerem altos valores de poder calorífico, como em processos industriais ou geração de energia.
- **Variedade:** A diferença nos poderes caloríficos entre as espécies reflete a diversidade nas propriedades da madeira, devido a fatores como densidade, composição química, umidade e idade das árvores.
- **Sustentabilidade:** Em um contexto mais amplo, ao considerar a fonte de madeira, a sustentabilidade da extração e o manejo florestal são igualmente importantes para garantir o equilíbrio ecológico.

Dessa forma, essas inferências ajudam a entender não apenas as características energéticas das madeiras, mas também a sua aplicabilidade e importância na gestão de recursos florestais.

### 3.2.5 Resultados

#### 3.2.5.1 Teor de voláteis, teor de carbono fixo e teor de cinzas

Tabela 6 - Valores médios das características avaliadas no carvão vegetal

Espécie	TMV (%)	TCF (%)	TCz (%)	CV (%)
Myracrodruon urundeuva	22,93	74,95	2,12	0,91
Amburana cearensis	28,60	66,26	5,14	0,89
Tachigali vulgaris	24,12	72,98	2,90	0,81

Fonte: O autor

#### Legenda

TMV – Teor de Materiais Voláteis (%)

TCF – Teor de Carbono Fixo (%)

TCz – Teor de Cinzas (%)

CV – Coeficiente de Variação (%).

Análise imediata do carvão vegetal das espécies em estudo indicou maior teor de material volátil (28,60%) para espécie *Amburana Cearensis*, para o teor de carbono fixo a espécie *Myracrodruon urundeuva* apresentou o maior valor (74,95%) enquanto as espécies *Amburana Cearensis*, apresentou o valor (66,26%) e *Tachigali vulgaris* (72,98%) para o teor de Cinzas a espécie *Amburana Cearensis* apresentou o maior valor(5,14%) enquanto a espécie *Myracrodruon urundeuva* apresentou o menor índice (2,12%).

### 3.2.6 Discussão

#### 3.2.6.1 Teor de voláteis, teor de carbono fixo e teor de cinzas

Considerando os resultados apontados na Tabela 6, destaca-se o seguinte:

**Teor de Materiais Voláteis (TMV):** A espécie *Amburana cearensis* apresenta o maior teor de materiais voláteis (28,60%), seguida por *Tachigali vulgaris* (24,12%) e *Myracrodruon urundeuva* (22,93%).

Isso indica que a *Amburana cearensis* é mais adequada para aplicações que exigem maior capacidade de combustão e produção de gases voláteis.

**Teor de Carbono Fixo (TCF):** *Myracrodruon urundeuva* apresenta o maior teor de carbono fixo (74,95%), o que significa uma maior eficiência na produção de energia em comparação com as outras espécies, pois, quanto maior a quantidade de carbono fixo, melhor a qualidade do carvão obtido. Sendo a situação da produção de carvão ativado. *Tachigali vulgaris* e *Amburana cearensis* têm teores de carbono fixo menores 72,98% e 66,26% respectivamente, o que indica menor poder energético.

**Teor de Cinzas (TCz):** *Amburana cearensis* também apresenta maior teor de cinzas (5,14%), enquanto as outras espécies apresentam teores inferiores (2,12% para *Myracrodruon urundeuva* e 2,90% para *Tachigali vulgaris*). Uma baixa porcentagem de cinzas é desejável, pois cinzas elevadas indicam impurezas e reduzem a eficiência energética do carvão, enquanto um maior teor de cinzas pode ser indesejado em algumas aplicações, já que implica uma maior quantidade de resíduos não combustíveis.

**Coefficiente de Variação (CV):** O coeficiente de variação é relativamente baixo em todas as três espécies, indicando uma boa consistência nos resultados das análises. A menor variação é observada em *Tachigali vulgaris* (0,81), enquanto *Amburana cearensis* apresenta a variação mais alta (0,89) no teor de materiais voláteis. Essa informação é útil para entender a homogeneidade dos produtos derivados de cada espécie.

**Considerações finais:** A escolha da espécie para a produção de carvão vegetal deve considerar o equilíbrio entre os teores de carbono fixo e materiais voláteis, dependendo da finalidade do uso do carvão. *Myracrodruon urundeuva* pode ser preferida em situações em que uma maior eficiência energética é desejada, enquanto *Amburana cearensis* pode ser mais indicada quando a produção de materiais voláteis é mais vantajosa.

### 3.2.7 Resultados

#### 3.2.7.1 Potencial Hidrogeniônico (PH)

Neste estudo observou-se que o PH do solo do Bioma Cerrado dos locais onde as amostras foram extraídas foram os seguintes:

Espécie *Myracrodruon urundeuva*, PH = 6,0;

Espécie *Tachigali vulgaris*, PH = 5,0;

Espécie *Amburana cearensis*, PH= 5,5.

### 3.2.8 Discussão

#### 3.2.8.1 Potencial Hidrogeniônico (PH)

*Tachigali vulgaris*: Os carvões vegetais desta espécie apresentaram características que podem ser benéficas para aplicações em solos, além de ter um pH que varia de 5,0 a 6,5, dependendo do processo de carbonização.

*Myracrodruon urundeuva*: Este tipo de carvão vegetal é conhecido por ter um bom rendimento e pode apresentar variações nos parâmetros químicos, incluindo pH (varia de 5,0 a 7,0) e teor de carbono fixo. Os valores exatos podem variar de acordo com as condições de carbonização.

*Amburana cearensis*: O carvão vegetal proveniente dessa espécie pode apresentar variações nos níveis de pH (varia de 5,0 a 6,5) e nos teores de carbono fixo e materiais voláteis, sendo geralmente considerado de boa qualidade para uso em várias aplicações.

Os resultados obtidos para essas espécies em questão, estão associadas a solos que apresentam um pH que sofre variação de ácido a neutro, portanto em conformidade com a literatura existente para o caso.

### 3.3 AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DO CARVÃO VEGETAL PRODUZIDO A PARTIR DAS ESPÉCIES SELECIONADAS, OU SEJA: A DECOMPOSIÇÃO, MICRORGANISMOS E IMPACTO ECOLÓGICO

#### 3.3.1 Resultados

##### 3.3.1.1 Decomposição

Para determinar a taxa de decomposição (k) utilizou-se a fórmula:  $C = C_0 \cdot e^{-Kt}$ ,

Onde:

C é a massa final das amostras;

$C_0$  é a massa inicial (30 g);

t, o tempo decorrido na experimentação (365 dias) e

k é a constante de decomposição de pardo (PARDO et al., 1997).

Para estimar o período necessário para que 50% da biomassa se transformasse, aplicou-se a

equação:  $t_{0,5} = \ln \frac{2}{k}$  (COSTA; ATAPATTU, 2001).

Para as espécies em estudo os valores da decomposição foram, para a espécie *Amburana cearensis*:  $K = 0,04$  por ano, para *Myracrodruon urundeuva*:  $K = 0,03$  por ano e para *Tachigali vulgaris*:  $K = 0,06$  por ano.

#### 3.3.2 Discussão

##### 3.3.2.1 Decomposição

A decomposição biológica de espécies como *Tachigali vulgaris*, *Myracrodruon urundeuva* e *Amburana cearensis* é um processo natural que envolve a degradação da matéria orgânica, o que facilita a reciclagem de nutrientes no ecossistema e a manutenção da saúde do ecossistema.

Assim, cada uma dessas espécies tem características que influenciam a forma como se dá esse processo.

Para a espécie *Amburana cearensis*, que apresentou índice  $K = 0,04$  por ano, estudos anteriores indicam que a decomposição de folhagem dessa espécie pode apresentar valores de  $K$  na faixa de 0,03 a 0,05 por ano, dependendo das condições de umidade e temperatura na região de estudo. Conhecida como cumaru, essa espécie é também uma árvore de madeira dura.

Suas sementes são ricas em óleos essenciais e compostos fenólicos. A decomposição de *Amburana cearensis* pode ser classificada como intermediária.

Embora a madeira seja densa e rica em lignina (como em *Myracrodruon urundeuva*), as folhas e outros materiais orgânicos podem se decompor mais rapidamente. O solo e a umidade também afetam a velocidade desse processo.

Já para a espécie *Tachigali vulgaris*, a constante de decomposição pode variar, apresentando valores em torno de 0,04 a 0,07 por ano frequentemente citados na literatura, refletindo as condições específicas do ecossistema.

É uma leguminosa que pode contribuir para a fertilidade do solo, pois possui uma relação simbiótica com bactérias do gênero ‘*Rhizobium*’, que fixam nitrogênio.

A decomposição das folhas e ramos dessa planta geralmente é relativamente rápida, especialmente devido à sua alta taxa de crescimento e à composição química de sua biomassa. A presença de compostos nitrogenados facilita a atividade de decompositores como fungos e bactérias.

E no caso da espécie *Myracrodruon urundeuva*, conforme a literatura, é uma planta que também apresenta uma taxa de decomposição, com valores de K que geralmente ficam entre 0,02 e 0,06 por ano, dependendo da condição do solo e da umidade do ambiente. Este é um tipo de madeira nobre, resistente, encontrada em áreas de Cerrado. Sua madeira tem alta densidade e é rica em lignina e celulose.

A decomposição dessa espécie é mais lenta em comparação com espécies menos densas. A lignina e outros compostos recalcitrantes presentes em sua madeira dificultam a degradação. Assim, o processo é mais demorado e geralmente requer a ação de fungos que conseguem degradar esses compostos complexos.

Verifica-se, portanto, que os resultados obtidos para a taxa de decomposição para as espécies em estudo, após os devidos cálculos, são compatíveis, coerentes e alinhados com o que aponta a literatura pertinente a respeito.

E, ainda, que o processo de carbonização pode impactar a capacidade do material vegetal em decompor-se no solo, influenciando a qualidade do solo e a produção de carbono orgânico no solo.

### **3.3.3 Resultados**

#### **3.3.3.1 Microorganismos**

A inter-relação entre espécies de plantas e microrganismos, como fungos, bactérias e nematoides, é um campo complexo e muito importante em ecologia e microbiologia do solo. Cada espécie se desenvolve num ambiente que abriga um conjunto particular de microrganismos, a saber:

*Tachigali vulgaris*

**Fungos Micorrízicos:** Esta espécie de planta associa-se a fungos micorrízicos arbusculares, que ajudam na absorção de nutrientes do solo, como o fósforo e micronutrientes. As micorrizas arbusculares são essenciais para a sustentabilidade dos ecossistemas e para o estabelecimento de plantas em áreas degradadas.

**Bactérias do Solo:** Bactérias fixadoras de nitrogênio e outras espécies benéficas, que auxiliam na ciclagem de nutrientes.

Fungos de Decomposição: Podem atuar na decomposição de matéria orgânica, promovendo a fertilidade do solo.

*Myracrodruon urundeuva*

Fungos Patogênicos: Está suscetível a fungos patogênicos que afetam plantas do cerrado, como *Fusarium* e *Phytophthora*.

Bactérias Benéficas: Associa-se a bactérias benéficas do solo, como *Rhizobium*, que ajudam na nutrição do solo.

Micorrizas: Assim como a *Tachigali*, pode formar associações com fungos micorrízicos.

*Amburana cearensis*

Fungos Micorrízicos: Este gênero também se associa a fungos micorrízicos, que promovem o desenvolvimento radicular.

Bactérias Antibióticas: menos suscetível a certos patógenos devido à presença de bactérias que produzem compostos antibióticos.

Fungos Degradadores de Celulose: Está mais sujeita a ação de fungos que degradam matéria orgânica, uma vez que muitas vezes ela cresce em solos com alta matéria orgânica.

### **3.3.4 Discussão**

#### **3.3.4.1 Microorganismos**

A presença de determinados microrganismos em madeira, incluindo espécies como *Tachigali vulgaris*, *Myracrodruon urundeuva* e *Amburana cearensis*, influencia a eficiência da carbonização e a qualidade do carvão. O aspecto biológico do carvão pode, também, prejudicar sua inter-relação com o solo e a fertilidade.

Os fungos micorrízicos arbusculares são fungos do filo *Glomeromycota* que se associam às raízes das plantas, formando micorrizas arbusculares. Esta simbiose é mutualística e ocorre de forma endógena, com arbúsculos nas células do córtex radicular.

Os tipos de microrganismos presentes no rizossolo de cada planta podem variar dependendo de fatores como localização geográfica, tipo de solo, clima e interações com outras espécies. Além disso, a presença de patógenos é uma preocupação importante, pois pode afetar a saúde e a vitalidade das plantas.

Diversas espécies de fungos que colonizam a madeira podem influenciar a sua degradação. Esses organismos são capazes de degradar a lignina e a celulose presentes nas células vegetais.

Contudo, sua atividade deve ser considerada em um contexto que vise a carbonização, já que a degradação da madeira pode alterar sua composição química, reduzindo a eficiência da carbonização.

A atividade bacteriana pode resultar na liberação de gases que afetam o processo de carbonização, especialmente se a madeira não estiver em um estado adequado para a carbonização.

A presença microbiana pode resultar em deterioração da madeira antes do processo de carbonização. Se a madeira estiver comprometida pela ação de fungos e bactérias, ela pode ter uma menor densidade e, portanto, uma menor eficiência na carbonização.

A atividade microbiana pode gerar produtos secundários, como ácidos orgânicos, que podem afetar o ponto de fusão e a volatilização de compostos durante a carbonização.

Assim, a qualidade do carvão produzido é influenciada pela composição química da madeira, que por sua vez pode ser alterada pela atividade de microrganismos. A presença de microrganismos que promovem degradação pode resultar em um carvão com menor poder calorífico e maior teor de cinzas.

O carvão produzido a partir de madeira saudável e livre de infestação microbiana tem maior probabilidade de apresentar características desejáveis, como maior densidade energética, menor teor de contaminantes e melhor desempenho energético.

Para otimizar a carbonização e a qualidade do carvão, práticas de manejo florestal que minimizem a colonização por organismos decompositores são recomendadas.

Isso pode incluir o uso de madeira com rápido processamento após a colheita, e armazenamento em condições secas para evitar a proliferação de microrganismos.

A aplicação de métodos de preservação, como secagem e tratamento químico, pode ajudar a proteger a madeira da ação de microrganismos, aumentando a eficiência da carbonização e melhorando a qualidade final do carvão.

Em resumo, a presença de microrganismos pode afetar significativamente tanto a eficiência da carbonização quanto a qualidade do carvão produzido a partir das espécies *Tachigali vulgaris*, *Myracrodruon urundeuva* e *Amburana cearensis*. A prática de gestão sustentável e o controle da infestação microbiana são essenciais para os processos.

### **3.3.5 Resultados**

#### **3.3.5.1 Impacto ecológico**

A remoção de espécies nativas do bioma Cerrado, como *Tachigali vulgaris*, *Myracrodruon urundeuva* e *Amburana cearensis*, para fins de produção de carvão, pode ter significativos impactos ecológicos cujos resultados afetam tanto a biodiversidade local quanto os serviços ecossistêmicos, a saber:

##### **Impacto sobre a Biodiversidade**

- Perda de Habitat;
- Redução de Espécies Nativas;
- Alteração nas Comunidades Microbianas.

#### Impacto sobre os Serviços Ecosistêmicos

- Ciclo de Nutrientes;
- Armazenamento de Carbono;
- Regulação do Microclima;
- Conservação da Água.

Para mitigar esses impactos evidencia-se como sendo fundamental considerar métodos de manejo sustentáveis e alternativas à produção de carvão

A dispensa das espécies *Tachigali vulgaris*, *Myracrodruon urundeuva* e *Amburana cearensis* do bioma Cerrado para fins de produção de carvão resulta, conforme resultados apurados, em consequências severas para a biodiversidade local e os serviços ecosistêmicos essenciais.

### 3.3.6 Discussão

#### 3.3.6.1 Impacto ecológico

Avaliar os efeitos da remoção das espécies do bioma Cerrado para fins de produção de carvão sobre a biodiversidade local e os serviços ecosistêmicos é de grande importância, tendo em vista os impactos descritos a seguir.

##### Impacto sobre a Biodiversidade

- Perda de Habitat: A remoção dessas espécies leva à destruição de habitats que sustentam uma variedade de organismos, desde plantas até animais. Esse uso da terra fragmenta ecossistemas, reduzindo a conectividade entre áreas naturais.
- Redução de Espécies Nativas: A retirada dessas árvores pode limitar o número de espécies vegetais que dependem delas, influenciando toda a cadeia alimentar. Muitos animais dependem dessas plantas para alimentação e abrigo.
- Alteração nas Comunidades Microbianas: A remoção e a subsequente carbonização podem alterar as comunidades de microrganismos do solo, que desempenham papéis cruciais na ciclagem de nutrientes e na saúde do solo.

##### Impacto sobre os Serviços Ecosistêmicos

- Ciclo de Nutrientes: As espécies *Myracrodruon urundeuva* e *Amburana cearensis* possuem um papel importante na ciclagem de nutrientes do solo. Sua remoção pode comprometer a fertilidade do solo e a disponibilidade de nutrientes para outras plantas, alterando o equilíbrio ecológico.
- Armazenamento de Carbono: Essas espécies de árvores são importantes no sequestro de carbono. A sua remoção não só libera carbono armazenado na biomassa, mas também diminui a capacidade do ecossistema de sequestro de carbono no futuro.

- **Regulação do Microclima:** Árvores desempenham um papel vital na regulação do microclima, influenciando a temperatura e a umidade do solo e do ar. A remoção pode levar a um aumento nas temperaturas locais e a alterações nos padrões de precipitação.
- **Conservação da Água:** A vegetação nativa auxilia a conservar os ciclos hidrológicos, propiciando infiltração e diminuindo a erosão. A remoção de árvores pode resultar em menor retenção de água, afetando a qualidade e a disponibilidade de água.

#### Sustentabilidade e Alternativas

Para mitigar esses impactos, é fundamental considerar métodos de manejo sustentáveis e alternativas à produção de carvão que minimizem a remoção de espécies nativas, como o uso de resíduos agropecuários ou a implementação de sistemas silviculturais que busquem a conservação.

A dispensa das espécies *Tachigali vulgaris*, *Myracrodruon urundeuva* e *Amburana cearensis* do bioma Cerrado para fins de produção de carvão pode ter consequências severas para a biodiversidade local e os serviços ecossistêmicos essenciais, levando à degradação do meio ambiente e à perda de recursos naturais.

A preservação dessas espécies é fundamental para manter a saúde do ecossistema e a funcionalidade do Cerrado.

### 3.4 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS

Avaliou-se o poder calorífico e a eficiência energética dos carvões vegetais das três espécies, a fim de determinar sua viabilidade como fonte de energia para o setor siderúrgico.

Os resultados da análise das propriedades energéticas dos carvões vegetais das espécies *Tachigali vulgaris*, *Myracrodruon urundeuva* e *Amburana cearensis* demonstraram variações significativas no poder calorífico e na eficiência energética.

Em comparação com os padrões exigidos pelo setor siderúrgico, *Myracrodruon urundeuva* apresentou o maior Poder Calorífico Superior (PCS) (4435,99 Kcal/Kg) e um teor de cinzas compatível (2,12%), sugerindo sua viabilidade como fonte primária de energia.

Por outro lado, *Amburana cearensis*, embora com uma eficiência térmica inferior, mostrou-se promissora pela sustentabilidade de sua extração e menor impacto ambiental. *Tachigali vulgaris*, apesar de seu potencial, não atendeu plenamente aos padrões de Poder Calorífico Inferior (3662,35 Kcal/Kg), o que limita sua aplicabilidade no setor.

Recomenda-se a realização de estudos adicionais para otimizar as condições de carbonização e explorar mais a fundo as propriedades desses carvões em aplicações industriais.

### 3.5 ESTUDO DA DECOMPOSIÇÃO TÉRMICA

Realizou-se análises de decomposição térmica (Termogravimetria e análise de diferença térmica) verificando entender o comportamento térmico dos materiais durante a pirólise.

Através da análise de decomposição térmica realizada nas espécies *Tachigali vulgaris*, *Myracrodruon urundeuva* e *Amburana cearensis*, foi possível observar que as temperaturas de degradação variaram significativamente entre as amostras, refletindo diferenças nas composições químicas e estruturas das madeiras.

Os valores de PCS e PCI obtidos mostraram que todas as espécies apresentaram um desempenho energético que se alinha com os padrões exigidos para a utilização no setor siderúrgico, com *Myracrodruon urundeuva* destacando-se por seu maior poder calorífico.

A eficiência energética observada durante as análises sugere que a utilização de carvões vegetais provenientes dessas espécies não apenas é viável, mas também potencialmente vantajosa sob um ponto de vista econômico e ambiental, considerando aspectos como a sustentabilidade e a redução de emissões.

Finalmente, recomenda-se que futuras investigações incluam a avaliação de outros parâmetros de interesse, como a influência de diferentes condições de pirólise, para otimizar ainda mais a viabilidade dessas madeiras como fontes energéticas.

### 3.6 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO VEGETAL ATIVADO

Desenvolveu-se estudo sobre a otimização de processos para a produção de carvão vegetal ativado a partir dos carvões obtidos, caracterizando suas propriedades (porosidade, área superficial, capacidade de absorção).

A análise da produção e caracterização do carvão vegetal ativado a partir das espécies *Tachigali vulgaris*, *Myracrodruon urundeuva* e *Amburana cearensis* demonstrou resultados promissores em relação à porosidade, área superficial e capacidade de absorção, alinhando-se com os padrões exigidos para aplicações industriais.

As inovações no processo de produção contribuem não apenas para a eficácia do material obtido, mas também para a sustentabilidade do setor. Futuros estudos devem focar na otimização contínua e na exploração de novas espécies, assegurando a viabilidade econômica e a efetividade ambiental deste recurso.

### 3.7 ANÁLISE DE SUSTENTABILIDADE

Avaliou-se a sustentabilidade quanto a produção de carvão vegetal e ativado, considerando aspectos econômicos, sociais e ambientais associados à utilização de espécies nativas do bioma Cerrado.



Os resultados das análises indicam a composição química predominante dos carvões, evidenciando a presença de compostos que podem influenciar as propriedades energéticas e de absorção. A análise da umidade, cinzas, voláteis e carbono fixo foram fundamentais para avaliar o poder calorífico dos carvões produzidos a partir das espécies *Tachigali vulgaris*, *Myracrodruon urundeuva* e *Amburana cearensis*.

A decomposição térmica mostrou como esses materiais se comportam durante a pirólise, revelando informações sobre sua estabilidade térmica e a eficiência do processo de carbonização.

A produção de carvão vegetal a partir de espécies, em estudo, nativas do Cerrado, quando realizada de maneira sustentável, minimiza os impactos ambientais, especialmente quando comparada ao uso de madeira proveniente de reflorestamento ou de florestas nativas em risco. A análise da biodiversidade e do uso de práticas agrícolas sustentáveis deve ser ressaltada.

A viabilidade econômica da produção de carvão ativado e vegetal pode ser avaliada pela comparação de custos de produção e pela análise de mercado em relação à demanda por carvão para diferentes aplicações, incluindo o setor siderúrgico e purificação de água, por exemplo.

O envolvimento das comunidades locais no cultivo e manejo das espécies nativas pode promover desenvolvimento socioeconômico, garantindo o respeito às práticas culturais e fortalecendo a economia local.

Com base nos dados, a viabilidade do uso de carvões produzidos a partir de espécies nativas como fontes de energia e de material ativado é encorajadora. As propriedades de porosidade, área superficial e capacidade de absorção obtidas nos testes indicam um potencial considerável para aplicações industriais.

A produção sustentável de carvão vegetal e ativado pode ocorrer sem comprometer a biodiversidade local, desde que sejam respeitadas normas de manejo e coleta responsável.

É recomendável que haja políticas que incentivem a pesquisa e a adoção de práticas sustentáveis no manejo das espécies nativas, bem como a certificação de produtos.

Investir em mais estudos que explorem diferentes processos de carbonização e ativação pode aumentar a eficiência e a sustentabilidade da produção.

Envolver as comunidades locais na produção e na comercialização do carvão para garantir que os benefícios econômicos sejam redistribuídos.

A produção de carvão vegetal e ativado a partir de espécies nativas do bioma Cerrado apresenta-se como uma alternativa sustentável e promissora que pode atender às demandas energéticas e industriais, desde que acompanhada por um compromisso com a preservação ambiental e o desenvolvimento social.

### 3.8 COMPARAÇÃO ENTRE AS ESPÉCIES

Comparou-se as propriedades do carvão vegetal produzido a partir das três espécies em termos de qualidade, rendimento e aplicabilidade, tanto para fins energéticos quanto para a produção de carvão ativado.

Após a análise das propriedades e rendimento dos carvões vegetais provenientes de *Tachigali vulgaris*, *Myracrodruon urundeuva* e *Amburana cearensis*, conclui-se que: *Myracrodruon urundeuva* apresenta o maior poder calorífico, destacando-se como uma excelente fonte energética, enquanto *Tachigali Vulgaris* demonstra maior potencial na produção de carvão ativado devido a sua maior porosidade.

Em termos de sustentabilidade, o uso dessas espécies nativas não apenas contribui para a conservação do bioma Cerrado, mas também promove benefícios econômicos e sociais para as comunidades locais. Para garantir a viabilidade econômica e ambiental, recomenda-se a adoção de práticas de manejo florestal sustentável e a pesquisa contínua em processos de otimização na produção de carvão.

### 3.9 ESTUDO DA COMPATIBILIDADE COM PROCESSOS INDUSTRIAIS:

Investigou-se a compatibilidade e a eficácia dos carvões vegetais obtidos em processos industriais existentes no setor siderúrgico, identificando possíveis adaptações necessárias.

Assim, esse estudo teve como um dos objetivos avaliar as propriedades dos carvões vegetais produzidos a partir de espécies nativas e sua compatibilidade e eficácia em processos industriais, especialmente no setor siderúrgico.

As propriedades analisadas incluíram:

Avaliou-se a presença de compostos que podem impactar a eficiência na combustão e qualidade do carvão.

Efetou-se medições de densidade, porosidade e área superficial, que influenciam na eficiência energética e na capacidade de absorção em carvão ativado.

A decomposição térmica e a análise termogravimétrica ajudaram a entender o comportamento dos carvões durante a pirólise, que é crucial para otimizar seu uso industrial.

A comparação entre as diferentes espécies analisadas revelou diferenças significativas em termos de:

**Qualidade do Carvão:** Diferenças na composição química impactaram diretamente o poder calorífico.

**Rendimento:** Algumas espécies apresentaram maior rendimento na produção de carvão vegetal, o que pode ser um fator decisivo na escolha da matéria-prima.



**Aplicabilidade:** A versatilidade do carvão vegetal produzido para fins energéticos e como matéria-prima para carvão ativado foi avaliada, destacando as melhores opções para usos industriais.

A análise de compatibilidade revelou quais espécies de carvão se mostraram mais eficientes no seu uso em processos siderúrgicos e as adaptações necessárias para otimizar a utilização dos carvões vegetais, incluindo possíveis modificações no processo de produção ou nas condições de uso para maximizar a eficiência.

Foi considerada a sustentabilidade da produção de carvão vegetal, ressaltando a importância de práticas que respeitem as diretrizes ambientais, sociais e econômicas, especialmente no contexto das espécies nativas do bioma Cerrado.

Foram propostas sugestões para melhorias nos processos existentes, como a adoção de tecnologias mais eficientes e sustentáveis para a produção de carvão vegetal e sua aplicação na indústria.

Recomendando a continuidade nas pesquisas sobre o comportamento dos carvões vegetais em outros contextos industriais e sua viabilidade econômica e ambiental.

A análise demonstrou que a escolha da espécie vegetal e o processo de produção têm um papel crucial na qualidade e na eficácia do carvão vegetal. A utilização integrada dos resultados permitirá um avanço na promoção da sustentabilidade e eficiência dos processos industriais no setor siderúrgico.

### 3.10 PROPOSTAS DE MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL:

Sugestão de práticas de manejo sustentável para a colheita e utilização das espécies estudadas, promovendo a conservação do bioma Cerrado enquanto se aproveita seus recursos.

Propostas de manejo sustentável que garantam a conservação das espécies nativas, como a rotação de áreas de colheita, a proteção de áreas de nascentes e a restauração de habitats degradados.

Sugestão de técnicas que minimizem o impacto ambiental, preservando a biodiversidade e o solo, como o uso de técnicas agroflorestais.

Importância do envolvimento das comunidades locais no manejo florestal, garantindo que as práticas respeitem saberes tradicionais e promovam o desenvolvimento socioeconômico.

Os resultados deste estudo podem servir de base para políticas de manejo florestal sustentável, promovendo a conservação do Cerrado enquanto se aproveitam seus recursos de maneira responsável.

Importância de um equilíbrio entre a exploração econômica e a preservação ambiental, apontando os benefícios sociais e econômicos que práticas sustentáveis podem trazer para as comunidades locais.

Sugestões para pesquisas adicionais que explorem outras espécies nativas e suas aplicações, continuem a avaliação dos impactos das práticas de manejo e se aprofundem nas interações ecológicas dentro do bioma Cerrado.

## 4 CONCLUSÕES

Com respeito à caracterização física do carvão constatou-se que os valores da densidade básica foram razoavelmente superiores para a espécie *Myracrodruon Urundeuva*, com resultados bem próximos para os dois métodos utilizados.

A espécie *Tachigali vulgaris* apresentou uma porosidade mais elevada, resultando numa maior capacidade de absorção de líquidos e uma queima mais eficiente, devido à maior área de superfície disponível. A espécie *Myracrodruon urundeuva* apresentou uma porosidade intermediária, equilibrando durabilidade e eficiência na combustão e a espécie *Amburana cearensis* apresentou uma porosidade semelhante à de *Tachigali vulgaris*.

A espécie de melhor qualidade para o carvão vegetal considerando o teor de umidade é a *Tachigali Vulgaris* (13,10%), que apresentou um teor de umidade semelhante *Myracrodruon Urundeuva* (13,97%). Na ordem, as melhores espécies foram: *Tachigali Vulgaris*, *Myracrodruon Urundeuva* e *Amburana Cearensis*.

Para a composição química, a espécie *Amburana Cearensis* é a que mais se aproxima da produção de carvão vegetal de boa qualidade.

Com relação ao poder calorífico superior observou-se uma tendência de um resultado mais elevado para a espécie *Myracrodruon Urundeuva*.

Análise imediata do carvão vegetal indicou maior teor de material volátil (28,60%) para espécie *Amburana Cearensis*, para o teor de carbono fixo a espécie *Myracrodruon urundeuva* apresentou o maior valor (74,95%) enquanto as espécies *Amburana Cearensis*, apresentou o valor (66,26%) e *Tachigali vulgaris* (72,98%) para o teor de Cinzas a espécie *Amburana Cearensis* apresentou o maior valor (5,14%) enquanto a espécie *Myracrodruon urundeuva* apresentou o menor índice (2,12%).

*Myracrodruon urundeuva* pode ser preferida em situações em que uma maior eficiência energética é desejada, enquanto *Amburana cearensis* pode ser mais indicada quando a produção de materiais voláteis é mais vantajosa.

Os resultados obtidos para o PH, estão associadas a solos que apresentam um pH que sofre variação de ácido a neutro, portanto em conformidade com a literatura existente para o caso.

Verifica-se que os resultados obtidos para a taxa de decomposição foram compatíveis, coerentes e alinhados com o que aponta a literatura pertinente a respeito.

A presença de microrganismos afeta significativamente tanto a eficiência da carbonização quanto a qualidade do carvão produzido a partir das espécies *Tachigali vulgaris*, *Myracrodruon urundeuva* e *Amburana cearensis*. A prática de gestão sustentável e o controle da infestação microbiana são essenciais para os processos.



A dispensa das espécies *Tachigali vulgaris*, *Myracrodruon urundeuva* e *Amburana cearensis* do bioma Cerrado para fins de produção de carvão resulta, conforme resultados apurados, em consequências severas para a biodiversidade local e os serviços ecossistêmicos essenciais.

Para mitigar esses impactos, é fundamental considerar métodos de manejo sustentáveis e alternativas à produção de carvão que minimizem a remoção de espécies nativas, como o uso de resíduos agropecuários ou a implementação de sistemas silviculturais que busquem a conservação.



## REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14929: Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8112/86. Rio de Janeiro, 1986.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8633/84. Rio de Janeiro, 1984.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D1102 – 84. Standard Test Method for Ash in Wood ASTM, Estados Unidos da América, 2007.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. D 1762 – 84: Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. West Conshohocken, 2007.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. D 167-93: Standard Test Method for Apparent and True Specific Gravity and Porosity of Lump Coke. West Conshohocken, 1999.

BRAND, M. A. Energia de biomassa florestal. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131 p.

COSTA, W. A. J. M. de; ATAPATTU, A. M. L. K. Decomposition and nutrient loss from prunings of different contour hedgerow species in tea plantations in the sloping highlands of Sri Lanka. *Agroforestry Systems*, Heidelberg, v. 51, n. 3, p. 201-211, mar. 2001.

DOAT, A. Le pouvoir calorifique de bois tropicaux. *Bois et foret des tropiques*, Nogentsur-Marne, (172): 33-55, mar. / abr. 1977.

FIGUEIREDO, C. K. Análise estatística do efeito da pressão na carbonização da madeira de *Eucalyptus grandis*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Florestal, Publicação EFLM-105/2009, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 104p. 2009.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores; Relatório 2019, ano base: 2018. Brasília – DF; 2019, 80p.

IPEF - Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – Laboratório de Produtos Florestais- (LPF) . Disponível em: Acesso em: 02 de janeiro de 2018.

KOLLMANN, F.F.P.; CÔTÉ, W.A. Principles of wood science and technology. New York, Springer Verlag. 1984.

NUMAZAWA, S. Contribution à l'étude de la pyolyse lente sous pression du bois – Détermination des paramètres optima du procédé et caractéristiques des produits obtenus. Tese de Doutorado, Université de Technologie de Compiègne, França, 2000.

PARDO, F.; GIL, L.; PARDOS, J. A. Field study of beech (*Fagus sylvatica* L.) and melojo oak (*Quercus pyrenaica* Willd) leaf litter decomposition in the centre of the Iberian Peninsula. *Plant and Soil*, The Hague, v. 191, n. 1, p. 89-100, Apr. 1997.

PENEDO, W. R. Madeira, carvão e gusa. In: Penedo, W. R. (Ed.). *Uso da madeira para fins energéticos*. CETEC: Belo Horizonte, p. 115-142, 1980.

PROTÁSIO, T. et al. Clones comerciais de *Eucalyptus* de diferentes idades para o uso bioenergético da madeira. *Scientia Forestalis*, v. 42, p. 113-127, 2014.



RIBEIRO, P. G., VALE, A. T. Qualidade do carvão vegetal de resíduos de serraria para o uso doméstico. In: REUNIÃO ANUAL DA SBPC, 58., 2006, Florianópolis. Resumos Florianópolis: UFSC, 2006.

SMITH, D. M. Maximum moisture content method for determining specific gravity of small wood samples. USDA Forest Products Laboratory, n. 2014, 8 p., 1954.

WENZL, H.F.J. The chemical technology of wood. Academic Press, New York, 1970. 69.