UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

Caroline Carvalho Correia

Efeitos das temperaturas de pirólise nas propriedades físico-química do biochar de resíduos de folhas

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO
2024

CAROLINE CARVALHO CORREIA

EFEITOS DAS TEMPERATURAS DE PIRÓLISE NAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICA DO BIOCHAR DE RESÍDUOS DE FOLHAS

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Florestal.
Orientador: Ananias Francisco Dias Júnior
Conselheiro: Gabriela Fontes Mayrinck Cupertino

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO
2024

CAROLINE CARVALHO CORREIA

EFEITOS DAS TEMPERATURAS DE PIRÓLISE NAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICA DO BIOCHAR DE RESÍDUOS DE FOLHAS

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Florestal.

Aprovado em 20 de dezembro de 2024.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Ananias Francisco Dias Júnior
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

M. Sc. Gabriela F. Mayrinck Cupertino
Universidade Federal do Espírito Santo Examinadora
Conselheira

M. Sc. Fabiola Martins Delatorre
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinadora

Canta forte, canta alto, que
a vida vai melhorar.

Martinho da Vila

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer a Deus e aos meus guias espirituais por todas as bênçãos, oportunidades e portas que abriram para mim ao longo dessa jornada. Foi graças à força, inspiração e proteção que senti em cada passo que pude enfrentar os desafios com coragem e gratidão. Que essa conquista seja um reflexo da fé e da confiança que sempre me acompanharam.

Mãe e pai, agradeço por todo o amor, apoio e pelos sacrifícios que fizeram por mim. Rarakem, mesmo não tendo meu sangue, sempre me ofereceu bons conselhos e palavras de sabedoria. Felipe, meu irmão mais velho, entre tapas e beijos, obrigada por sempre me apoiar e me incentivar a nunca desistir. Aos pequenos Arthur, Samuel e Guilherme, vocês são luz e alegria na minha vida. À minha avó, agradeço por sempre ter cuidado de mim desde criança e por me amar incondicionalmente, apesar de tudo. Como diz o ditado: "Vó é mãe duas vezes, dos filhos e dos netos." Ao meu falecido avô, minha eterna gratidão por todo o cuidado e preocupação que demonstrou, ligando para saber como eu estava desde que fui para longe estudar. Infelizmente, você não está mais conosco, mas sei que está radiante com as minhas conquistas. Bina, minha fiel cãopanheira, sou grata pelo apoio emocional incondicional que você me proporciona todos os dias.
Sou eternamente grata por tudo que vocês fizeram e continuam a fazer por mim. Obrigada por serem a família maravilhosa que são. Amo vocês!

Quero expressar minha gratidão a todos os meus amigos, tanto os que passaram pela minha vida quanto os que ainda estão ao meu lado. Em especial, ao Gustavo, Beatriz, João Pedro e Thiago, que desde a primeira semana de faculdade têm sido uma presença constante e essencial na minha vida. Vocês foram uma fonte constante de apoio, motivação e inspiração. As conversas, risadas e trocas de ideias tornaram esse período mais leve, especial e significativo. Agradeço profundamente por todas as vivências compartilhadas, pelas mãos estendidas nos momentos de dificuldade e pela energia positiva que sempre me transmitiram. Este trabalho é, sem dúvida, uma conquista que também pertence a vocês, e sou imensamente grato por tê-los ao meu lado nessa caminhada!

Agradeço de coração à Gabrielle Vieira, por sua paciência inabalável durante os meus momentos de "eu não vou conseguir" e por ter estado ao meu lado do início ao

fim, sempre me apoiando e me ajudando. Você é o verdadeiro sinônimo de companheirismo e cumplicidade.

Quero expressar minha sincera gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. Ananias Francisco Dias Júnior, pelo apoio e pelas valiosas contribuições ao longo da minha trajetória acadêmica. Sua dedicação ao ensino e seu incentivo constante são admiráveis.

E, por último, mas com todo o carinho que merece, gostaria de dedicar um agradecimento especial à minha co-orientadora, Gabriela Cupertino, que foi uma verdadeira parceira ao longo de toda essa jornada. É difícil encontrar palavras que façam jus à minha gratidão por todo o apoio, paciência e dedicação que você me ofereceu ao longo deste trabalho. Desde os primeiros momentos até a reta final, você esteve ao meu lado, me ajudando na escrita, orientando com paciência e, acima de tudo, me incentivando a seguir em frente, mesmo nos momentos mais desafiadores.

Muito obrigada!

RESUMO

A temperatura de pirólise pode transformar completamente as propriedades do biochar, tornando-o mais eficiente para aplicações agrícolas sustentáveis. Este estudo investigou o impacto das temperaturas de pirólise (400 ºC, 500 ºC, 600 ºC e 700 ºC) na produção e nas propriedades físico-químicas do biochar obtidas a partir das folhas de *Euterpe edulis Martius*, realizando a otimização de sua aplicação em práticas agrícolas sustentáveis. Foram aplicados o carbono fixo (CF), cinzas (CZ), voláteis (MV) e pH do biochar. Os principais resultados demonstraram que o aumento da temperatura de pirólise teve um impacto significativo nas propriedades do biochar. A temperatura de 700 ºC resultou no maior teor de carbono fixo, com uma média de 80,06%, diminuindo a maior estabilidade do material. A quantidade de voláteis (MV) diminuiu com o aumento da temperatura, com o valor médio mais baixo registrado a 700 ºC (9,32%), evidenciando maior estabilidade. A média de cinzas (CZ) foi de 13,47% a 600 ºC, refletindo uma maior concentração de minerais em comparação com as temperaturas mais baixas. O pH do biochar variou entre 9,31 e 10,20, com valores mais elevados apresentados nas pirólises a 500 ºC e 600 ºC, indicando um efeito alcalinizante, o que pode ser vantajoso para a correção de solos ácidos. Esses resultados indicam que o biochar produzido a 500 ºC e 600 ºC oferece características para melhorar a fertilidade do solo, especialmente em solos melhores ácidos e com deficiência de minerais. Já o biochar obtido a 700 ºC apresentou maior teor de carbono fixo, o que pode indicar maior estabilidade do material. No entanto, para afirmar com precisão a sua contribuição para o sequestro de carbono, serão necessárias análises mais específicas sobre o seu comportamento a longo prazo no solo. Assim, a escolha da temperatura de pirólise é crucial para otimizar o uso do biochar de *Euterpe edulis Martius* de acordo com as necessidades específicas de manejo do solo e conservação ambiental.

Palavras-chave: valorização de resíduos; impactos ambientais; agricultura sustentável; gestão de resíduos; economia circular.

Sumário

1. INTRODUÇÃO **8**
2. OBJETIVOS 10
2.1 Objetivo geral 10
2.2 Objetivos específicos 11
3. REVISÃO DE LITERATURA 11
3.1 Resíduos agroindustriais 11
3.2 O processo de pirólise 12
3.3 O uso do biochar 14
4. METODOLOGIA 15
4.1 Caracterização da matéria prima e obtenção do biochar 15
4.2 Caracterização do biochar 16
4.3 Análise estatística 17
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 17
5.1 Caracterização das propriedades das folhas residuais de Euterpe edulis Martius 17
5.2 Rendimento dos produtos obtidos na pirólise das folhas residuais de Euterpe edulis Martius 19
5.3 Caracterização do biochar produzido a partir de Euterpe edulis Martius em diferentes temperaturas de pirólise 21
6. CONCLUSÃO 26

1. INTRODUÇÃO

A busca por soluções sustentáveis para o manejo de resíduos orgânicos e a mitigação das mudanças climáticas tornou-se uma prioridade global, impulsionada pelos desafios ambientais, sociais e econômicos decorrentes da crescente geração e descarte inadequado desses materiais. No setor agroindustrial, os resíduos orgânicos representam não apenas um passivo ambiental, mas também uma oportunidade para desenvolver alternativas que aliem a redução de impactos ambientais ao crescimento econômico sustentável. A exemplo disso, pode-se citar a agroindústria do palmito, um setor relevante em regiões tropicais, como o Brasil, onde o cultivo de palmeiras, como a palmeira-real e a palmeira-juçara, é realizado para a extração do palmito, produto utilizado amplamente na culinária. A atividade agroindustrial envolve o cultivo, processamento e comercialização do palmito, sendo uma importante fonte de emprego e renda para muitas comunidades (Sampaio, *et al*., 2007). Contudo, o processo de cultivo e extração gera uma quantidade significativa de resíduos, especialmente no estágio de desbaste das palmeiras, quando plantas jovens ou maduras são removidas para promover o crescimento das palmeiras destinadas à produção de palmito. A cada planta de palmito colhida, estima-se que apenas 400 g do produto comercializável sejam extraídos, enquanto cerca de 13 kg de resíduos, compostos por estipe, folhas e bainhas, sejam gerados (Fermino *et al*., 2014). Esses resíduos frequentemente permanecem no local da colheita ou do processamento, sem nenhuma aplicação prática, representando um desperdício de biomassa e um desafio ambiental. Estudos indicam que o acúmulo desses resíduos pode corresponder a até 80-90% do peso bruto da planta, tornando-se um passivo ambiental devido à sua lenta degradação (Zenni, Helm,Tavares; 2018). Nesse contexto, a valorização de resíduos por meio de tecnologias inovadoras tem ganhado destaque como estratégia para promover uma economia circular e resiliente.

A pirólise, uma tecnologia versátil e eficiente, surge como uma solução promissora para transformar resíduos orgânicos em produtos de alto valor agregado, como biochar, líquido pirolenhoso ou bio-óleo e gases não condensáveis. Realizada na ausência de oxigênio para evitar a combustão, a pirólise é amplamente utilizada para converter biomassa em materiais que contribuem para a mitigação dos impactos ambientais, promovendo o reaproveitamento de recursos. Entre os produtos gerados

pela pirólise, o biochar tem atraído crescente interesse devido às suas diversas aplicações, especialmente como condicionador de solos. O uso de biochar no solo oferece benefícios agronômicos e ambientais significativos, como a melhoria da qualidade do solo, aumento da retenção de água e nutrientes, e promoção do sequestro de carbono plantas (Martins & Souza, 2020; Vieira *et al*., 2015). Esses efeitos são essenciais para a agricultura sustentável, contribuindo tanto para o aumento da produtividade quanto para a recuperação de solos degradados (Lehmann & Joseph, 2015). O biochar, com suas propriedades de alta porosidade, elevada área superficial e estabilidade química, melhora a estrutura do solo, tornando-o mais fértil e resistente à erosão, além de reduzir a dependência de fertilizantes químicos.

A eficácia do biochar no solo não é uma inovação recente. Um exemplo histórico notável vem das "terras pretas de índios" (TPI), solos ricos em carbono encontrados na Amazônia, que se destacam pela sua fertilidade e alta capacidade de retenção de nutrientes. Essas terras formaram-se ao longo de séculos, sendo o resultado da prática indígena de incorporar carvão vegetal e resíduos orgânicos no solo, demonstrando o potencial do biochar para melhorar a produtividade agrícola. Esse exemplo é um indicativo de como o uso de biochar pode contribuir para a sustentabilidade agrícola a longo prazo.

Para que o biochar seja eficaz no aprimoramento do solo, é fundamental que ele apresente características específicas, como alta porosidade, elevada área superficial, estabilidade química, composição balanceada de nutrientes e alto rendimento de carbono fixo (Melo *et al*., 2023; Sousa *et al*., 2011). Essas propriedades garantem que o material se integre de forma eficiente ao solo, melhorando sua fertilidade, aumentando a retenção de água e nutrientes e contribuindo para o sequestro de carbono, um benefício crucial para a mitigação das mudanças climáticas. A temperatura de pirólise é um fator determinante na formação dessas características, influenciando diretamente a porosidade, a área superficial, a composição química e o rendimento de carbono fixo do biochar (Liu *et al*., 2021). Temperaturas mais altas geralmente resultam em biochar mais estável, com maior área superficial e maior conteúdo de carbono fixo, enquanto temperaturas mais baixas favorecem a retenção de nutrientes, mas com menor estabilidade química (Huber *et al*., 2012).

Portanto, a investigação das condições de pirólise, especialmente a temperatura, é essencial para otimizar as propriedades do biochar, garantindo sua aplicação eficaz no solo e promovendo benefícios agronômicos duradouros e

sustentáveis. Este estudo tem como objetivo investigar o efeito de diferentes temperaturas de pirólise (500 ºC, 600 ºC e 700 ºC) na biomassa de folhas de *Euterpe edulis Martius*, o palmito juçara, uma espécie de palmeira amplamente cultivada na agroindústria do palmito. Compreender como essas variações de temperatura influenciam a produção e as propriedades do biochar resultante é crucial para aprimorar as técnicas de aproveitamento dos resíduos agroindustriais do palmito, agregando valor a materiais que, de outra forma, seriam descartados. Esse entendimento contribuirá para o desenvolvimento de práticas agrícolas mais sustentáveis, com foco na melhoria do solo, no sequestro de carbono e no uso eficiente de resíduos orgânicos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Investigar o impacto de diferentes temperaturas de pirólise (500 ºC, 600 ºC e 700 ºC) sobre a biomassa de folhas de *Euterpe edulis Martius* (palmeira-juçara), com o objetivo de entender como essas variações influenciam a produção, as propriedades físico-químicas, a fim de otimizar sua aplicação como condicionador de solo e promover práticas sustentáveis na agroindústria do palmito.

2.2 Objetivos específicos

(i) Avaliar o desempenho da pirólise da biomassa de *Euterpe edulis Martius* (palmeira-juçara) em diferentes temperaturas (500 ºC, 600 ºC e 700 ºC), com foco na produção de biochar de alta qualidade;

(ii) Investigar as características químicas e físicas do biochar gerado a partir da pirólise das folhas de *Euterpe edulis Martius* sob diferentes condições térmicas, estabilidade química e teor de carbono fixo;

(iii) Comparar a eficiência de conversão da biomassa de *Euterpe edulis Martius* em biochar em função das diferentes temperaturas de pirólise, com o objetivo de otimizar as condições do processo e melhorar a qualidade do biochar produzido.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Resíduos agroindustriais

Os resíduos agroindustriais são materiais ou sobras gerados durante o processamento de matérias-primas agrícolas e florestais (Pereira *et al.*, 2016). Esses resíduos podem ser classificados em dois tipos: resíduos de campo e resíduos de processo. Os resíduos de campo são produzidos após a colheita, incluindo sementes, folhas, cascas e caules, enquanto os resíduos de processo são gerados durante o beneficiamento da matéria-prima (Vieira *et al*., 2015). O aumento do consumo de energia, impulsionado pela exploração excessiva dos recursos naturais e pelo crescimento acelerado da população mundial, tem causado instabilidades nos sistemas ecológicos (Vieira *et al*., 2015). Com o contínuo crescimento populacional, a demanda por produtos alimentares e não alimentares se intensifica, levando ao aumento da produção agrícola e, consequentemente, à geração de grandes volumes de resíduos, incluindo biomassa residual, estimada em aproximadamente 140 Gt por ano (FAO, 2021).

O crescimento na geração de resíduos traz desafios ambientais, econômicos e sociais. O descarte inadequado desses resíduos contribui para a liberação de poluentes na atmosfera, comprometendo a qualidade do ar e causando problemas de saúde na população (Martins; Souza 2020). Por outro lado, o aproveitamento desses subprodutos apresenta grande potencial energético (ABIB, 2022), dado que a maioria dos resíduos agroindustriais é composta por celulose, hemicelulose, lignina, cinzas e proteínas (Melo *et al*. 2023). A reutilização de resíduos provenientes de atividades agrícolas e florestais como subprodutos contribui para a redução do desperdício e para a gestão eficiente de resíduos. Devido à sua composição lignocelulósica, esses subprodutos podem ser reaproveitados em processos que os transformam em biocombustíveis, biopolímeros, biofertilizantes e biogás (Martins; Souza, 2020), por meio de técnicas como digestão anaeróbica ou processos termoquímicos. Esses métodos convertem resíduos em recursos valiosos, alinhando-se aos princípios da economia circular (Solidadde *et al*., 2018).

A transformação de resíduos agroindustriais, como cascas de frutas e bagaços, é particularmente vantajosa devido à sua alta biodegradabilidade e riqueza em compostos orgânicos. Uma alternativa sustentável para sua reintegração na cadeia produtiva é a conversão termoquímica em biochar (Cai *et al*., 2023). Resíduos

lignocelulósicos provenientes de atividades agrícolas e florestais, quando submetidos à pirólise, produzem biochar, que pode ser utilizado como condicionador de solo, promovendo maior retenção de água e maior disponibilidade de nutrientes para as plantas (Huang *et al*., 2011; Martins; Souza, 2020; Vieira *et al*., 2015).

3.2 O processo de pirólise

A pirólise é um processo termoquímico que consiste na degradação térmica da biomassa, realizada a temperaturas superiores a 400 °C, na ausência de oxigênio. Esse processo resulta na conversão da biomassa em biochar (sólidos), bio-óleo (líquidos) e gases (gasosos) (Pereira *et al.*, 2016). Devido a essa característica, a pirólise se destaca como uma das principais técnicas de conversão termoquímica de biomassa, apresentando amplo potencial de aplicação (Pereira *et al.*, 2016). Esse método é essencial para a valorização de resíduos, consolidando-se como uma tecnologia promissora para o reaproveitamento de subprodutos gerados no beneficiamento de matérias-primas lignocelulósicas (Pereira *et al.*, 2016). A pirólise permite a transformação de materiais orgânicos, como folhas e outros resíduos, em produtos sustentáveis, de alto valor agregado. Quando submetidos ao processo, esses resíduos podem ser convertidos em biochar, um condicionador de solo capaz de melhorar a retenção de água e aumentar a disponibilidade de nutrientes essenciais para o crescimento das plantas (Pereira *et al.*, 2016).

A pirólise ocorre em várias etapas, iniciando com o aquecimento da biomassa, seguido pela decomposição térmica, em que as ligações químicas são quebradas, originando diferentes produtos (Pereira *et al.*, 2016). A ausência de oxigênio é fundamental, pois impede a combustão e permite a conversão controlada da biomassa em sólidos, líquidos e gases (Pereira *et al.*, 2016). Esse processo pode ser classificado em três tipos: lenta, rápida e intermediária, de acordo com fatores como temperatura, tempo de residência e taxa de aquecimento, os quais influenciam a produção e as características dos produtos gerados. Na pirólise lenta, o resíduo é submetido a temperaturas mais baixas, com uma taxa de aquecimento reduzida e longos períodos de residência, favorecendo a produção de biochar com maior estabilidade e alto teor de carbono (Mendonça, 2023; Santos *et al*., 2018). Já a pirólise rápida ocorre em temperaturas mais elevadas e altas taxas de aquecimento, com curto tempo de residência, privilegiando a produção de bio-óleo e gases, embora

resulte em biochar com menor densidade de carbono e maior quantidade de compostos voláteis (Correa e Santos, 2019). Por sua vez, a pirólise intermediária busca um equilíbrio entre a produção de biochar e bio-óleo, utilizando temperaturas elevadas e tempos de residência moderados, otimizando as propriedades dos produtos gerados (Correa e Santos, 2019; Santos *et al*., 2022).

Parâmetros como temperatura, tempo de residência e taxa de aquecimento influenciam diretamente a qualidade e a quantidade dos produtos obtidos no processo de pirólise. Temperaturas mais elevadas favorecem a produção de bio-óleo, enquanto temperaturas moderadas resultam em biochar com maior porosidade e maior capacidade de retenção de nutrientes (Marcelino, Loss, Andrade; 2020). Um tempo de residência prolongado pode aumentar o consumo da biomassa, mas também reduzir o rendimento do biochar (Vieira *et al*., 2015; Pires *et al*., 2018).

A taxa de aquecimento também desempenha um papel crítico: taxas muito altas podem gerar produtos indesejados, enquanto taxas muito baixas podem levar a uma conversão ineficiente da biomassa (Correa e Santos, 2019). Assim, ajustes nesses parâmetros permitem a obtenção de biochar com propriedades otimizadas, como maior capacidade de adsorção de nutrientes e melhoria na estrutura do solo. Por exemplo, temperaturas em torno de 400 °C geralmente resultam em biochar com estrutura química favorável, rica em grupos funcionais capazes de interagir eficientemente com os nutrientes do solo (Marcelino; Loss; Andrade, 2020).

3.3 O uso do biochar

A produção de biochar pode ser realizada a partir de diversas fontes de biomassa, ganhando destaque crescente devido ao seu potencial para melhorar a qualidade do solo, sequestrar carbono e mitigar os efeitos das mudanças climáticas. As variações na composição química da biomassa, como teores de lignina, extrativos, celulose e hemicelulose, bem como diferenças morfológicas e nas condições de pirólise, resultam em biochar com propriedades físicas e químicas distintas. Essas características incluem porosidade, área superficial específica, pH, capacidade de troca catiônica e recalcitrância, sendo diretamente influenciadas pela composição de cada biomassa utilizada (Maia, 2011). A produção de biochar ocorre por meio da decomposição térmica de materiais orgânicos em condições de ausência ou baixa concentração de oxigênio, originando um material estável que pode ser utilizado como

condicionador de solo (Phadtare; Kalbande, 2022; Mašek *et al*., 2016). Suas propriedades, como estrutura química e características físicas, dependem das condições de produção, incluindo a temperatura e o tipo de matéria-prima utilizada (Wigan, 2023; Maulana *et al*., 2022).

A qualidade e a composição química do biochar são, portanto, determinadas pelas especificidades da matéria-prima e pelas variáveis do processo de pirólise (Bruun *et al*., 2011). Além disso, os métodos de conversão têm papel crucial no controle das propriedades finais do biochar (Livra, 2011). Assim, é possível ajustar as condições de produção para obter diferentes tipos de biochar a partir de diversas matérias-primas (Huang *et al*., 2011). Pesquisas indicam que o biochar pode melhorar a produtividade das culturas agrícolas e otimizar o ciclo de nutrientes. Uma meta-análise revelou que, apesar da variabilidade decorrente de diferentes tipos de solo e métodos de produção, a aplicação de biochar tende a promover aumentos na produtividade vegetal e nos rendimentos agrícolas (Biederman e Harpole, 2012). Além disso, o biochar contribui para a qualidade do solo ao aumentar a retenção de nutrientes e a capacidade de retenção hídrica, características essenciais em solos de baixa fertilidade (Rehman *et al*., 2021; Annisa e Setiawati, 2020; Zaitun *et al*., 2022).

Outro foco de pesquisa está na interação entre biochar, microrganismos do solo e fertilizantes, evidenciando seu impacto no crescimento vegetal e na dinâmica do solo (Liu *et al*., 2016; Rawat *et al*., 2019). O biochar também demonstra potencial como agente supressor de doenças em plantas, embora sua eficácia dependa do tipo de solo e da fonte de biomassa utilizada (Kamara, 2014; Shoaf *et al*., 2016). Estudos recentes investigam a produção de biochar a partir de resíduos agrícolas, como palha de arroz e casca de coco, promovendo não apenas a redução de resíduos, mas também a sustentabilidade agrícola (Tang *et al*., 2017). A conversão desses resíduos em biochar resulta em um material com propriedades desejáveis, como pH elevado e alta capacidade de adsorção de contaminantes (Kamara *et al*., 2015; Sari *et al*., 2014). Esses avanços destacam a relevância do biochar na transição para uma agricultura mais sustentável e resiliente.

4. METODOLOGIA

4.1 Caracterização da matéria prima e obtenção do biochar

Para o desenvolvimento da pesquisa, foram utilizadas folhas da espécie *Euterpe edulis Martius* (palmeira-juçara), provenientes do manejo agroindustrial do palmito. Inicialmente, as amostras foram preparadas e caracterizadas seguindo normas técnicas estabelecidas, garantindo a padronização dos procedimentos. A umidade das folhas em base úmida foi obtida de acordo com a metodologia proposta na norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2021). A densidade a granel foi determinada conforme os procedimentos descritos na norma ASTM D5057-17 (ASTM, 2017). Já os teores de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo foram analisados conforme os procedimentos especificados na mesma norma. Essas etapas permitiram uma caracterização detalhada das folhas de *Euterpe edulis Martius*, fornecendo subsídios essenciais para compreender a influência das propriedades da matéria-prima nas características do biochar produzido.

Os processos de pirólise foram realizados em um sistema de reator de leito fixo. Para cada ensaio, 300 g de folhas secas em estufa a 103 ºC foram inseridas em um reator metálico fechado, posicionado no interior de um forno tipo mufla. Os experimentos ocorreram em atmosfera inerte, sem entrada de gases, e com temperaturas finais de 400 °C, 500 ºC, 600 ºC e 700 ºC, aplicadas a uma taxa de aquecimento de 15 ºC/min e mantidas por 30 minutos em cada ensaio. Os produtos condensáveis foram coletados utilizando um condensador de gases resfriado com água e gelo. Os rendimentos gravimétricos dos produtos sólidos (biochar) e líquidos (líquido pirolenhoso) foram quantificados utilizando as Equações 1 e 2. O rendimento de gases não condensáveis foi estimado indiretamente pela diferença entre os rendimentos dos produtos líquidos e sólidos em relação à massa inicial da biomassa (Equação 3).

$$RBIO = \left(\frac{Mbio}{Mm}\right) x100 \qquad \text{(Equação 1)}$$

$$RLP = \left(\frac{Mlp}{Mm}\right) x100 \qquad \text{(Equação 2)}$$

$$RGNC = 100 - (RBIO + RLP) \qquad \text{(Equação 3)}$$

Em que: RBIO = rendimento em biochar (%); Mbio = massa do biochar (g); Mm = massa seca da madeira (g); RLP = rendimento em líquido pirolenhoso (%); Mlp = massa do líquido pirolenhoso (g); RGNC = rendimento em gases não-condensáveis (%).

4.2 Caracterização do biochar

O biochar produzido foi analisado quanto à densidade (D = Massa/Volume, em g/cm³). Além disso, foram quantificados os teores de cinzas, material volátil e carbono fixo, seguindo os procedimentos descritos na norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2021). Para complementar a caracterização, foram realizadas análises de pH no biochar, permitindo avaliar a influência das condições de pirólise e do uso de catalisadores no material final. Todas as análises foram conduzidas em triplicata, garantindo a confiabilidade dos resultados. O biochar produzido foi analisado quanto à densidade (D = Massa/Volume, em g/cm³). Além disso, foram quantificados os teores de cinzas, material volátil e carbono fixo, seguindo os procedimentos descritos na norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2021). Para complementar a caracterização, foram realizadas análises de pH no biochar. A determinação do pH foi conduzida utilizando o método de solução úmida, na proporção de 1:10 (biochar: água deionizada, em massa). A mistura foi agitada por 30 minutos e, em seguida, deixada em repouso por 1 hora para equilíbrio. A leitura do pH foi realizada utilizando um pHmetro digital, devidamente calibrado com soluções padrão de pH 4, 7 e 10.

4.3 Análise estatística

A análise estatística dos dados foi realizada por meio de ANOVA (Análise de Variância), utilizando um delineamento inteiramente casualizado. Foram avaliadas quatro temperaturas de pirólise (400 °C, 500 °C, 600 °C e 700 °C). Quando identificadas diferenças significativas entre os tratamentos, foram aplicados modelos de regressão para analisar tendências e relações entre as variáveis estudadas. Além disso, o teste de Tukey foi utilizado para realizar comparações múltiplas das médias, adotando um nível de significância de 95% ($p \leq 0,05$). O erro padrão foi calculado para demonstrar a variabilidade dos dados e fornecer uma

estimativa da precisão das médias obtidas. Todas as análises estatísticas foram conduzidas no software R (R Core Team), assegurando precisão e reprodutibilidade nos resultados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização das propriedades das folhas residuais de *Euterpe edulis Martius*

A Tabela 1 apresenta os resultados de densidade e umidade das folhas de *Euterpe edulis Martius*. Esses dados são fundamentais para entender as propriedades físicas das folhas antes da pirólise, pois influenciam diretamente o comportamento da biomassa durante o processo de transformação em biochar. A densidade está relacionada à compactação das folhas, enquanto a umidade reflete a quantidade de água presente na biomassa, o que impacta na eficiência do processo de pirólise e nas características do biochar final.

Tabela 1. Umidade e densidade das folhas de *Euterpe edulis Martius.*

Material	Umidade (%)	Densidade a granel ($kg.m^{-3}$)
Folhas	4,50	33,06

A umidade e a densidade a granel das folhas de *Euterpe edulis Martius* impactam diretamente o processo de pirólise e as propriedades do biochar gerado. A umidade de 4,50% (Tabela 1) indica que as folhas já possuem baixo teor de água, o que facilita o aquecimento durante a pirólise, sem a necessidade de muita energia para evaporar a água. A densidade a granel das folhas de *Euterpe edulis Martius* (Tabela 1) tem implicações importantes no transporte da biomassa antes da pirólise. Com uma densidade baixa, as folhas são mais volumosas e ocupam mais espaço por unidade de peso, o que pode aumentar os custos logísticos relacionados ao transporte. Isso ocorre porque é necessário mais volume para transportar a mesma quantidade de biomassa em comparação com materiais de maior densidade.

A Figura 1 apresenta os resultados da análise química imediata das folhas de *Euterpe edulis Martius*, incluindo teores de cinzas, carbono fixo e compostos voláteis. Esses parâmetros são essenciais para entender a composição química da biomassa e suas implicações no processo de pirólise.

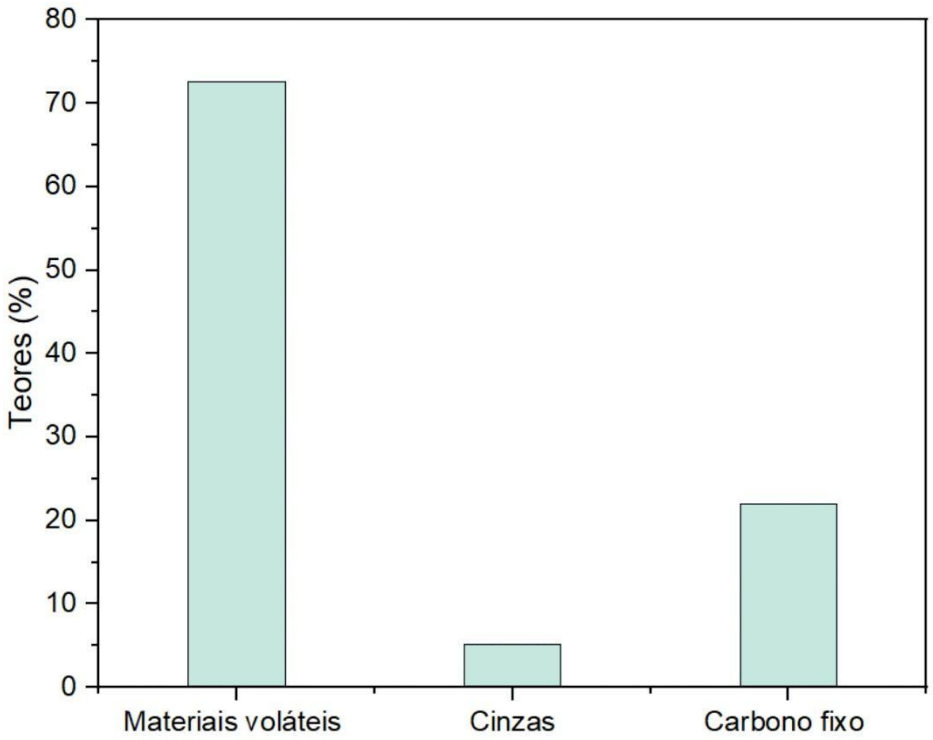

Figura 1. Análise química imediata das folhas de *Euterpe edulis Martius* mostrando os teores de compostos voláteis, cinzas e carbono fixo.

Os resultados indicam que as folhas de *Euterpe edulis Martius, antes* da pirólise, contém 72,58% de compostos voláteis, 5,23% de cinzas e 22% de carbono fixo (Figura 1). Durante a pirólise, os compostos voláteis são liberados como gases, enquanto o carbono fixo se acumula no biochar, aumentando sua estabilidade e resistência à decomposição. O teor de cinzas também é relevante, pois pode fornecer minerais importantes para o solo. A temperatura de pirólise é crucial, pois impacta diretamente a proporção desses componentes no biochar. Temperaturas mais altas favorecem a formação de um biochar mais rico em carbono fixo e com maior estabilidade, enquanto temperaturas mais baixas podem resultar em maior retenção de nutrientes e características mais adequadas para melhorar a fertilidade do solo.

5.2 Rendimento dos produtos obtidos na pirólise das folhas residuais de *Euterpe edulis Martius*

A Figura 2 ilustra o rendimento dos produtos da pirólise das folhas residuais de *Euterpe edulis Martius*. Os rendimentos de biochar (carvão vegetal) e de líquido pirolenhoso (Figuras 2A e 2B) apresentaram diferenças estatisticamente significativas em função das variações nas temperaturas de pirólise, enquanto os gases não condensáveis (Figura 2C) não demonstraram variação significativa. O rendimento dos produtos gerados durante a pirólise das folhas residuais é influenciado por diversos fatores, como a composição da biomassa e a temperatura do processo. Esses parâmetros desempenham um papel crucial na determinação da proporção de biochar, bio-óleo e gases produzidos, o que impacta diretamente na eficiência e viabilidade do aproveitamento dos resíduos (Bonow, 2017).

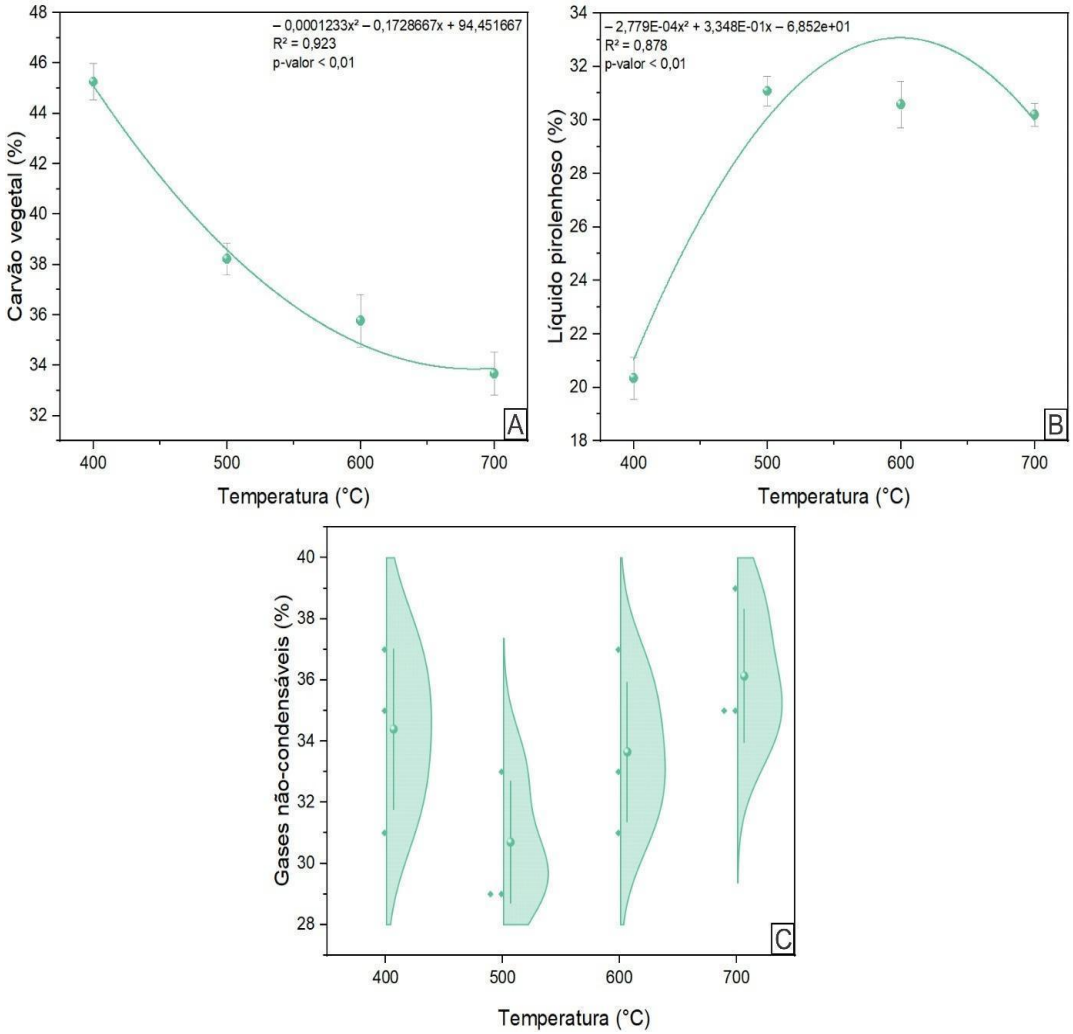

Figura 2: Rendimento dos produtos da pirólise das folhas de *Euterpe edulis Martius*. A: rendimento em carvão vegetal; B: rendimento em líquido pirolenhoso; C: rendimento em gases não condensáveis. Fonte: A autora (2024).

A temperatura de pirólise exerce uma influência direta no rendimento e nas propriedades do biochar. À medida que a temperatura aumenta, ocorre a liberação de compostos voláteis, como água e hidrocarbonetos, seguidos pela emissão de gases não-condensáveis, como monóxido de carbono e dióxido de carbono (Maia, 2011). Esse processo intensifica a degradação térmica da biomassa, resultando em uma redução da fração sólida residual e, consequentemente, no rendimento do biochar (Figura 2A).

Biochars produzidos a temperaturas mais baixas (<500 °C) tendem a apresentar maior quantidade de grupos funcionais oxigenados e matéria orgânica residual, o que favorece a retenção de nutrientes e a capacidade de troca catiônica (CTC), características essenciais para a melhoria da fertilidade e qualidade do solo. Em contrapartida, temperaturas mais elevadas favorecem o aumento da proporção de carbono fixo e da microporosidade, conferindo maior estabilidade ao biochar e aumentando sua capacidade de retenção de água a longo prazo, além de torná-lo mais eficiente no sequestro de carbono (Marques *et al*., 2022).

O rendimento do líquido pirolenhoso atinge seu pico em torno de 600 °C, sendo essa a temperatura ideal para maximizar a produção deste subproduto (Figura 2B). Embora o líquido pirolenhoso tenha aplicação em diversos contextos, para uso no solo, o foco deve ser dado ao biochar. Quando produzido a temperaturas superiores a 600 °C, o biochar apresenta maior estabilidade química e semelhança com estruturas de carbono estáveis, como a inertinita (Martins & Souza, 2020).

De maneira geral, a temperatura de pirólise influencia diretamente o rendimento e as propriedades do biochar. Temperaturas mais baixas favorecem a retenção de nutrientes devido à maior presença de grupos funcionais superficiais, enquanto temperaturas mais altas resultam em um biochar mais poroso e estável, com maior capacidade de retenção de água e maior eficiência no sequestro de carbono. Para avaliar a funcionalidade do biochar no solo, é crucial considerar suas características, como a área de superfície interna e a microporosidade, que influenciam sua interação com o solo, afetando sua porosidade, agregação e CTC. Essas propriedades favorecem a retenção de nutrientes, a ligação da matéria

orgânica e a redução da acidez e do alumínio tóxico, fatores fundamentais para a melhoria da fertilidade do solo.

Esses efeitos contribuem para o aumento dos rendimentos agrícolas, destacando que a qualidade do biochar é tão importante quanto sua quantidade (Nóbrega, 2011). Compreender suas características permite otimizar sua aplicação e garantir que ele desempenhe sua função de maneira eficaz, promovendo a sustentabilidade e a saúde do solo de forma duradoura.

5.3 Caracterização do biochar produzido a partir de *Euterpe edulis Martius* em diferentes temperaturas de pirólise

A Figura 3 apresenta a distribuição da densidade a granel do biochar gerado a diferentes temperaturas de pirólise (400 ºC, 500 ºC, 600 ºC e 700 ºC). Os resultados mostram que não houve diferença significativa na densidade a granel do biochar produzido nas diversas temperaturas avaliadas.

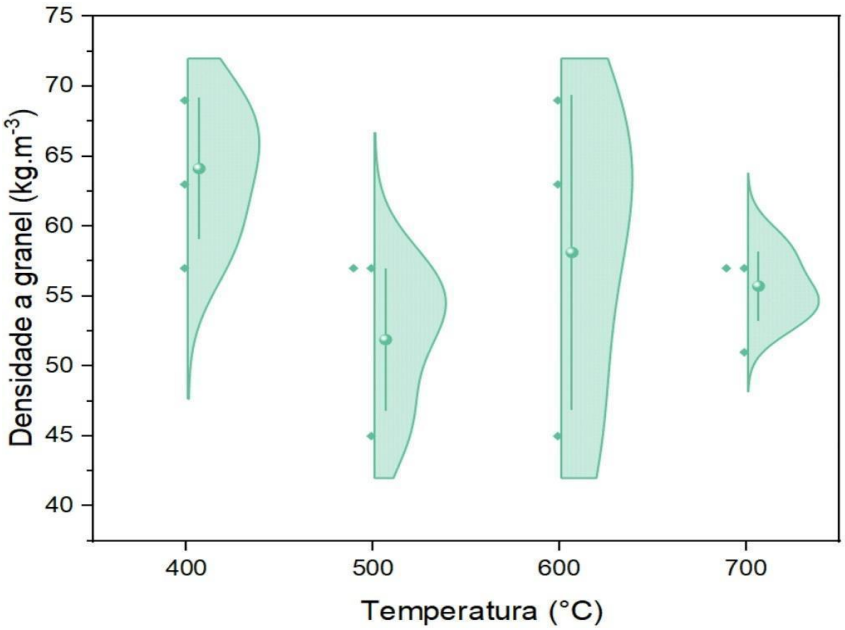

Figura 3: Distribuição da densidade a granel do biochar produzido a diferentes temperaturas de pirólise (400 ºC, 500 ºC, 600 ºC e 700 ºC). Fonte: A autora (2024).

A densidade a granel do biochar é uma característica fundamental que influencia suas propriedades e a eficácia no solo. No presente estudo, não foi observada uma diferença significativa entre os biochars produzidos a diferentes temperaturas de pirólise. No entanto, a literatura sugere que biochars com menor densidade, geralmente associados a temperaturas mais baixas de pirólise, tendem a

apresentar maior porosidade (Lehmann & Joseph, 2015; Dianin et al., 2019). Essa maior porosidade pode favorecer a retenção de água e nutrientes, o que é especialmente benéfico em solos com baixa capacidade de retenção, como os áridos ou arenosos. Estudos indicam que biochars com densidade a granel inferior a 0,4 g/cm³ são mais eficazes em melhorar a estrutura do solo, aumentando a aeração e favorecendo o desenvolvimento das raízes.

Além disso, a densidade a granel impacta diretamente a estrutura física do solo, principalmente em solos compactados. Biochars de menor densidade podem reduzir a compactação e melhorar a agregação do solo, o que favorece o fluxo de água e o crescimento das raízes, criando um ambiente mais propício ao desenvolvimento das plantas (Nóbrega *et al*., 2011). Embora a densidade a granel não tenha mostrado diferenças significativas nas condições do estudo, as variações observadas nas propriedades dos biochars indicam que a porosidade é um fator determinante para sua funcionalidade, especialmente em relação à retenção de água, nutrientes e à melhoria da estrutura do solo. Dessa forma, o biochar não apenas contribui para a fertilidade do solo, mas também promove a estabilidade dos nutrientes, o que torna essencial considerar suas propriedades físicas e químicas para otimizar sua aplicação.

A Figura 4 apresenta as propriedades químicas do biochar produzido a partir das folhas de *Euterpe edulis Martius* sob diferentes temperaturas finais de pirólise (400 ºC, 500 ºC, 600 ºC e 700 ºC).

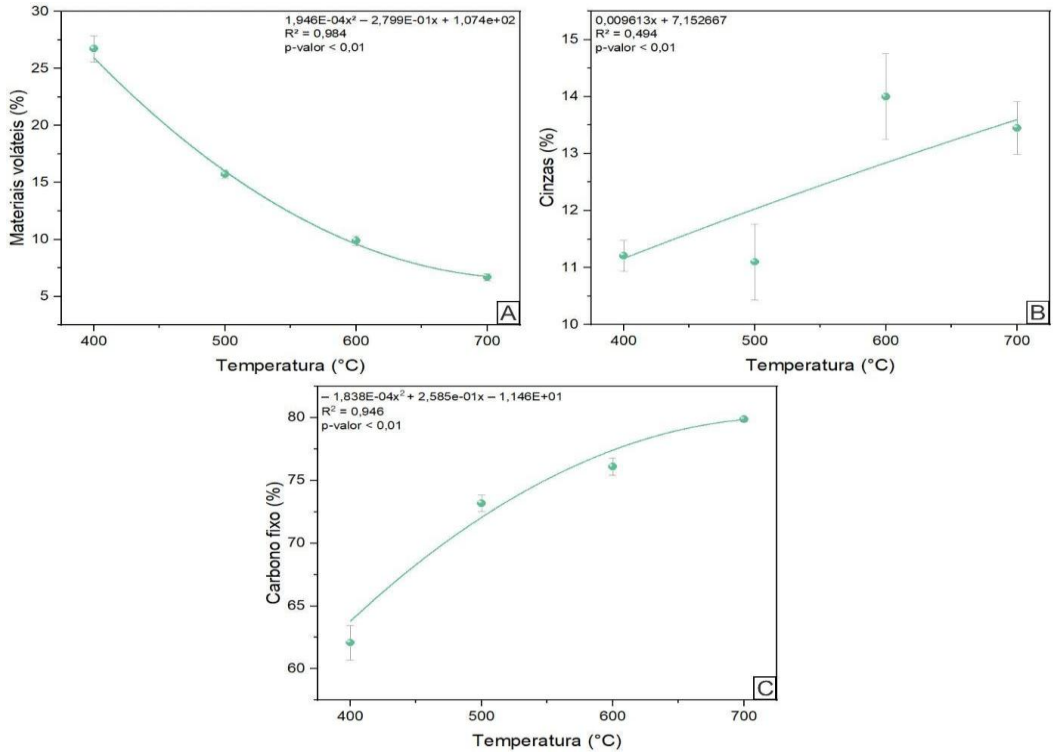

Figura 4: Propriedades químicas do biochar produzido a partir das folhas de *Euterpe edulis Martius* em diferentes temperaturas de pirólise (400 ºC, 500 ºC, 600 ºC e 700 ºC). A: Materiais voláteis; B: Carbono fixo; C: Teor de cinzas. Fonte: A autora (2024).

As análises das propriedades químicas do biochar, como os teores de cinzas, carbono fixo e materiais voláteis, revelam variações significativas entre os biochars produzidos a diferentes temperaturas de pirólise, o que pode impactar diretamente suas aplicações no solo. Em geral, temperaturas mais altas resultam em biochars mais estáveis, com maior área superficial e maior conteúdo de carbono fixo, enquanto temperaturas mais baixas favorecem a retenção de nutrientes, mas com menor estabilidade química (Huber *et al*., 2012). A elevação da temperatura de pirólise leva à degradação de compostos como celulose, hemicelulose e lignina, gerando compostos ricos em carbono e liberando compostos voláteis, que contribuem para a redução da massa da biomassa e a formação de espaços porosos no biochar (Marques *et al*., 2022). Este processo reduz a quantidade de compostos voláteis, aumentando a estabilidade do material e sua resistência à decomposição, o que é particularmente vantajoso para o uso agrícola a longo prazo.

O aumento da temperatura de pirólise também tem impacto direto no teor de cinzas no biochar. Observou-se que as cinzas se tornam mais abundantes com o

aumento da temperatura, refletindo a maior mineralização da matéria orgânica e a oxidação de materiais inorgânicos presentes na biomassa. As cinzas, compostas principalmente por minerais essenciais como potássio, fósforo e cálcio, tornam-se mais concentradas à medida que a temperatura sobe (Marques *et al*., 2022). Esse aumento nas cinzas pode tornar o biochar mais valioso para solos deficientes em nutrientes, pois contribui para a fertilidade do solo, enriquecendo-o com minerais essenciais para o crescimento das plantas.

A relação entre a temperatura de pirólise e o carbono fixo no biochar é inversa à dos compostos voláteis. À medida que a temperatura aumenta, a quantidade de carbono fixo na matriz sólida do biochar se torna mais concentrada, enquanto a quantidade de compostos voláteis diminui (Figura 4CEsse aumento no carbono fixo confere ao biochar maior estabilidade e resistência à decomposição, contribuindo para a sua durabilidade e para a estabilização do material no solo (Marques *et al*., 2022).

Portanto, a temperatura de pirólise desempenha um papel crucial na definição das propriedades químicas do biochar. Temperaturas mais altas (acima de 600 ºC) geram biochars com maior conteúdo de carbono fixo, tornando-os ideais para aplicação em solos que requerem estabilização do material a longo prazo. Além disso, o aumento da temperatura resulta em maior concentração de cinzas, tornando o biochar mais adequado para solos carentes de nutrientes minerais. Esses fatores ressaltam a importância de se considerar tanto o conteúdo de carbono fixo quanto o teor de cinzas na escolha do biochar para aplicações específicas no solo, a fim de otimizar seus benefícios para a fertilidade e a sustentabilidade agrícola (Stroher *et al.*, 2023).

Já a Figura 5 mostra os resultados da análise de pH do biochar produzido em diferentes temperaturas de pirólise (400 ºC, 500 ºC, 600 ºC e 700 ºC).

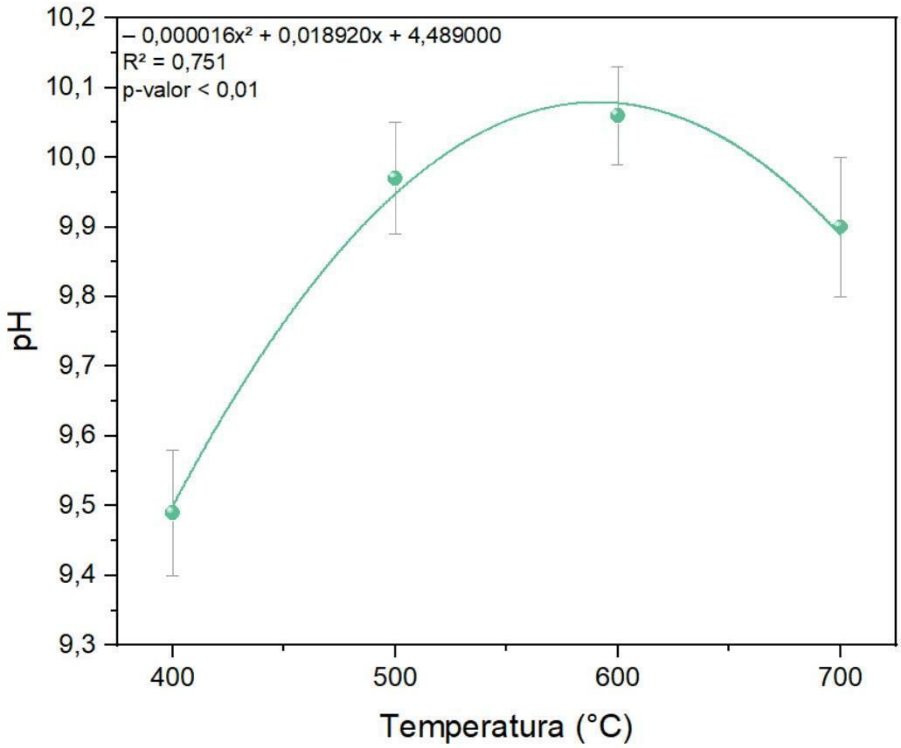

Figura 5: Resultados da análise de pH do biochar produzido a partir de *Euterpe edulis Martius* em diferentes temperaturas de pirólise (400 ºC, 500 ºC, 600 ºC e 700 ºC). Fonte: A autora (2024).

Os resultados indicam que houve diferença significativa no pH do biochar em função das diferentes temperaturas de pirólise. Conforme mostrado na Figura 5, o pH do biochar produzido a partir *de Euterpe edulis Martius* aumenta com a elevação da temperatura de pirólise, alcançando um valor máximo de aproximadamente 10,1 a 600ºC. No entanto, a 700ºC, observou-se uma leve redução do pH para cerca de 9,8. Essa tendência está relacionada às mudanças químicas durante a pirólise, como a decomposição de grupos funcionais ácidos e a formação de compostos alcalinos em temperaturas mais altas, como carbonato de cálcio, que contribui para o aumento do pH (Nóbrega, 2011).

O pH do biochar influencia a biodisponibilidade de nutrientes essenciais para as plantas, já que solos com pH muito baixo ou muito alto podem limitar a absorção de certos nutrientes e prejudicar o crescimento vegetal. A aplicação de biochar no solo pode alterar suas características químicas ao longo do tempo, ajustando o pH e melhorando as condições para o desenvolvimento das plantas (Rawat, 2019). Nesse sentido, a variação do pH do biochar, em função da temperatura de pirólise, é um fator crucial na escolha do tipo de biochar a ser utilizado em diferentes tipos de solo.

Biochars com pH elevado, como os produzidos a 500ºC e 600ºC, podem ser eficazes como corretivos de acidez, tornando o ambiente mais favorável ao crescimento de plantas em solos ácidos. Esse pH elevado melhora a disponibilidade de nutrientes como cálcio, magnésio e fósforo, que são limitados em solos ácidos (Conz, 2015). Por outro lado, biochars produzidos a temperaturas mais baixas, como 400ºC, apresentam pH ligeiramente mais ácido, sendo mais adequados para solos alcalinos ou quando se deseja um pH mais baixo. Nestes casos, o biochar ácido pode auxiliar na solubilização de micronutrientes, como ferro, zinco e manganês, frequentemente indisponíveis em solos alcalinos. Além disso, a escolha do biochar adequado pode influenciar positivamente a microbiota do solo, estimulando microorganismos benéficos adaptados a diferentes faixas de pH.

6. CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que as diferentes temperaturas de pirólise (500 ºC, 600 ºC e 700 ºC) influenciam diretamente as propriedades do biochar produzido a partir das folhas de *Euterpe edulis Martius*. A temperatura de 700 ºC resultou no maior teor de carbono fixo e maior estabilidade química. A densidade do biochar diminuiu com o aumento da temperatura, o que melhora sua porosidade e capacidade de retenção de água e nutrientes. O pH aumentou até 600 ºC, tornando o biochar um potencial corretivo de solos ácidos. A temperatura de 600 ºC apresentou um bom equilíbrio entre estabilidade, pH e rendimento de carbono fixo, sendo ideal para melhorar a fertilidade do solo. Futuros estudos devem investigar a interação entre o biochar, o solo e o crescimento vegetal para otimizar sua aplicação na agroindústria do palmito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANNISA, W. AND SETIAWATI, E. Benefits of biochar compost (biochom) to yield rice productivity on tropical swampland, south kalimantan, indonesia. **Bio Web of Conferences**, v. 20, p. 01009, 2020.

ASHOKKUMAR, V.; CHANDRAMUGHI, V. P.; KUMAR, G.; NGAMCHARUSSRIVICHAI, C.; PIECHOTA, G.; IGLIŃSKI, B.; KOTHARI, R.; CHEN,

W. H. Advancements in lignocellulosic biomass: A critical appraisal of fourth generation biofuels and value-added bioproduct. **Fuel,** v. 365, p. 130751, 1 jun. 2024.

ASTM, 2017. D5057-17: standard test method for screening apparent specific gravity and bulk density of waste. **West Conshohocken**, PA, USA.

ASTM. D1762-84: standard test method for chemical analysis of wood charcoal. **West Conshohocken.** 2021.

BIEDERMAN, L. AND HARPOLE, W. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. **GCB Bioenergy**, v. 5(2), p. 202-214, 2012.

BIEDERMAN, L.; HARPOLE, W. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta- analysis. **GCB Bioenergy,** 5(2), 202-214. 2012.

BONOW, Kellen Christine. **Avaliação experimental do potencial herbicida do bio-óleo da pirólise rápida da casca de arroz**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 47, 2017.

BRUUN, H.; HAUGGAARD-NIELSEN, N.; IBRAHIM, H.; EGSGAARD, P.; AMBUS, P. A.; JENSEN. Influence of fast pyrolysis temperature on biochar labile fraction and short-term carbon loss in a loamy soil. **Biomass Bioenergy**, v. 35, p. 1182 119, 2011.

CAI, Jixiang.; LIN, Ning.; LI, Youmen.; XUE, Jiangpeng; LI, Feixing; WEI, Lianghuan; YU, Mingyan; ZHA, Xianghao; LI, Weizun.. Pesquisa sobre a aplicação de materiais catalíticos na pirólise de biomassa. **Revista de Pirólise Analítica e Aplicad ,** v. 177, p. 106321, 2023.

CALIJURI, M. L.; SILVA, T. A.; MAGALHÃES, I. B.; PEREIRA, A. S. A. DE P.; MARANGON, B. B.; ASSIS, L. R. DE; LORENTZ, J. F. Bioproducts from microalgae biomass: Technology, sustainability, challenges and opportunities. **Chemosphere,** v. 305, p. 135508, 1 out. 2022.

CHEN, W. H.; HO, K. Y.; ANIZA, R.; SHARMA, A. K.; SARAVANAKUMAR, A.; HOANG, A. T. A review of noncatalytic and catalytic pyrolysis and co-pyrolysis products from lignocellulosic and algal biomass using Py-GC/MS. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 134, p. 51–64, 25 jun. 2024.

CONZ, Rafaela Feola. **Caracterização de matérias-primas e biochars para aplicação na agricultura**. 2015. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, University of São Paulo, Piracicaba, 2015.

CORREA, Isabela Barreto; SANTOS, Lizandro de Sousa. Simulação e otimização do processo de pirólise de biomassas. XXI ENMC (Encontro Nacional de Modelagem Computacional) e IX ECTM (Encontro de Ciência e Tecnologia dos Materiais). **Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão**, v.4, n.3, 2019.

CUPERTINO, G. F. M. et al. Co-pyrolysis of biomass and polyethylene terephthalate (PET) as an alternative for energy production from waste valorization. **Fuel,** v. 362, p. 130761, 15 abr. 2024.

DIANIN, Lucas Maciel; MACIEL, Maria Regina Wolf; MIRANDA, Nahieh Toscano; FERNANDES, Daniel Santos. Comissionamento de planta piloto de pirólise utilizando reator de leito fluidizado. **Revista dos Trabalhos de Iniciação Científica da UNICAMP, Campinas, SP**, n. 26, 2019.

DIN. EN 14918: Determination of calorific value.Berlin. 2010.

HAN, D.; SUN, L.; CHEN, L.; YANG, S.; LI, T.; XIE, X.; XU, M.; TANG, W.; ZHAO, B.; SI, H.; HUA, D. Review on the progress in the production of aromatic hydrocarbons by co-catalytic pyrolysis of biomass and plastics. **Journal of Fuel Chemistry and Technology**, v. 52, n. 4, p. 481–495, 1 abr. 2024.

HUANG H., YUAN X., ZENG G., WANG J., LI H., ZHOU C., PEI X., YOU Q., CHEN L. Thermochemical liquefaction characteristics of microalgae in sub-and super- critical ethanol. Fuel Process.**Technol.** 92(1):147–53. 2011.

HUBER, G. W.; IBORRA, S.; CORMA, A. Synthesis of transportation fuels from biomass: Chemistry, catalysts, and engineering. **Chemical Reviews**, v. 106, n. 9, p. 4044–4098, set. 2006.

HUBER, K., QUEIRÓZ, J., MOREIRA, A., & RIBEIRO, S. Caracterização química do resíduo agroindustrial da manga ubá (mangifera indica l.): uma perspectiva para a

obtenção de antioxidantes naturais. **Revista Brasileira De Tecnologia Agroindustrial.** ed. 6. 2012.

KAMARA, A. Effects of biochar derived from maize stover and rice straw on the early growth of their seedlings. **American Journal of Agriculture and Forestry**, 2(5), 232. 2014.

KAMARA, A.; KAMARA, H.; & KAMARA, M. Effect of rice straw biochar on soil quality and the early growth and biomass yield of two rice varieties. **Agricultural Sciences**, v. 06(08), p. 798-806, 2015.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S.; Biochar for Environmental Management: S**cience, Technology and Implementation**. Routledge. (2015).

LIOU, Y. J.; HUANG, W. J.; Quantitative Analysis of Graphene Sheet Content in Wood Char Powders during Catalytic Pyrolysis. J**ournal of Materials Science & Technology,** v. 29, n. 5, p. 406–410, 1 maio 2013.

LIU, C., LIU, F., RAVNSKOV, S., RUBÆK, G., SUN, Z., & ANDERSEN, M. Impact of wood biochar and its interactions with mycorrhizal fungi, phosphorus fertilization and irrigation strategies on potato growth. **Journal of Agronomy and Crop Science**, 203(2), 131-145. 2016.

LIU, Z., DUGAN, B.; MASIELLO, C. A.; GONNERMANN, H. M.. Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties. **Scientific Reports**, v. 11(1), 1-12, 2021.

MAIA, C. M. B. F. Produção de biocarvão a partir de diferentes fontes de biomassa. Encontro Brasileiro de Substâncias Húmicas. Aracajú- SE. **IX EBSERH.** 2011.

Marcelino,Igor Polla; LOSS, Arcângelo; ANDRADE, Marcio Antonio Nogueira. Aspectos gerais do uso do biochar para sustentabilidade com ênfase aos atributos edificados: a revisão. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, p. 301–319, 2020.

MARQUES, Caroline Araújo.; SILVA, Diego Aleixo da., APRESENTAÇÃO, Marcos de Jesus Fonseca de.; NAKASHIMA, Gabriela Tami.; YAMAJI, Fabio Minoru. Produção

de biochar com palha de cana-de-açúcar(Saccharumsp.). **Research, Society and Development**, v. 11, n. 1, p. e31211124675, 2022.

MARTINS, L; SOUZA, R. Análise físico-química de diferentes resíduos agroindustriais para possível utilização na indústria. **Brazilian Journal of Development**, ed. 6(2), p. 6936-6948, 2020.

MAŠEK, O., BROWNSORT, P., CROSS, A., SOHI, S. Influence of production conditions on the yield and environmental stability of biochar. **Fuel**, 103, 151-155. 2016.

MAULANA, A., PRASETYO, T., HARIANTI, M., & LITA, A. Effect of pyrolysis methods on characteristics of biochar from young coconut waste as ameliorant. Iop **Conference Series Earth and Environmental Science,** 959(1), 012035. 2022.

MELO, L.; FERNANDES, L.; SOARES, M.; SCHMIDT, V.; LIMA, M. Perspectivas no aproveitamento de resíduos agroindustriais ricos em celulose para o desenvolvimento de biopolímeros comestíveis. **II Simpósio Online Sulamericano de Tecnologia, Engenharia e Ciência de Alimentos.** Diamantina(MG) Online, 2023.

MENDONÇA, João Carlos Ferreira; NAVES, Bruna Teodoro; SILVA, Luis Fernando Vieira da; MELO, Edmar Isaias de. Efeito do biocarvão de serragem de eucalipto sobre a simbiose de fungos micorrízicos arbusculares nativos : Effect of eucalyptus sawdust biochar on the symbiosis of native arbuscular mycorrhizal fungi. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 6, n. 2, p. 1585–1595, 2023.

Nóbrega, Ísis Patrícia Cardoso. **Efeitos do Biochar nas propriedades físicas e químicas do solo: - Sequestro de carbono no solo**. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente; p, 46; 2011. Disponível: https://www.bibliotecaagptea.org.br/agricultura/adubacao/EFEITOS%20DO%20BIOCHAR%20NAS%20PROPRIEDADES%20FISICAS%20E%20QUIMICAS%20DO%20SOLO%20-%20SEQUESTRO%20DE%20CARBONO%20DO%20SOLO.pdf. Acesso em: dez 2024.

NOKKOSMA ÈKI, M. I.; KRAUSE, A. O. I.; LEPPA, E. A.; ÈKI, È.; KUOPPALA, E. T. A novel test method for catalysts in the treatment of biomass pyrolysis oil. **Catálise Hoje**. V, 45, ed. 1–4. p. 405-409, 1998.

NOKKOSMÄKI, M. I.; KUOPPALA, E. T.; LEPPÄMÄKI, E. A.; KRAUSE, A. O. I. Catalytic conversion of biomass pyrolysis vapours with zinc oxide. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 55, n. 1, p. 119–131, 1 maio 2000b.

OLIVEIRA, J. L. F.; BATISTA, L. M. B.; ALBURQUERQUE DOS SANTOS, N.; ARAÚJO, A. M. M.; FERNANDES, V. J.; ARAUJO, A. S.; ALVES, A. P. M.; GONDIM, A. D. Clay-supported zinc oxide as catalyst in pyrolysis and deoxygenation of licuri (Syagrus coronata) oil. **Renewable Energy,** v. 168, p. 1377–1387, 1 maio 2021.

PEREIRA, Lucas Lemos; ZUBIOLO, Claudia; NASCIMENTO, Juciara dos Santos; FREITAS, Lisiane dos Santos; RUZENE, Denise Santos; SILVA, Daniel Pereira. **Produção de biochar a partir da pirólise de resíduos agroindustriais**. SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DE SERGIPE, n. 25, p. 311-319, 2016. Disponível em: http://simprod.ufs.br/pagina/20298 . Acesso em: dez. 2024.

PHADTARE, P. AND KALBANDE, S. (2022). Biochar production technologies from agricultural waste, its utilization in agriculture and current global biochar market: a comprehensive review. **International Journal of Environment and Climate Change**, 1010-1031. 2022. https://doi.org/10.9734/ijecc/2022/v12i1131078.

RAWAT, J., SAXENA, J., & SANWAL, P. (2019). Biochar: a sustainable approach for improving plant growth and soil properties. **Uma Emenda Imperativa para o Solo e o Meio Ambiente**. https://doi.org/10.5772/intechopen.82151

REHMAN, I., RIAZ, M., ALI, S., ARIF, M., ALI, S., ALYEMENI, M., ALSAHLI, A. Evaluating the effects of biochar with farmyard manure under optimal mineral fertilizing on tomato growth, soil organic c and biochemical quality in a low fertility soil. **Sustainability,** 13(5), 2652. 2021. https://doi.org/10.3390/su13052652

SANTOS ,Débora Federici dos; ARAÚJO, Thiago Peixoto de; OSTROSKI, Indianara Conceição; BARROS, Maria Angélica Simões Dornellas de. Otimização da produção de biochar a partir de casca de tingui / Otimização da produção de biochar a partir da casca de tingui. **Revista Brasileira de Desenvolvimento** , v. 2, pág. 9602–9615, 2022.. Disponível em: https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/43790 . Acesso em: dez. 2024.

SANTOS, Luis Ricardo Oliveira; PIRES, Isis Cristina de Souza Adhmann; NAKASHIMA, Gabriela Tami; PADILHA, Elias Ricardo Durango; VARANDA, Luciano Donizeti; ALESI, Leticia Sant'anna; YAMAJI, Fábio Minory. Biochar de palha de Cana-de-Açúcar: Caracterização e Estudo do Processo. **Revista Virtual de Química**. v. 10, n. 4, 2018. Disponível em: http://rvq.sbq.org.br. Acesso em: dez. 2024.

SANTOS, M., SANTOS, C., & MOTTA, I. Resíduos orgânicos agroindustriais influenciam a produção de húmus e multiplicação de minhocas. **Revista Brasileira De Engenharia De Biossistemas,** ed. 15, p. 401-410, 2021. https://doi.org/10.18011/bioeng2021v15n3p401-410

SARI, N., ISHAK, C., & BAKAR, R. Characterization of oil palm empty fruit bunch and rice husk biochars and their potential to adsorb arsenic and cadmium. **American Journal of Agricultural and Biological Sciences,** 9(3), 450- 456. 2014. https://doi.org/10.3844/ajabssp.2014.450.456

SHOAF, N., HOAGLAND, L., & EGEL, D. Suppression of phytophthora blight in sweet pepper depends on biochar amendment and soil type. **Hortscience,** 51(5), 518-524. 2016. https://doi.org/10.21273/hortsci.51.5.518

SOLIDADE, L.; SOUZA, J.; SAMPAIO, G.; BRAGA, A.; ASSIS, F.; LEAL, P. Fermentação em estado sólido em resíduos agroindustriais para a produção de enzimas: uma revisão sistemática. T**he Journal of Engineering and Exact Sciences,** ed.4(2), p. 0181-0188, 2018. https://doi.org/10.18540/jcecvl4iss2pp0181-0188

SOUSA, M.; VIEIRA, L.; SILVA, M.; LIMA, A. Caracterização nutricional e compostos antioxidantes em resíduos de polpas de frutas tropicais. **Ciência E Agrotecnologia,** v. 35(3), p. 554-559, 2011. https://doi.org/10.1590/s1413-70542011000300017

SOUSA, S., SILVA, R., SILVA, O., OLIVEIRA, A., NOGUEIRA, L., LIMA, M., … & NUNES, J. Enriquecimento proteico do resíduo da goiaba (psidium guajava l.) por meio da fermentação semissólida. **Research Society and Development,** v. 10(14), p. e385101422050, 2021. https://doi.org/10.33448/rsd-v10i14.22050

SOUZA, L. Desempenho agronômico e avaliação econômica de composto orgânico que contém borra de café na adubação da cultura do milho. **Instituto Capixaba De**

Pesquisa Assistencia Tecnica E Extensao Rural, 13(14), p. 71-82, 2023. https://doi.org/10.54682/ier.v.13e14.p71.82

STROHER, Bruna.; SOUZA , Débora Machado de.; KAPPLER , . G. .; MORAES, C. A. M. . INFLUÊNCIAS DA TEMPERATURA DE PIRÓLISE NO pH, CONDUTIVIDADE E CTC NOS PRODUTOS DA PIRÓLISE DE AGRO RESÍDUOS. REVISTA FOCO, *[S. l.]*, v. 16, n. 02, p. e999, 2023. DOI: 10.54751/revistafoco.v16n2-111. Disponível em: https://ojs.focopublicacoes.com.br/foco/article/view/999. Acesso em: 18 dez. 2024.

TAN, Z., LIN, C. S. K., JI, X., RAINEY, T. J. Returning biochar to fields: A review. **Applied Soil Ecology,** 116, 1-11, 2017.

TANG, X., HUANG, W., GUO, J., YANG, Y., TAO, R., & FENG, X. Use of fe-impregnated biochar to efficiently sorb chlorpyrifos, reduce uptake by allium fistulosum l., and enhance microbial community diversity. **Journal of Agricultural and Food Chemistry,** 65(26), 5238-5243. 2017. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b01300

TAPPI. T 222 om-02. [s.l.] : Acid-insoluble lignin in wood and pulp **TAPPI**, 2002.

TAPPI. T 264 cm-97. [s.l.] : Preparation of wood for chemical analysis **TAPPI**, 1997.

UCELLA-FILHO, J. G. M. et al. Antiviral potential of bio-oil from Citrus sinensis waste wood as a therapeutic approach against COVID-19. **Journal of Cleaner Production,** v. 447, p. 141583, 1 abr. 2024.

VIEIRA, G.; PICKLER, A.; GALLO, L.; TEIXEIRA, L.; COLEN, A.; CAMPOS, C.; SILVA, R. Aplicação de processo termoquímico como aproveitamento de resíduo agroindustrial de babaçu. vol. 1 num. 2, 2015. **Blucher Chemical Engineering Proceedings.** Disponivel: https://doi.org/10.5151/chemeng-cobeq2014-1158-20741-181817. Acesso em: dez 2024.

WIGAN, Minajoy B. Impact of biochar application on chemical and microbial properties of soil. **International Journal of Multidisciplinary Applied Business and Education Research**, 4(7), 2503-2510. 2023. Disponivel: https://doi.org/10.11594/ijmaber.04.07.27. Acesso em: dez. 2024.

ZAITUN, Z., HALIM, A., SA'DAH, Y., & CAHYADI, R. Surface morphology properties of biochar feedstock for soil amendment. **Iop Conference Series Earth and Environmental Science,** 951(1), 012034. 2022. Disponivel: https://doi.org/10.1088/1755-1315/951/1/012034 .Acesso em: Jan. 2025

ZENNI, Rafaely dos Santos; HELM, Cristiane Vieira; TAVARES, Lorena Benathar Ballod. Cascas do processamento de palmito para uso na alimentação humana: uma abordagem socioambiental. **R. gest. sust. ambient**., Florianópolis, v. 7, n. 2, p.276-299, 2018. Disponivel: https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/6211/3757 Acesso em: Jan. 2025