

UTILIZAÇÃO DA PINHA DE PINHEIRO PARA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL POR PROCESSO DE PIRÓLISE

Gabriel Chaves Silva ¹
Mariana Consiglio Kasemodel ²
Erica Leonor Romão ³

Reciclagem e Gerenciamento de Resíduos

Resumo

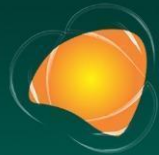
Os resíduos de biomassa estão disponíveis em diferentes fontes e atividades. Os resíduos de pinheiros, como as pinhas são produzidos como subproduto agroflorestral em todo o mundo, podendo ser utilizado como biocombustível na geração de energia. A produção de energia por fontes renováveis vem sendo incentivada, por ser uma fonte neutra de emissões de gases de efeito estufa. No Brasil, o plantio de pinus corresponde a 19% da área de árvores plantadas ocorrendo na sua maioria na região sul do país. Além da aplicação na área da energia, a biomassa também pode ser utilizada na produção de biocarvão como material adsorvente de contaminantes, por meio de processos termoquímicos, como a pirólise. Desta forma, este trabalho teve como objetivo avaliar o processo de pirólise, utilizando como biomassa a pinha do *Pinus taeda*, em três diferentes temperaturas (500 °C, 600 °C e 700 °C) com 30 minutos de reação para avaliação de suas características visando a geração de energia. As reações de pirólise realizada entre as réplicas, apresentaram comportamento similar indicando controle do processo. Verificou-se que o aumento da temperatura do processo ocasiona na redução da produção do biocarvão, tendo variado de 37,8 a 32,9 %. Os biocarvões produzidos tiveram redução da matéria volátil e aumento do carbono fixo alcançando 90,1% a 700 °C, ocasionando em um aumento do poder calorífico de 1,67 vezes em relação a biomassa bruta. Desta forma a produção de biocarvão, mostrou-se satisfatória, podendo ser utilizado como fonte de energia para a sustentabilidade do setor.

Palavras-chave: Biomassa; Resíduo; Processo Termoquímico; Bioenergia; Energia Renovável.

¹Discente em Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de Lorena, EEL/USP, gchavessilva2812@usp.br

² Profa. Dra. Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de Lorena, EEL/USP, Departamento de Ciências Básicas e Ambientais, marianakasemodel@usp.br

³ Profa. Dra. Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de Lorena, EEL/USP, Departamento de Ciências Básicas e Ambientais, ericaromao@usp.br



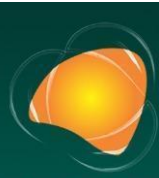
INTRODUÇÃO

A preservação do meio ambiente e dos recursos naturais tem sido uma preocupação mundial. O aumento populacional e da industrialização têm ocasionado em um aumento na geração de resíduos, que muitas vezes são destinados de formas inadequadas, prejudicando o ecossistema e os recursos naturais necessários para o desenvolvimento sustentável. A biomassa, como os resíduos florestais, agrícolas, resíduos sólidos urbanos, dejetos animais, etc., vem apresentando algumas vantagens por serem materiais lignocelulósicos obtidos de fontes renováveis e de baixo custo, podendo ser utilizado como biocombustíveis ou material adsorvente, sendo uma alternativa sustentável e econômica em relação aos carvões ativados (Yaahikaa et al., 2020).

A biomassa quando utilizada em processos termoquímicos, como a pirólise, geram três produtos: o biocarvão produto sólido, também conhecido como biochar, uma fração de gás e outra de líquido (bio-óleo). No âmbito das tecnologias termoquímicas a pirólise da biomassa destaca-se como uma abordagem eficiente, caracterizada por uma elevada taxa de conversão de energia e facilidade operacional no processo de transformação da biomassa em produtos energéticos utilizáveis (Qui et al., 2022). O biocarvão produzido pode ser utilizado na geração de energia (Qin et al., 2020; Iglinski et al., 2023), como material na adsorção de contaminantes (Chen, et al., 2016), corretivo em solos (Blanco-Canqui, 2020), entre outras aplicações.

A rota de processo termoquímico é promissora no tratamento da biomassa lignocelulósica gerando produtos rico em carbono e energia, aumentando o teor de carbono, densidade de energia e porosidade do biocarvão. No entanto, os rendimentos e as características do biocarvão sofrem alterações em função do tipo de biomassa, tamanho de partícula, variações de temperatura e tempo do processo (Manya et al., 2014), sendo importante seu estudo para comparação e avaliação dos dados.

No cenário mundial, a bioenergia moderna atua como a principal fonte de energia renovável, contribuindo com 55% da energia renovável e representando mais de 6% do fornecimento total de energia no mundo. O cenário "Net Zero Emissions by 2050" (NZE) prevê um rápido aumento no emprego da bioenergia para substituir os combustíveis fósseis até 2030. Entre 2010 e 2022, o uso da bioenergia moderna registrou, em média, um aumento anual de cerca de 3%, mantendo uma trajetória



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

ascendente (IEA, 2023), estando as energias renováveis com cerca de 12% das fontes energéticas mundiais.

No Brasil a área de árvores plantadas em 2022 foi de 9,94 milhões de hectares, sendo 76% da área plantada de eucalipto, 19% de pinus (1,9 milhão de hectares) e 5% de outras espécies. O plantio com pinus ocorre na região sul do país com 89%, sendo na sua maioria no estado do Paraná e Santa Catarina, 10% no Sudeste e 1% em outras regiões (Indústria brasileira de árvores, IBA, 2023).

O *Pinus taeda* tem sua origem nos Estados Unidos, sendo introduzido no Brasil em 1948 para plantação florestal. O *Pinus taeda* é um pinheiro do grupo coníferas resinosas da família *Pinaceae* que possui folhas agrupadas com 3 agulhas (acículas) e produzem a pinha, estróbilo feminino, de formato em cone resistente com escamas espinhosas (Figura 1). As pinhas são utilizadas como objeto de decoração no natal (Marchini, 2015). A árvore pinus é importante economicamente, possuindo 105 espécies identificadas. A madeira de pinus é utilizada em serrarias para produção de painéis de madeira, produção de celulose, móveis, fins energéticos etc. A árvore também produz resina utilizadas como selante, cola e verniz (Ferreira-Santos et al., 2020).



Figura 1: Árvore (pinheiro) *Pinus taeda*.



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

No Brasil, inicialmente, o *Pinus taeda* foi utilizado para fins ornamentais, somente a partir de 1960 começou o plantio em escala comercial, principalmente na região sul (Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul) e sul do estado de São Paulo (Embrapa floresta, s/d). O reflorestamento de pinus é bem visto por ser versátil e possuir celulose de fibra longa obtendo um papel de qualidade superior, motivo esse que representa 30% das plantações florestais destinadas à produção de papel e celulose.

Destaca-se a presença de mais de 1,6 milhões de hectares de plantações de pinus, concentradas principalmente nos estados do Paraná e Santa Catarina, com o *Pinus taeda* assumindo o papel de espécie dominante (Tomazello Filho et al., 2017). Nas regiões onde são encontradas naturalmente, as árvores da espécie *Pinus taeda* têm potencial para alcançar um diâmetro de tronco de até 152 cm e atingir uma altura total de 45 m.

Esse trabalho teve como objetivo avaliar o potencial da pinha do pinheiro *Pinus taeda*, como biocombustível pelo processo de pirólise, verificando-se o rendimento dos produtos da pirólise e as características do biocarvão em três faixas de temperatura 500 °C, 600 ° e 700°C e tempo de reação de 30 minutos.

Espera-se com este trabalho contribuir para o desenvolvimento científico, a partir de uma situação real de geração de resíduo, podendo transformá-lo em um produto com qualidade para promoção da sustentabilidade no setor.

METODOLOGIA

PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

A pinha do pinheiro da espécie *Pinus taeda* foi coletada na cidade de São Paulo, sendo acondicionado em sacos para esse trabalho. A pinha na forma “como recebida” foi moída em moinho de facas, com peneira de 9 mm e acondicionada em sacos plásticos para utilização nas reações (Figura 2).

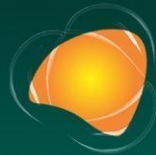


Figura 2: Pinha bruta e moída (Fonte: Autoria própria).

PROCESSO TERMOQUÍMICO

O processo de pirólise da biomassa foi realizado em reator de laboratório com capacidade da ordem de 300 gramas de biomassa por batelada e com fluxo de gás nitrogênio para manter uma atmosfera inerte. Baseado em uma revisão de artigos, foi escolhido três temperaturas para ensaio (500 °C, 600 °C e 700 °C) no tempo de 30 minutos, para o processo. Essas temperaturas também são utilizadas para análise do biocarvão como material adsorvente.

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

As amostras de pinha moída e biocarvão em cada reação foram analisadas quanto ao teor de umidade e densidade aparente, conforme descrito a seguir:

- **Teor de Umidade (TU)**

A determinação do teor de umidade foi realizada antes do processo de pirólise. Uma porção de 300 gramas de material úmido foi adicionada em um porta amostra e logo, o mesmo foi colocado em uma estufa à temperatura de 105°C, por 24 horas, ou até atingir peso constante. Após a secagem do material, o porta amostra segue para o dessecador para esfriar e pesar novamente para o cálculo do teor de umidade, de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 14929:2017 e calculado conforme Eq. 1.

$$\text{Teor de Umidade (TU \%)} = \frac{BU - BS}{BU} \times 100 \quad (1)$$

Onde: BU = Base Úmida da amostra, em gramas; BS = Base Seca da amostra, em gramas.



- **Densidade aparente (DA)**

A densidade aparente foi realizada de acordo com a norma europeia EN 15103:2009. Utilizou-se um recipiente cilíndrico com volume conhecido, a amostra é colocada no recipiente até a sua borda, pesando-se a amostra em balança semi-analítica com precisão de 0,01 g. A determinação foi realizada em cinco réplicas (n=5) e calculada conforme Equação 2

$$\text{Densidade aparente (DA)} = \frac{m \text{ (kg)}}{V \text{ (m}^3\text{)}} \quad (2)$$

Onde: m = massa, em quilogramas; V = volume em metros cúbicos

- **Ensaio de granulometria**

A determinação do tamanho de partículas tem como objetivo avaliar a porcentagem, em peso, da amostra em cada abertura de peneira utilizada. A análise foi realizada em duplicata, com agitação das peneiras no tempo de 10 minutos e frequência de 5 Hz.

- **Análise imediata**

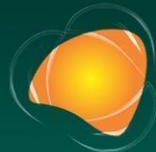
Dados como teor de umidade (ASTM D3173), cinzas (ASTM D3174), material volátil e carbono fixo (ASTM D3175) foram analisados segundo a norma American Society for Testing & Materials (ASTM) para caracterizar o biocarvão nas diferentes condições de processo.

- **Poder calorífico**

O poder calorífico superior (PCS) de um biocombustível é determinado por meio de uma bomba calorimétrica. Devido ao custo da análise, o poder calorífico superior foi estimado utilizando a fórmula de Parikh et al., (2005) através dos dados da análise imediata aplicando a Equação (3).

$$\text{PCS (MJ/kg)} = (0,3536 \times \text{CF}) + (0,1559 \times \text{MV}) - (0,0078 \times \text{Cz}) \quad (3)$$

Onde: PCS = poder calorífico superior, CF = carbono fixo, VM = matéria volátil, CZ = cinzas, todos expressos em porcentagem em base seca



RESULTADOS E DISCUSSÃO

A amostra de pinha moída apresentou tamanhos de partículas conforme Figura 3.

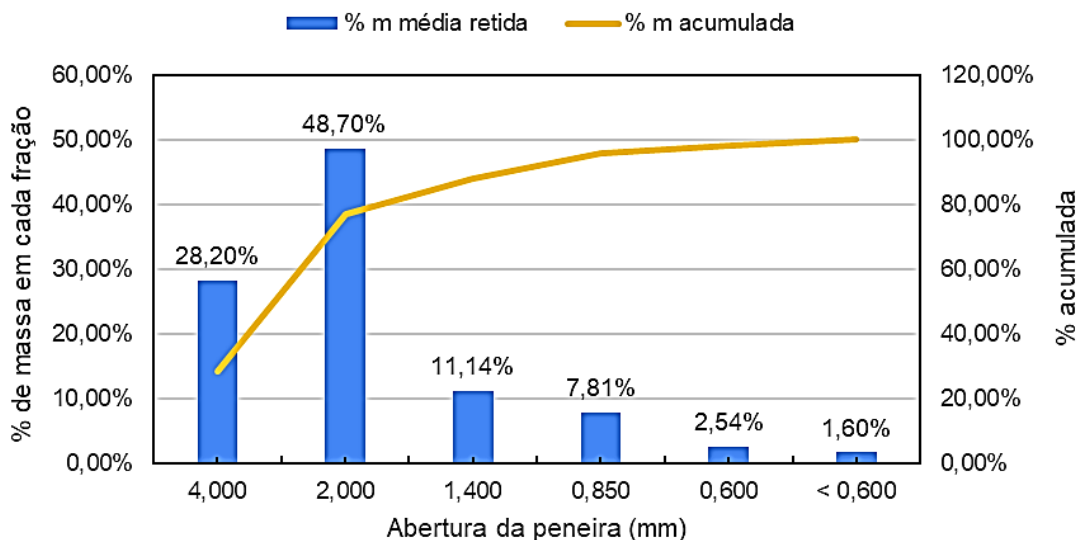


Figura 3: Distribuição granulométrica da pinha moída (9 mm). Fonte: Autoria própria.

É possível notar que a maior quantidade de massa (48,70%) possui tamanho de partícula entre < 4 mm e > 2 mm, e 88,00% tamanho de partícula maior que 1,40 mm. Tamanho esse próximo ao utilizado por Boutaieb et al. (2019 e 2020). Optou-se por trabalhar com esse tamanho para facilitar o processo de moagem no processo industrial.

PROCESSO TERMOQUÍMICO

Durante o processo de pirólise, é feito o acompanhamento da temperatura sendo esta etapa dividida em duas etapas: etapa de aquecimento, quando atinge a temperatura desejada e etapa de reação, quando inicia-se a contagem do tempo da reação. As reações foram realizadas em triplicatas, como pode ser visto na Figura 4, o perfil de temperatura das reações de pirólise da pinha na temperatura de 500 °C e tempo de reação de 30 minutos, identificada como Biochar Pine Cone (BPC) seguida da temperatura e tempo de reação.

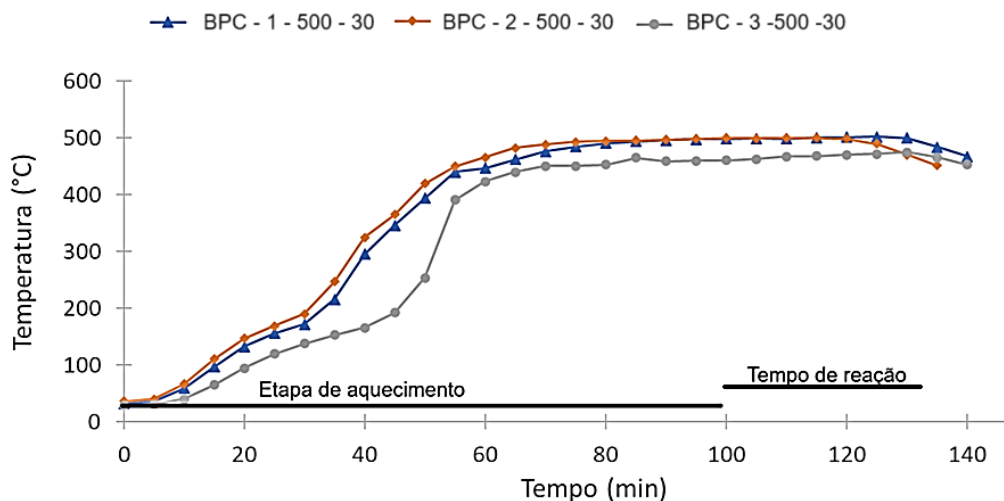
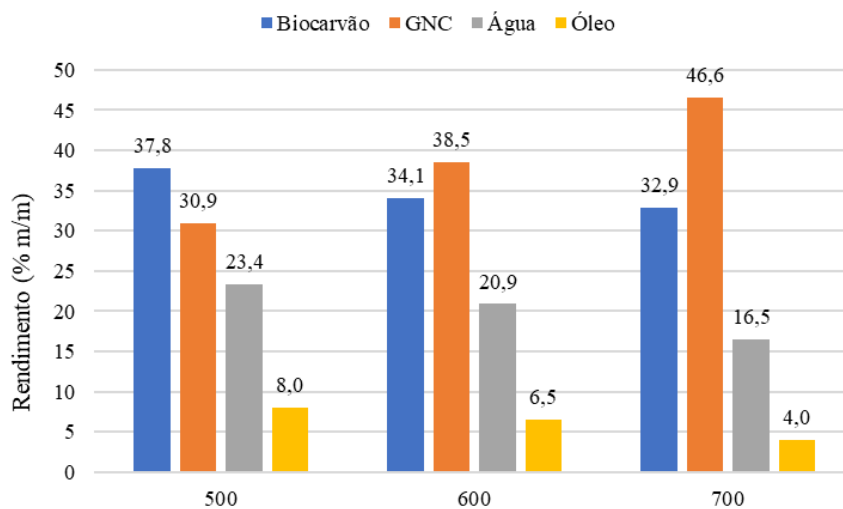


Figura 4: Perfil de temperatura das reações de 500 °C a 30 minutos. (Fonte: Autoria própria).

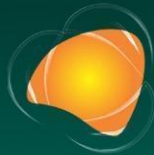
A etapa de aquecimento levou cerca de 100 minutos para atingir a temperatura de 500 °C e para então iniciar a reação, sendo mantida nessa temperatura por 30 minutos, tempo este definido para a reação de pirólise. A temperatura máxima atingida no processo foi de 502 °C. Após atingirem o pico, as temperaturas permanecem em torno de 500 °C.

A Figura 5 apresenta a distribuição da média dos produtos obtidos no processo de pirólise.



Obs.: Gases não condensáveis (GNC)

Figura 5: Rendimento médio dos produtos da pirólise nas diferentes temperaturas. (Fonte: Autoria própria).



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

Observa-se que o rendimento do biocarvão variou de 37,8 % a 32,9 % e a fração da água e óleo reduziram com o aumento da temperatura de pirólise, enquanto que a fração de gases não condensáveis (GNC) aumentou de 30,9 % a 46,6 %. Isso ocorre devido a degradação dos componentes majoritários da biomassa (celulose, hemicelulose e lignina) que são afetados pela temperatura do processo (Romão e Conte, 2021), levando a uma perda de massa da pinha de 67,1% na temperatura de 700 °C.

CARACTERÍSTICAS TERMOQUÍMICAS

Após o processo de pirólise, o biocarvão produzido reduziu de 76,6 % para 7,1% de material volátil nas temperaturas ensaiadas, enquanto o teor de cinzas aumento de 1,0% na pinha bruta para 2,7% devido a redução da fração orgânica no biocarvão. Com a redução do material volátil, o carbono fixo aumentou significativamente, alcançando 90,1% em 700 °C, colaborando com o aumento do poder calorífico dos biocarvões que variam de 30,7 a 33,0 MJ/kg (Figura x)

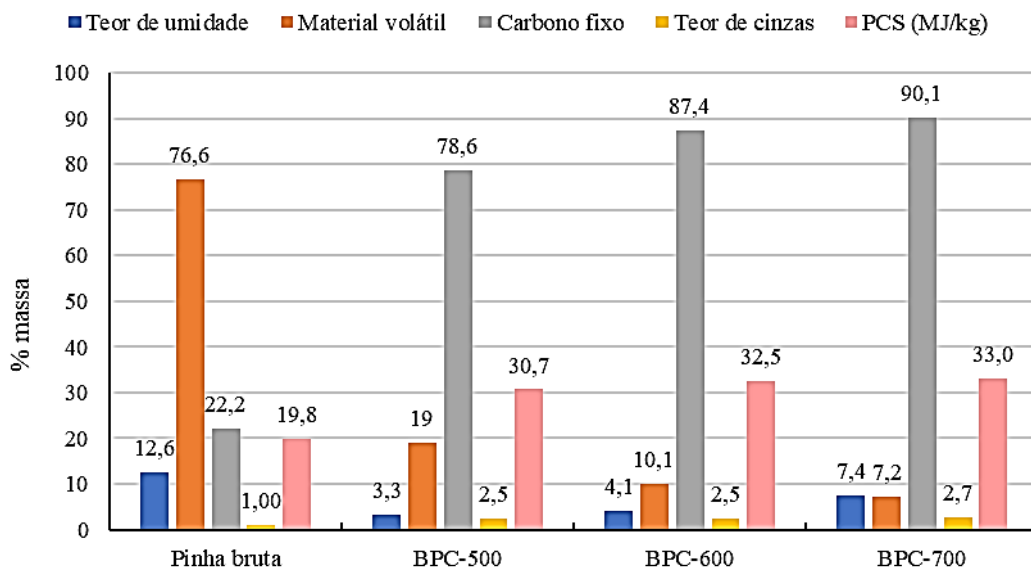


Figura 6: Análise imediata e poder calorífico superior. (Fonte: Autoria própria)



CONCLUSÃO

O biocarvão produzido por processo de pirólise, a partir da pinha do pinheiro *Pinus taeda*, apresentou variação dos produtos do processo em função da temperatura trabalhada (500 °C, 600 °C e 700°C). Nestas condições, o poder calorífico do biocarvão a 700 °C aumentou 1,7 vezes em relação a biomassa bruta, com uma redução de massa de 67,1%.

Desta forma a utilização da pinha como biocombustível torna uma opção atrativa para sustentabilidade no setor, fortalecendo a economia circular, incentivando o plantio e utilização dos seus resíduos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Pró-Reitoria de Graduação da Universidade de São Paulo (PRG-USP) pela bolsa concedida através do Programa Unificado de Bolsas (PUB).

REFERÊNCIAS

BLANCO-CANQUI, H.; LAIRD, D.A.; HEATON, E.A.; RATHKE, S.; ACHARYA, B.S. Soil carbon increased by twice the amount of biochar carbon applied after 6 years: field evidence of negative priming. *Glob. Change Biol. Bioenergy*, 12, 240-251, 2020.

BOUTAIEB, M.; GUIZA, M. ROMÁN; S. NOGALES, S.; LEDESMA, B. OUEDERNI, A. Pine cone pyrolysis: Optimization of temperature for energy recovery. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 39, 1, 13272, 2020.

CHEN, D.; CHEN, X.; SUN, J.; ZHENG, Z.; FU, K. Pyrolysis polygeneration of pine nut shell: Quality of pyrolysis products and study on the preparation of activated carbon from biochar. *Bioresource Technology*, 216, 629-636, 2016.

EMBRAPA FLORESTA, Transferência de tecnologia florestal, s/d. Disponível em: <https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/pinus/perguntas-e-respostas>. Acesso em: 09 jun. 2023.

FERREIRA-SANTOS, P.; ZANUSO, E.; GENISHEVA, Z. ROCHA, C.M.R.; TEIXEIRA, J.A. Green and sustainable valorization of bioactive phenolix compounds from Pinus by-products. *Molecules*, 25, 12, 2931, 2020.



EXTREMOS CLIMÁTICOS: **IMPACTOS ATUAIS** E RISCOS FUTUROS

IBA. INDUSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório Anual, 2023. Disponível em:
<https://www.iba.org/>. Acesso em: 15 abr. 2024.

IEA (2023), Tracking Clean Energy Progress 2023, IEA, Paris. Disponível em:
<https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023>. Acesso em: 08 maio de 2024.

IGLINSKI, B.; KUJAWSKI, W.; KIELKOWSKA, U. Pyrolysis of Waste Biomass– Technical and Process Achievements, and Future Development–A Review, *Energies* 16, 4, 1829, 2023.

MANYA, J.J. ORTIGOSA; M.A.; LAGUARTA, S.; MANSO, J.A. Experimental study on the effect of pyrolysis pressure, peak temperature, and particle size on the potential stability of vine shoots-derived biochar. *Fuel*, 133, 163-172, 2014.

QIN, L.; WU, Y.; HOU, Z. JIANG, E. Influence of biomass components, temperature and pressure on the pyrolysis behavior and biochar properties of pine nut shells. *Bioresource Technology*, 313, 123682, 2020.

QIU, B.; TAO, X.; WANG, J.; LIU, Y.; LI, S.; CHU, H. Research progress in the preparation of high-quality liquid fuels and chemicals by catalytic pyrolysis of biomass: A review. *Energy Conversion and Management*, 261, 115647, 2022.

ROMÃO, E. L.; CONTE, R. A. Energy gains of *Eucalyptus* by torrefaction process. *Maderas, ciencia y tecnología*, 23, 3, 1-6, 2021.

TOMAZELLO FILHO, M. et al. Avaliação da Dispersão de Sementes de *Pinus taeda* L. pela Análise dos Anéis de Crescimento de Árvores de Regeneração Natural. *Floresta e Ambiente*, v. 24, n. 0, 2017.

YAASHIKAA, P. R.; KUMAR, P. S.; VARJANI, S.; SARAVANAN, A. A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. *Biotechnology Reports*, 28, 2020.