

Caracterização energética: *Citrus sinensis* e *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*

Tauana de Souza Mangini¹; Amanda Thayana da Silva Costa¹; Cibelle Amaral Reis¹;
Daniela Minini¹; Claiton Nardini²; Fernando Augusto Ferraz¹

¹Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba/PR, Brasil; ²Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba/PR, Brasil – tauanamangini@yahoo.com

Resumo: A demanda por fontes energéticas sustentáveis e alternativas aos combustíveis fósseis evidencia a biomassa florestal como uma opção promissora nesse cenário. Este estudo visa determinar e comparar o poder calorífico de *Citrus sinensis* e do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (*Eucalyptus urograndis*). Foram utilizadas amostras coletadas das porções do tronco, casca e galhos para determinação do poder calorífico superior e inferior e a sua relação com o teor de umidade. Os valores de poder calorífico superior e inferior foram semelhantes em ambas as espécies. As amostras de casca de ambas as espécies apresentaram resultados inferiores quando comparados aos demais porções. Em *Citrus sinensis* o maior poder calorífico inferior foi no galho (18,05 MJ kg⁻¹), enquanto em *Eucalyptus urograndis* ocorreu no tronco (17,83 MJ kg⁻¹). Portanto, *Citrus sinensis* apresenta potencial para fins energéticos e há uma relação inversamente proporcional entre poder calorífico e teor de umidade.

Palavras-chave: Energia da biomassa, Eucalipto, Laranjeira, Poder calorífico.

Energetic characterization: *Citrus sinensis* and *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*

Abstract: The demand for sustainable energy sources as an alternative to fossil fuels highlights forest biomass as a promising option in this scenario. Therefore, this study aims to determine and compare the calorific values of *Citrus sinensis* and the *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* hybrid (*Eucalyptus urograndis*). Samples collected from the stem, bark and branch portions were used to determine the gross and net calorific values and their relationship to moisture content. The gross and net calorific values were similar for both species. The bark of both species showed lower results when compared to the other portions. In *Citrus sinensis*, the highest net calorific value was found in the branch (18.05 MJ kg⁻¹), while in *Eucalyptus urograndis* it was found in the stem (17.83 MJ kg⁻¹). Thus, *Citrus sinensis* has potential for energy purposes and there is an inversely proportional relationship between calorific value and moisture content.

Keywords: Biomass energy; *Eucalyptus*; Orange tree, Calorific value.

1. INTRODUÇÃO



Engenharia
Industrial
UFPEL
Madeireira



SOCIEDADE BRASILEIRA
DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DA MADEIRA

A crescente demanda por recursos e a mudança da visão da sociedade para

um viés sustentável evidenciou a necessidade da conscientização e mudança em relação à finitude e impacto dos recursos energéticos. Na atualidade, a maior parte das fontes de energia são provenientes de combustíveis fósseis (Ritchie *et al.*, 2020), que são poluentes e com estoque global finito em um horizonte de médio a longo prazo, o que motivou a intensificação da busca por fontes alternativas de energia nas últimas décadas (Assunção; de Deus, 2022). No Brasil, as fontes renováveis perfizeram 49,1% da oferta interna em 2023, em que cerca de 8,6% correspondem à madeira e carvão vegetal (Brasil, 2024), sendo a madeira uma das formas mais tradicionais e amplamente disponíveis (Silva *et al.*, 2015; Simioni *et al.*, 2017).

A caracterização da madeira permite a sua melhor destinação, contribuindo para o seu uso racional e sustentável, além do emprego de uma matéria-prima de qualidade energética, impactando na sua preferência pelo consumidor final. Dentre as espécies florestais mais utilizadas no Brasil para fins energéticos pode-se citar as do gênero *Eucalyptus* provenientes de plantios, valorizado pela sua ampla aplicação e propriedades energéticas (IBÁ, 2023).

Além das florestas plantadas, algumas outras culturas lenhosas desempenham um papel significativo na economia brasileira, como a laranjeira (*Citrus sinensis*). O Brasil é o maior produtor mundial de laranja e seus derivados, como o suco concentrado e congelado, polpa de fruta, doces em calda, fruta cristalizada, fermentados alcoólicos e acéticos (Cypriano *et al.*, 2017).

Após o fim do seu ciclo produtivo, de aproximadamente 20 anos as árvores de *C. sinensis* não são mais utilizadas pela indústria alimentícia, sendo cortadas e consideradas como resíduo (Mergulhão, 2018). Portanto, é de grande interesse a destinação deste material para outros fins, objetivando uma boa gestão de resíduos dessas plantações. Uma das aplicações, além da função industrial, é a fabricação de carvão e/ou lenha, especialmente para churrasco, finalidade já amplamente empregada para madeira de citrus no sul do Brasil, por exemplo. Isto deve-se ao aroma marcante e à qualidade da brasa que espécimes de frutíferas, como o citrus, produzem e que confere um sabor característico à carne (Aranha, 2021; Devi; Sumithra, 2023).

Esse uso cultural regional resalta a relevância da madeira de laranjeira e a importância de entender seu potencial calorífico, não apenas para fins energéticos,

mas também para diversas aplicações. Diante desse cenário, o objetivo do trabalho foi realizar a caracterização energética das madeiras de *Citrus sinensis* e *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* a partir do poder calorífico das porções tronco, casca e galho, principalmente afim de ampliar as aplicações da madeira de laranjeira.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Foram amostradas 10 árvores de laranjeira (*Citrus sinensis*, entre 20 e 25 anos) proveniente de plantio comercial, e 3 árvores do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* (*Eucalyptus urograndis*, 17 anos) provenientes de um plantio florestal. Para cada árvore, foi coletado um disco da madeira do tronco (porção que também será referido apenas como tronco) e um disco da madeira de galho, enquanto que a casca teve seu material proveniente de ambos os discos.

Após a perda inicial de umidade, as amostras foram moídas utilizando-se um moinho de facas e classificadas em peneira de 60 *mesh*. Posteriormente, o material foi seco em estufa de circulação de ar a uma temperatura a 103 ± 2 °C até atingir massa constante.

Das árvores coletadas foi realizada uma amostra composta e homogênea para cada porção. A determinação do Poder Calorífico Superior (PCS) das diferentes porções avaliadas na base seca, foi obtida utilizando a bomba calorimétrica IKA Werke C5000, com princípio de funcionamento adiabático, de acordo com a norma técnica ISO 18125 (2017). As análises de poder calorífico superior foram realizadas em triplicata. Para o cálculo do Poder Calorífico Inferior (PCI) na base seca foi utilizada a Equação 1. O teor de hidrogênio de 6% foi utilizado no cálculo, valor comumente encontrado para biomassas lignocelulósicas (Cortez *et al.*, 2006).

(1)

Em que: PCI = poder calorífico inferior (MJ kg^{-1}); PCS = poder calorífico superior (MJ kg^{-1}); H = teor de hidrogênio (%)

Para construir a projeção do Poder Calorífico Inferior na base como recebida (PCI_{ar}) em função do teor de umidade foi utilizada a Equação 2, possibilitando analisar a relação entre essas duas propriedades por meio de regressão linear

simples.

(2)

Em que: PCI_{ar} = poder calorífico inferior na base recebida ($MJ\ kg^{-1}$), PCI = poder calorífico inferior na base seca ($MJ\ kg^{-1}$); U = teor de umidade na base úmida (%).

A partir dos valores de umidade e poder calorífico, foi realizado o teste de Bartlett para verificar homogeneidade dos dados, e posteriormente realizado o teste de análise de variância a 5% de probabilidade de erro por meio do *software* Assistat 7.7. Quando verificado diferença foi aplicada o teste de média Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro. Para determinar a relação entre poder calorífico inferior e teor de umidade foi realizado uma regressão linear simples com auxílio do *software* gráfico *Originlab 2018*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados referentes à caracterização energética das biomassas provenientes das porções tronco, casca e galho das espécies *Citrus sinensis* e *Eucalyptus urograndis* estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Poder calorífico proveniente das porções tronco, casca e galho das árvores de *C. sinensis* e do híbrido de *E. urograndis*

Espécie	Porções		
	PCI ($MJ\ kg^{-1}$)		
	Tronco	Casca	Galho
<i>Citrus sinensis</i>	17,41($\pm 0,12$) bB	15,24($\pm 0,05$) aC	18,05($\pm 0,25$) aA
<i>Eucalyptus urograndis</i>	17,83($\pm 0,19$) aA	15,07($\pm 0,08$) aC	17,13($\pm 0,15$) bB
	PCS ($MJ\ kg^{-1}$)		
<i>Citrus sinensis</i>	18,64($\pm 0,19$) bB	16,48($\pm 0,08$) aC	19,28($\pm 0,15$) aA
<i>Eucalyptus urograndis</i>	19,07($\pm 0,12$) aA	16,31($\pm 0,05$) aC	18,37($\pm 0,25$) bB

Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro. Números entre parênteses representam o desvio padrão; letras minúsculas na coluna comparam cada porção entre as espécies; letras maiúsculas na linha comparam as porções dentro de cada espécie. PCI = poder calorífico inferior; PCS = poder calorífico superior. Resultados na base seca.

A partir da análise, notou-se que os resultados do PCI e PCS apresentaram o mesmo comportamento tanto para *C. sinensis* como *E. urograndis*, em todas as porções (tronco, galho e casca). Ao comparar os poderes caloríficos superior e inferior entre as espécies, observa-se que houve diferença significativa apenas para as porções de tronco e galho, porém sendo não significativo para a casca.

Ao comparar cada porção isolada entre o *C. sinensis* e o *E. urograndis*, observa-se que os resultados dos poderes caloríficos para o tronco foram superiores para o *E. urograndis*, com valores de 17,83 e 19,07 MJ kg⁻¹ para PCI e PCS, respectivamente. Enquanto para o tronco de *C. sinensis* resultaram em PCI de 17,41 e PCS de 18,64 MJ kg⁻¹.

Resultados semelhantes foram identificados por Carneiro *et al.* (2014) e Eufrede Junior (2015) ao estudarem o PCS para o híbrido *E. urograndis* com valores médios de 19 MJ kg⁻¹ e 18,9 MJ kg⁻¹, respectivamente. O mesmo é válido para Barreiros *et al.* (2021) que identificaram valor de PCS igual 18,13 MJ kg⁻¹ para *E. urograndis* com aproximadamente 7 anos.

Para *Citrus sinensis*, Dias *et al.* (2024) analisaram indivíduos de aproximadamente 30 anos e obtiveram PCS superior a 19 MJ kg⁻¹ para madeira de tronco, e valores próximos a 14 MJ kg⁻¹ para casca, números semelhantes e inferiores, respectivamente, aos observados neste trabalho. O valor médio de PCS de galhos de *C. sinensis* deste estudo assemelha-se ao observado por Gutiérrez-Acosta *et al.* (2021) que obtiveram o valor de 20,2 MJ kg⁻¹ para galhos de *C. sinensis*.

Os poderes caloríficos dos galhos apresentaram comportamento distinto quando comparado ao tronco. Neste estudo, o poder calorífico do galho da *C. sinensis* foi significativamente superior à do galho de *E. urograndis*, resultando em uma diferença de 0,91 MJ kg⁻¹. O PCI e PCS do galho foram de 18,05 e 19,28 MJ kg⁻¹ para *C. sinensis*, enquanto para *E. urograndis* resultaram em 17,13 e 18,37 MJ kg⁻¹, respectivamente.

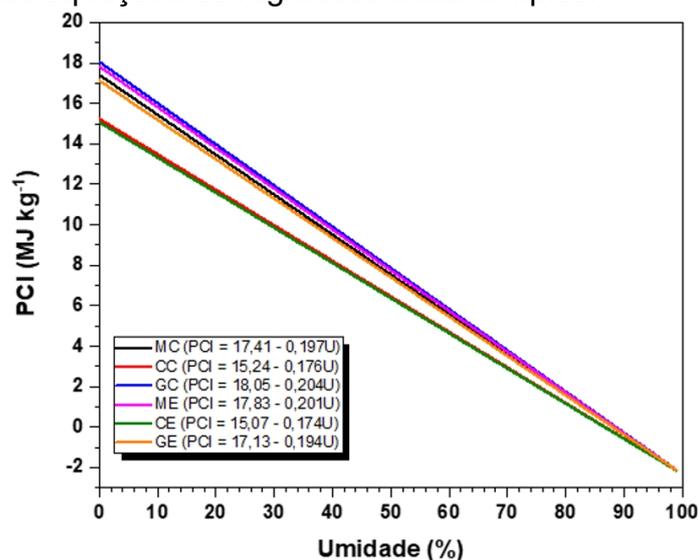
O comportamento do poder calorífico entre as porções para ambas as espécies apresenta diferença significativa entre os valores. Contudo, para *C. sinensis*, a maior energia foi identificada nos galhos, seguida do tronco e por fim a casca. Por sua vez, o maior poder calorífico para *E. urograndis* foi identificado no tronco, seguido do galho e da casca.

Esses comportamentos podem estar relacionados a diversos fatores, incluindo a estrutura dos tecidos e a composição química das espécies, como o teor de lignina, substância que possui um poder calorífico mais alto se comparado com a celulose e a hemicelulose. Assim, se os galhos possuírem mais lignina, seu poder calorífico pode ser superior em decorrência disto.

A densidade pode influenciar diretamente o poder calorífico já que este último se refere à quantidade de energia disponível por unidade de volume. Dessa forma, madeiras com maior densidade geralmente contém maior percentual de matéria orgânica por unidade de volume, o que influencia positivamente no poder calorífico (Pinto *et al.*, 2015). Nota-se ainda que em ambas as espécies a casca apresentou resultados inferiores as demais porções, algo também relatado por Watzlawick *et al.* (2020) ao estudarem *E. benthamii*. Esta diferença entre o PCS da casca e da madeira de tronco também foi reportada por Brand (2010) e Couto *et al.* (1984). De acordo com Watzlawick *et al.* (2020), geralmente o PCS da casca é superior ao da madeira de tronco, porém, algumas espécies não apresentam este comportamento. Esta diferença está relacionada aos compostos orgânicos que variam dependendo da espécie (Brand, 2010) e ambiente de cultivo.

Na Figura 2 está representado o comportamento da relação energética das biomassas provenientes das espécies estudadas em função do teor de umidade.

Figura 2. Relação entre o poder calorífico inferior e o teor de umidade das amostras com as respectivas equações de regressão linear simples.



Em que: PCI = poder calorífico inferior; U = umidade; MC = madeira do tronco de *Citrus sinensis*; CC = casca *Citrus sinensis*; GC = madeira de galho de *Citrus sinensis*; ME = madeira do tronco de *E. urograndis*; CE = casca de *E. urograndis*; GE = madeira de galho de *E. urograndis*.

Ajustou-se uma equação para cada porção e espécie para verificar a relação de PCI e o teor de umidade. Nota-se que o PCI decresce com o aumento do teor de umidade, apresentando variação de forma linear. Watzlawick *et al.* 2020, ao estudar *E. benthamii*, também observaram que estas propriedades são inversamente proporcionais. Isto explica-se pelo fato de que quanto maior o conteúdo de umidade

da madeira, menor é o seu poder de combustão devido ao processo de evaporação da umidade, que absorve energia em combustão (Cunha *et al.*, 1989).

Ademais, destaca-se a pouca diferença no poder calorífico das espécies *C. sinensis* e *E. urograndis*, o que pode ser um indicador do potencial energético de citrus, já que *E. urograndis* é um híbrido melhorado para expressar as propriedades da madeira voltadas para a produção de carvão vegetal, objetivo distinto do *C. sinensis* estudado. Por fim, deve-se avaliar o preço e o teor de umidade em que estas matérias-primas estão disponíveis, pois a madeira de laranjeira ou outras frutíferas podem ter valores mais baixos do que algumas madeiras de eucalipto (Mendes e Figueiredo, 2012), resultando em melhor custo-benefício.

4. CONCLUSÃO

Pode concluir-se com a realização deste trabalho que:

- A madeira dos galhos do *Citrus sinensis* fornece maior quantidade de energia, enquanto que para *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* isto ocorre na madeira do tronco;
- Em valores absolutos, o poder calorífico de *Citrus sinensis* é semelhante ao do *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, sendo inclusive superior para a porção dos galhos, apresentando assim potencial energético para substituí-lo.
- O poder calorífico é diretamente influenciado pelo teor de umidade da madeira.

5. REFERÊNCIAS

ARANHA, C. **Segredo do churrasco: lenha de laranjeira e outras madeiras valorizam sabor da carne.** Site Exame. Disponível em:<
<https://exame.com/casual/segredo-do-churrasco-lenha-de-laranjeira-e-outras-madeiras-valorizam-sabor-da-carne/>>. Acesso em 19 de julho de 2024.

BARREIROS, R. M.; RIBEIRO, G. P.; DIAS, K. B.; *et al.* Potencialidade energética da madeira de três espécies de eucalipto. **Recursos naturais: energia de biomassa florestal**, v. 1, p. 146-164, 2021.

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

BRASIL. Balanço Energético Nacional (BEN) Relatório Síntese 2024, ano base 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico->

715/BEN_S%C3%ADntese_2024_PT.pdf. Acesso em: 29 de julho de 2024.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para Energia**. Campinas:Unicamp, 2008.

COUTO, H. T. Z.; BRITO, J. O.; TOMAZELLO FILHO, M. **Quantificação de resíduos florestais para produção de energia em povoamento de *Eucalyptus saligna***. São Paulo: Série Técnica IPEF, p. 19-23, 1984.

CUNHA, M. P. S. C.; PONTES, C. L. F.; CRUZ, I. A.; *et al.* Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras. *In: 3º ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA: Anais*, v. 2, São Carlos, 1989. p. 93-121.

CYPRIANO, D. Z.; SILVA, L. L.; MARINO, M. A.; *et al.* A biomassa da laranja e seus subprodutos. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 1, nov. 2016.

DE ASSUNÇÃO, W. B. M.; DE DEUS, R. J. A. O uso de recursos naturais e os impactos no meio ambiente: revisão sistemática. **Revista Ouricuri**, v. 12, n. 2, p. 1-21, 2022.

DEVI, M. M.; SUMITHRA, M. The Study of Total Organic Carbon Content (TOC) In Various Natural Charcoals. **International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM)**, v. 5, n. 9, p. 175-181, 2023.

DIAS, L. C.; GUIMARÃES, D.; DIAS JÚNIOR, A. F.; OLIVEIRA, M. P. Technical Feasibility Study of Orange Wood Residues (*Citrus sinensis*) for Bioenergy Generation. **Energies**, v. 17, n.12, 3056, 2024.

EUFRADE JUNIOR, H. de J. **Caracterização físico-química da biomassa produzida em sistemas florestais de curta rotação para geração de energia**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrônômicas) – Universidade Estadual Paulista, Butucatu, São Paulo, 2015.

GUTIÉRREZ-ACOSTA, J. M.; ORIHUELA-EQUIHUA, R.; PINTOR-IBARRA.; *et al.* On the basic chemical composition of selected biomass types from four regions of Mexico, for bioenergetic purposes. **BioResources**, v. 16, n. 3, p. 5694, 2021.

IBÁ – **Indústria Brasileira de Árvores: Anuário estatístico 2023**. Brasília, 2023. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>>.

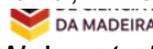
MENDES, G. F.; DE PAULA, N. F. Utilização de madeira para produção de energia no município de Jaboticabal- SP. **Ciência & Tecnologia**, v. 4, n. 1, 2012.

MERGULHÃO, A. D. Circuito de produção da laranja no Brasil: do cultivo aos produtos industriais destinados principalmente ao mercado internacional. **Estudos Geográficos: Revista Eletrônica de Geografia**, v. 16, n. 2, p. 141-155, 2018.

PINTO, A. A.; PEREIRA, B. L.; CÂNDIDO, W. L.; *et al.* Caracterização de pellets de ponteira de eucalipto. **Revista Ciência da Madeira**, v. 6, n. 3, 2015.



Madeiraira



DA MADEIRA

RITCHIE, H.; ROSADO, P.; ROSER, M. Energy Production and Consumption. 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption> . Acesso em 29 de julho de 2024.

SILVA, D. A.; MULLER, B. V.; KUIASKI, E. C.; *et al.* Propriedades da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de energia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 84, p. 481-485, 2015.

SIMIONI, F. J.; MOREIRA, J. M. M. Á. P.; FACHINELLO, A. L.; *et al.* Evolução e concentração da produção de lenha e carvão vegetal da silvicultura no Brasil. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 2, p. 731-741, 2017.

WATZLAWICK, L. F.; WIONZEK, F. B.; da SILVA, S. V. L.; *et al.* Produção de biomassa e propriedades energéticas do *Eucalyptus benthamii* maiden et cambage. *In: Engenharia Industrial Madeireira: Tecnologia, Pesquisa E Tendências.* Editora Científica Digital, 2020. p. 267-285.