



Determinação do poder calorífico em folhas de genótipos de cana-de-açúcar

Determination of calorific value in leaves of sugarcane genotypes

Patricia Oliveira Schmitt ¹ , Luíze Silva Mascarenhas ¹ , Lucas Silva Lemões ¹ , Andrey Pereira Acosta ² , Juliana Silva Lemões ³ , Cláudia Fernanda Lemons e Silva ¹ 

RESUMO

O Brasil apresenta elevada produção de cana-de-açúcar, gerando grande volume de resíduos frequentemente submetidos à queima ou descarte inadequado, resultando em emissões de gases de efeito estufa. Nesse contexto, o aproveitamento energético dessas biomassas surge como alternativa sustentável, sendo o poder calorífico um dos principais parâmetros para avaliar seu potencial energético. Assim, este trabalho teve como objetivo determinar e comparar o poder calorífico de 22 genótipos de cana-de-açúcar. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com análises em duplicata. As folhas foram coletadas, trituradas, secas a 65°C até peso constante e moídas (1 mm). O teor de umidade (TU) foi determinado por gravimetria e o poder calorífico superior (PCS) medido em calorímetro isoperibólico (PARR 6200). O poder calorífico inferior (PCI) e o útil (PCU) foram calculados considerando 6% de hidrogênio. Os dados foram analisados pelo teste de Scott-Knott (5%), onde foram identificados grupos em relação ao seu potencial energético. Os resultados médios foram de 3939,16 kcal/kg (PCS), 3615,16 kcal/kg (PCI), 3203,23 kcal/kg (PCU) e 9,79% (TU), com variações entre genótipos. Além disso, verificou-se correlação negativa significativa entre o TU e o PCU ($r = -0,712$; $p < 0,01$). Conclui-se que os genótipos RB106807 e RB106818 apresentaram com maior potencial energético.

Palavras-chave: Aproveitamento de resíduos; Biomassa; Potencial energético; *Saccharum spp.*

ABSTRACT

Brazil has a high sugarcane production, generating large volumes of waste that are frequently subjected to burning or improper disposal, resulting in greenhouse gas emissions. In this context, the energy recovery of these biomasses emerges as a sustainable alternative, with calorific value being one of the main parameters used to evaluate their energy potential. Thus, this study aimed to determine and compare the calorific value of 22 sugarcane genotypes. The experiment was conducted in a completely randomized design, with analyses performed in duplicate. The leaves were collected, crushed, dried at 65 °C until constant weight, and ground to 1 mm particle size. Moisture content (MC) was determined gravimetrically, and the higher heating value (HHV) was measured using an isoperibolic calorimeter (PARR 6200). The lower heating value (LHV) and net calorific value (NCV) were calculated considering 6% hydrogen content. Data were analyzed using the Scott-Knott test at a 5% significance level, in which genotypes were grouped according to their energy potential. The average results were 3939.16 kcal/kg (HHV), 3615.16 kcal/kg (LHV), 3203.23 kcal/kg (NCV), and 9.79% (MC), with variations among genotypes. In addition, a significant negative correlation was observed between MC and NCV ($r = -0.712$; $p < 0.01$). It was concluded that the genotypes RB106807 and RB106818 exhibited the highest energy potential.

Keywords: Waste utilization; Biomass; Energy potential; *Saccharum spp.*

¹ Universidade Federal de Pelotas;

² Universidade Federal do Paraná;

³ Universidade Federal do Rio Grande do Sul;

Autor correspondente Patricia Oliveira Schmitt: patricia.olimitt@gmail.com

Recebido em: 04/03/2025. Aceito em: 26/05/2026.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado. 

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento da preocupação global com os impactos ambientais e as mudanças climáticas, e consequentemente em relação à consciência ambiental, as fontes de energia renováveis têm ganhado destaque crescente no cenário científico, tecnológico e industrial. Diversos estudos acerca dos potenciais disponíveis de biomassa e suas implicações para o desenvolvimento sustentável e a regeneração de recursos naturais têm sido realizados em escala global (SOUZA *et al.*, 2021; KUMAR *et al.*, 2021; ALI *et al.*, 2023).

Das fontes de energias renováveis, os resíduos agrícolas destacam-se como matérias-primas promissoras, devido à sua ampla disponibilidade, baixo custo, não competição com a cadeia alimentar e elevado teor de biomassa lignocelulósica (ASSAYE, 2024). Em virtude disto, materiais lignocelulósicos como talos de sorgo (APPIAH-NKANSAH *et al.*, 2019), girassol (SAHITO *et al.*, 2021), milho (ABUELNUOR *et al.*, 2024) e folhas de cana-de-açúcar (CRUZ *et al.*, 2021) têm sido estudados para geração energética limpa. Dentre os cultivos realizados no mundo, a cana-de-açúcar é um dos mais colhidos, estando presente em mais de 100 países, sobretudo nas regiões equatoriais. Os principais produtores globais incluem Brasil, Índia, China, Tailândia e Paquistão, de acordo com dados da Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (CORAL MEDINA *et al.*, 2021; FREITAS *et al.*, 2021; FAOSTAT, 2024).

Diversos materiais de *Saccharum spp.* desenvolvidos por programas de melhoramento genético vêm sendo cultivados visando maior produtividade e potencial energético. Esses incluem cultivares amplamente utilizados, como as do grupo RB, e genótipos de cana-energia, como os da série PRBIO, caracterizados pelo elevado potencial de produção de biomassa lignocelulósica e maior teor de fibra, sendo voltados para aplicações energéticas, cuja variabilidade pode influenciar o desempenho energético da biomassa.

Nesse cenário, o Brasil é o quinto maior produtor de biomassa e o maior produtor de cana-de-açúcar (LANG *et al.*, 2021). A área do cultivo dessa vegetação é estimada em 8,79 milhões de hectares, com uma previsão de produção de 668,9 milhões de toneladas para a safra de 2025/26 (Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, 2026). Ademais, a biomassa procedente da cana-de-açúcar retrata 15,4% da oferta Interna de energia brasileira, (Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2023).

No que tange à geração de energia, o bioetanol produzido a partir de cana-de-açúcar é apontado como de menor custo de produção no mundo, devido à ampla disponibilidade de matéria-prima, o avanço da tecnologia agrícola e o desenvolvimento da indústria açucareira (MACRELLI *et al.*, 2012). Além deste, é produzido biodiesel e outras formas de energia térmica, como geração de calor e vapor, por meio da combustão e pirólise de componentes da cana-de-açúcar, sobretudo em países subdesenvolvidos (SANTOS *et al.*, 2023).

O setor da cana-de-açúcar produz eletricidade do bagaço da planta, enquanto as folhas apresentam ampla capacidade para produção adicional de eletricidade e

mitigação da mudança climática, embora sejam escassamente aproveitadas (SOUZA *et al.*, 2021). Para que a viabilidade técnico-financeira das biorrefinarias de cana-de-açúcar seja plenamente atingida, portanto, faz-se necessário que a biomassa inteira das canas, incluindo suas folhas, seja convertida em produtos de maior valor agregado (FREITAS *et al.*, 2021; SOUZA *et al.*, 2021).

As folhas da cana-de-açúcar são um resíduo de biomassa proveniente da pós-colheita (KUMAR *et al.*, 2019). Enquanto resíduos como o bagaço já são amplamente aproveitados pela indústria sucroenergética, as folhas da cana-de-açúcar ainda apresentam aplicações mais limitadas devido à presença de lignina, cuja estrutura complexa dificulta sua valorização industrial (RODRIGUES *et al.*, 2020). Além disso, a presença da sílica está associada à elevada adsorção de umidade e à formação de resíduos de queima, fatores indesejáveis em diversos processos industriais (SUWANREE *et al.*, 2022). As folhas, quando secas, apresentam alto valor calorífico e porções consideráveis de lignina (10,04%), celulose (44%) e hemicelulose (28,28%), tornando esse elemento como potencial matéria-prima para outros produtos (MOODLEY & KANA, 2015; MENANDRO *et al.*, 2017).

A cada tonelada de cana-de-açúcar colhida, cerca de 270 kg de folhas são gerados (SUWANREE *et al.*, 2022), sendo descartadas nos campos como resíduos de biomassa agrícolas por serem indesejadas no processo de moagem da planta (CONAG *et al.*, 2018; SHERPA *et al.*, 2022). Cerca de 100 toneladas da colheita podem gerar até cerca de 30 toneladas de folhas e topos de cana-de-açúcar, pouco aproveitados na indústria (SHERPA *et al.*, 2022).

Atualmente, as folhas da cana-de-açúcar são empregues, como alternativa ao seu descarte inadequado, para a produção de bioetanol de segunda geração, possibilitado por conta de sua natureza lignocelulósica (MACRELLI *et al.*, 2012; FREITAS *et al.*, 2021), e para a produção de carvão vegetal através de processos pirolíticos (SUWANREE *et al.*, 2022).

Apesar das vantagens socioeconômicas associadas ao aproveitamento das folhas de cana-de-açúcar, sua aplicação energética ainda enfrenta limitações relacionadas à variabilidade composicional da biomassa, especialmente quanto ao teor de cinzas e umidade, fatores que podem comprometer a eficiência dos processos termoquímicos e o rendimento energético. Nesse contexto, a caracterização energética da biomassa torna-se fundamental.

O poder calorífico é um dos principais parâmetros utilizados para avaliar o potencial energético de materiais lignocelulósicos, sendo definido como a quantidade de energia liberada durante a combustão completa de uma determinada massa de biomassa. Esse parâmetro está diretamente relacionado à composição química do material e ao teor de umidade, influenciando significativamente sua viabilidade para aplicações energéticas (WANG *et al.*, 2021).

Adicionalmente, a variabilidade genética entre genótipos de *Saccharum spp.*, incluindo categorias agrônômicas como cana-energia e cana-de-açúcar tradicional, pode resultar em diferenças significativas nas propriedades térmicas da biomassa, impactando diretamente seu desempenho energético. No entanto, ainda são limitados

estudos comparativos na literatura quanto à comparação sistemática dessas características em folhas de diferentes genótipos.

Espera-se que os diferentes genótipos de cana-de-açúcar apresentem variações no poder calorífico e no teor de umidade das folhas, influenciando seu potencial energético. Diante disso, este estudo tem como objetivo determinar o poder calorífico superior, inferior e útil de folhas de diferentes genótipos de cana-de-açúcar (tradicional e cana-energia), comparar esses parâmetros entre os genótipos e avaliar o teor de umidade, visando analisar seu potencial para geração de energia.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Amostras de folhas de 22 genótipos de cana-de-açúcar com aproximadamente 12 meses de idade, foram disponibilizadas pela Estação Experimental da Embrapa Clima Temperado, localizada no município de Pelotas/RS, Brasil (latitude: -31.776, longitude: -52.3594 31° 46' 34" Sul, 52° 21' 34" Oeste, altitude: 68 m), cujo clima é classificado como subtropical úmido (Cfa), segundo a classificação de Köppen-Geiger, com temperatura média anual de 17–18 °C e precipitação anual entre 1.200 e 1.400 mm, distribuída ao longo do ano (ALVARES *et al.*, 2013). As coletas foram realizadas pela equipe da instituição, sendo posteriormente doadas para a realização deste estudo. O presente estudo teve como foco a caracterização energética das folhas de cana-de-açúcar, por meio da determinação do poder calorífico e teor de umidade. Dessa forma, informações agronômicas complementares, como condições de solo, manejo e adubação, não foram contempladas, por não constituírem o foco principal deste estudo. Aproximadamente 4 g de material vegetal foram utilizados por genótipo para a condução das análises experimentais.

Dentre os genótipos avaliados, 15 são classificados como cana-energia, identificados como PRBIO pertencentes ao grupo denominado como: PRBIO354, PRBIO329, PRBIO435, PRBIO451, PRBIO469, PRBIO407, PRBIO293, PRBIO353, PRBIO337, PRBIO375, PRBIO537, PRBIO528, PRBIO458, PRBIO466 e PRBIO379. Os demais genótipos são classificados como cana tradicional, pertencentes ao grupo denominado como: RB106807, RB106818, RB106819, RB036153, RB106814, RB006995, RB106822.

A escolha dos genótipos de cana-energia (PRBIO) e cana-de-açúcar convencional (RB) foi realizada com o objetivo de comparar materiais com diferentes características genéticas e potenciais tecnológicos, especialmente quanto à produção de biomassa e propriedades energéticas. Os genótipos de cana-energia apresentam maior potencial de produção de biomassa lignocelulósica, enquanto os genótipos de cana tradicional são amplamente utilizados na indústria sucroenergética, permitindo uma análise comparativa entre materiais com diferentes finalidades de uso.

As folhas foram parcialmente desintegradas em triturador forrageiro e colocadas em estufa a 65°C para retirada da umidade, até atingir peso constante. Posteriormente, as amostras foram moídas em moinho do tipo *Willey* com peneira de 1 mm. Em seguida, efetuou-se a determinação do teor de umidade das amostras moídas por secagem em estufa a 105 °C por 20 h, com auxílio de uma balança analítica

de precisão (0,001 g), seguindo procedimentos adaptados da norma TAPPI T 264 cm-07.

Para a determinação do poder calorífico superior (PCS), utilizou-se um calorímetro isoperibólico (Marca PARR, Modelo 6200), empregando-se 0,5 g de amostra. As análises foram realizadas em duplicata para cada genótipo, considerando a alta precisão do método calorimétrico, conforme descrito por Posom *et al.* (2018). Os resultados foram expressos em kcal/kg.

Os valores de poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico útil (PCU) foram obtidos por meio das equações descritas por Arantes (2014). Para o cálculo de PCI, foi considerado teor médio de 6% de hidrogênio para biomassa de cana-de-açúcar, conforme Schürhaus (2007), Vianna (2011) e Jacome (2014).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, em delineamento inteiramente casualizado, com duas repetições por tratamento. Quando significativas, as médias foram agrupadas pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. Observou-se baixa variabilidade entre as medições, indicando adequada reprodutibilidade dos resultados. O processamento dos dados foi realizado com auxílio do software Genes (Cruz, 2013). Além disso, foi realizada à análise de correlação de Pearson, utilizando os valores médios de cada variável, com um nível de confiança de 95%, a fim de avaliar as relações entre o poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI), poder calorífico útil (PCU) e teor de umidade (TU).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para as variáveis poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI), poder calorífico útil (PCU) e teor de umidade (TU) estão apresentados abaixo (Tabela 1) em função dos diferentes genótipos de cana-de-açúcar avaliados, pertencentes aos grupos de cana tradicional e cana-energia.

As amostras avaliadas apresentaram diferenças significativas para PCS, PCI, PCU e teor de umidade, sendo possível identificar grupos estatisticamente distintos entre si, conforme indicado pelas letras na tabela 1. De modo geral, os genótipos com menores teores de umidade apresentaram maiores valores de poder calorífico, evidenciando a influência desse parâmetro no desempenho energético da biomassa.

Para o PCS, foram formados três grupos estatisticamente homogêneos, conforme apresentado na Tabela 1. Os maiores valores foram observados nos genótipos RB106807, RB106818, RB036153, RB106814 e PRBIO469, enquanto os menores valores de PCS foram verificados nos genótipos PRBIO435, PRBIO353, PRBIO537, PRBIO528, PRBIO466 e PRBIO379.

O valor médio de PCS obtido neste estudo (3939,16 kcal/kg) foi próximo aos reportados por Lizcano (2015) e Menandro (2016), que encontraram valores de 4213,24 e 4131,03 kcal/kg, respectivamente, assim, pode-se verificar que os resultados comparativos foram valores aproximados. Ressalta-se ainda que os estudos citados foram conduzidos com cana-de-açúcar convencional, enquanto nesta pesquisa inclui genótipos de cana-energia, os quais apresentam características estruturais distintas, como maior teor de fibras e lignina, podendo contribuir para as variações observadas no poder calorífico.

Tabela 1: Valores de poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI), poder calorífico útil (PCU) e teor de umidade (TU) de folhas de genótipos de cana-de-açúcar tradicional e cana-energia.

Genótipo	PCS		PCI		PCU		TU (%)	
RB106807	4073,02	a*	3749,02	a	3474,38	a	6,32	b
RB106818	4066,21	a	3742,21	a	3425,66	a	7,29	b
RB106819	3942,97	b	3618,97	b	3397,48	b	5,25	b
RB036153	4049,37	a	3725,37	a	3384,10	b	7,89	b
PRBIO354	3967,68	b	3643,68	b	3359,78	b	6,69	b
PRBIO329	3977,92	b	3653,92	b	3348,49	b	7,18	b
RB106814	4019,23	a	3695,23	a	3309,51	b	8,98	b
RB006995	3958,64	b	3634,64	b	3225,15	c	9,67	b
PRBIO435	3822,87	c	3498,87	c	3218,30	c	6,85	b
PRBIO451	3912,25	b	3588,25	b	3204,61	c	9,16	b
PRBIO469	4003,37	a	3679,37	a	3186,39	c	11,52	a
PRBIO407	3967,09	b	3643,09	b	3173,59	c	11,07	a
PRBIO293	3933,63	b	3609,63	b	3149,52	d	10,93	a
PRBIO353	3838,99	c	3514,99	c	3146,70	d	8,95	b
PRBIO337	3932,47	b	3608,47	b	3143,64	d	11,05	a
PRBIO375	3951,99	b	3627,99	b	3129,93	d	11,78	a
PRBIO537	3801,49	c	3477,49	c	3107,25	d	9,08	b
PRBIO528	3869,92	c	3545,92	c	3064,38	e	11,62	a
PRBIO458	3960,56	b	3636,56	b	3046,83	e	13,92	a
PRBIO466	3838,72	c	3514,72	c	3009,22	f	12,29	a
PRBIO379	3835,80	c	3511,80	c	2995,57	f	12,56	a
RB106822	3937,41	b	3613,41	b	2970,66	f	15,26	a
Média	3939,16		3615,16		3203,23		9,79	

* Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$)
 Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Para o PCI, foram formados três grupos estatisticamente homogêneos. Os maiores valores foram observados nos genótipos RB106807, RB106818, RB036153, RB106814 e PRBIO469.

Portanto, para as variáveis PCS e PCI observa-se a mesma formação de grupos entre os genótipos avaliados (Tabela 1). Esse comportamento é esperado, uma vez que no cálculo da variável PCI é considerado o teor de hidrogênio, que neste caso foi utilizado um valor médio de 6 % para todos os genótipos, não interferindo no ranqueamento dos mesmos.

Os valores de PCI encontrados nos estudos de Menandro (2016), sobre o potencial energético da biomassa da cana-de-açúcar o PCI contido nas folhas atingiu

um valor médio de 3726 kcal/kg, enquanto no presente trabalho foram encontrados valores médios de 3615,16 kcal/kg para folhas de cana-de-açúcar, sendo, portanto, ligeiramente inferiores, porém próximos aos reportados na literatura.

Para PCU, foram formados 6 grupos que constituem estatisticamente homogêneo de diferentes genótipos, onde no grupo superior foram encontrados os genótipos RB106807, RB106818 e agrupados com menores valores os genótipos PRBIO466, PRBIO379, RB106822. Observa-se que esses genótipos com menores valores de PCU apresentam maiores teores de umidade, o que indica que a presença de água na biomassa reduz a disponibilidade energética, uma vez que parte da energia é consumida no processo de evaporação durante a combustão.

Observa-se, na tabela 1, que para PCU, todos os grupos de genótipos foram influenciados pelos teores de umidade, refletindo diretamente nos menores valores em comparação ao PCS para todos os genótipos, comportamento já esperado, uma vez que o aumento da umidade reduz o conteúdo energético disponível da biomassa.

Dos 22 genótipos avaliados, apresentaram alterações no agrupamento estatístico entre PCS e PCU, passando de 3 grupos formados na análise de PCS para 6 grupos na análise de PCU, assim, indicando que o teor de umidade nas folhas dos genótipos de cana-de-açúcar interferiu na classificação de agrupamento do PCU.

Conforme observado na Tabela 1, à medida que o teor de umidade aumenta, o poder calorífico diminui, ou seja, há uma tendência inversamente proporcional entre esses dois fatores. Estes resultados foram semelhantes aos valores obtidos por Arantes (2014). Tal fato também foi comprovado por Lima *et al.* (2008), que em seus estudos verificou a influência da umidade no poder calorífico da madeira, concluindo que o poder calorífico é alterado pelo teor de umidade. Segundo Couto (2014), quanto maior a quantidade de umidade, maior é o gasto de energia para evaporar a água presente na biomassa.

Os genótipos avaliados, na tabela 1, apresentaram teor de umidade de 9,79%, em média. Observa-se uma grande variação de teor de umidade entre os genótipos, destacando-se o RB106822 que foi o valor mais elevado de 15,26 % de teor de umidade e o genótipo RB106819 foi no valor mais baixo de 5,25 % de teor de umidade.

No estudo de Marques (2022), o teor de umidade no palhicho de cana-de-açúcar foi de 12,7%, já no presente estudo as amostras das biomassas de folhas foram secas previamente e apresentaram teor de umidade de 9,79 %. Essa diferença pode ser atribuída à natureza da biomassa, visto que o palhicho é mais heterogêneo (incluindo folhas, ponteiros e materiais residuais), além de diferenças nas condições de armazenamento, como tempo de estocagem, umidade relativa e exposição ambiental, fatores que influenciam diretamente o teor de umidade.

Analisando os genótipos de cana-de-açúcar em relação ao teor de umidade, verificou-se que o genótipo RB106807 e RB106818 apresentaram maiores valores de poder calorífico superior, de 4073,02 kcal/kg e 4066,21 kcal/kg, respectivamente, associados aos menores teores de umidade, de 6,32% e 7,29%. Esses resultados evidenciam a influência direta da umidade no poder calorífico (ABDEL *et al.*, 2023). Além disso, as variações observadas entre os genótipos podem estar relacionadas às

diferenças na composição da biomassa, como teores de fibras e lignina, que influenciam diretamente o conteúdo energético (ESTEVEZ *et al.*, 2023).

No estudo de Jacome (2014) sobre teor de umidade nas folhas secas de cana-de-açúcar obteve o valor médio de 4,7 % de teor de umidade *in natura*, sendo que nesta pesquisa o valor de umidade foi de 9,79 % em média, determinado com a biomassa previamente seca. Percebe-se neste caso que as condições de armazenamento especialmente ao período de exposição ao ambiente e à umidade relativa do ar, fatores que favorecem a reabsorção de umidade pela biomassa.

Na Tabela 1, observa-se que os genótipos de cana-de-açúcar tradicional se destacaram com os maiores valores de poder calorífico (PCS, PCI e PCU). Os genótipos RB106807 e RB106818 apresentaram os maiores valores absolutos, respectivamente, sendo classificado no mesmo grupo de genótipos, o que indica o potencial desses genótipos para o aproveitamento energético.

Conforme Lemões (2018), a cana tradicional apresenta maior produtividade média (31,1 t ha⁻¹ de matéria seca e 124,4 t ha⁻¹ de matéria fresca) em comparação à cana-energia (25,9 e 114,6 t ha⁻¹, respectivamente). No referido estudo, destacam-se genótipos como RB106818, também avaliado no presente trabalho, com produtividade de 41,1 t ha⁻¹ de matéria seca e 171,1 t ha⁻¹ de matéria fresca (LEMÕES, 2018). Portanto, é fundamental para o aproveitamento energético de uma determinada biomassa, seja considerado não apenas os valores de poder calorífico, mas a produtividade por área, já que esta vai influenciar diretamente no total de energia que será gerada a partir da biomassa.

Os resultados de produtividade reportados por Lemões (2018), associados aos elevados valores de poder calorífico observados neste estudo, reforçam o potencial energético do genótipo RB106818.

Já na análise de correlação de Pearson foi realizada para avaliar as relações entre as variáveis poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI), poder calorífico útil (PCU) e teor de umidade (TU) nas folhas dos diferentes genótipos de cana-de-açúcar. Os coeficientes de correlação e seus respectivos níveis de significância estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Coeficientes de correlação de Pearson entre poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI), poder calorífico útil (PCU) e o teor de umidade (TU) em folhas de genótipos de cana-de-açúcar.

Grupo	TU	PCS	PCI	PCU
TU	-	-	-	-
PCS	-0,186 (0,26)	-	-	-
PCI	-0,186 (0,26)	1,00 (<0,01)	-	-
PCU	-0,712 (<0,01)	0,72 (<0,01)	0,72 (<0,01)	-

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Na Tabela 2, os resultados indicaram que o teor de umidade apresentou uma correlação negativa significativa com o PCU ($r = -0,712$; $p < 0,01$), evidenciando que o aumento do teor de umidade reduz diretamente o poder calorífico útil da biomassa.

Esse comportamento é esperado, pois a presença de umidade na biomassa reduz a eficiência da combustão, uma vez que parte da energia térmica gerada é dissipada na evaporação da água. Resultados semelhantes foram observados por Lima *et al.* (2008), que relataram influência negativa do teor de umidade no poder calorífico da madeira.

A correlação entre o teor de umidade e o PCS e PCI foi negativa, mas de baixa magnitude ($r = -0,186$; $p = 0,26$), sugerindo que, apesar da umidade influenciar o potencial energético da biomassa, os valores absolutos do PCS e PCI não sofrem variações significativas devido à umidade inicial da biomassa. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que o PCS reflete a energia total armazenada no material seco, sem considerar a influência direta da umidade durante a combustão. Esse resultado era esperado, uma vez que o cálculo do PCI leva em consideração um valor fixo para o teor de hidrogênio, o que mantém a consistência dos valores entre os genótipos analisados (Arantes, 2014).

Os resultados da Tabela 2, a correlação positiva observada entre PCS e PCI ($r = 1,00$; $p < 0,01$) e entre PCU e PCI ($r = 0,72$; $p < 0,01$) confirma a relação esperada entre esses parâmetros, já que o PCI e o PCU são calculados a partir do PCS, levando em conta a composição da biomassa e os efeitos da umidade. O impacto mais expressivo foi na redução do PCU, o que reforça a importância do controle da umidade na biomassa para aplicações energéticas eficientes.

Assim, os resultados confirmam que a umidade é um fator determinante no desempenho energético das folhas de cana-de-açúcar. Para aplicações voltadas à bioenergia, é essencial que o material passe por um processo eficiente de secagem antes da conversão térmica, a fim de maximizar o aproveitamento energético. A cana tradicional dos genótipos RB106807 e RB106818, que apresentou menores teores de umidade, obteve os maiores valores de poder calorífico útil, destacando-se, no presente estudo, como uma alternativa promissora para conversão energética, considerando os parâmetros avaliados.

4 CONCLUSÃO

A análise dos 22 genótipos de cana-de-açúcar evidenciou variações no teor de umidade, influenciando diretamente o poder calorífico útil (PCU) das folhas. De modo geral, os genótipos de cana tradicional apresentaram maior potencial energético. Os genótipos RB106807 e RB106818 destacaram-se pelos maiores valores de poder calorífico, enquanto PRBIO466, PRBIO379 e PRBIO528 apresentaram os menores desempenhos. Entre os materiais avaliados, o genótipo RB106818 mostrou-se o mais promissor para geração de energia, devido à combinação de alto poder calorífico e menor teor de umidade.

Assim, a cana tradicional apresentou maior eficiência energética em comparação à cana-energia, e o controle do teor de umidade é essencial para otimizar o aproveitamento energético da biomassa. Apesar do número reduzido de repetições experimentais, a elevada precisão do método calorimétrico contribuiu para a resultados analiticamente consistentes. Estudos futuros podem explorar estratégias

para redução da umidade e avaliar a influência de outros parâmetros físico-químicos na eficiência energética dos genótipos.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) pela doação da matéria-prima.

6 REFERÊNCIAS

ABDEL AAL, A. M. K.; IBRAHIM, O. H. M.; AL-FARGA, A.; EL SAEIDY, E. A. Impact of biomass moisture content on the physical properties of briquettes produced from recycled *Ficus nitida* pruning residuals. **Sustainability**, v. 15, n. 15, p. 11762, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su151511762>

ABUELNUOR, A. A.; MOHAMED ALI ABUELNUOR, A. M.; EL KAWI, O. S. A. Comparative analysis of slow pyrolysis of sugarcane bagasse and corn stover for renewable energy production. **Discover Energy**, v. 4, 9 p., 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s43937-024-00058-0>

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

Ali, F., Dawood, A., Hussain, A., Alnasir, H., Khan, M., Butt, T., Janjua, N., & Hamid, A. (2024). Abastecendo o futuro: aplicações de biomassa para energia verde e sustentável. **Discover Sustainability**, 5. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00309-z>.

APPIAH-NKANSAH, N. B.; LI, J., ROONEY, W.; WANG, D. A review of sweet sorghum as a viable renewable bioenergy crop and its techno-economic analysis. **Renewable Energy**, 143, 1121–1132, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.066>

ARANTES, D. C. **Bagaco de cana-de-açúcar: análise térmica e energética de biomassa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Uberlândia. 90f, 2014.

ASSAYE Y. M. Agricultural Waste for Energy Storage, Conversion and Agricultural Applications. **American Journal of Modern Energy**, 10(3):38-41, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.11648/j.ajme.20241003.11>

CONAB. (2026). **Acompanhamento da safra brasileira. Cana-de-açúcar, 1º levantamento da safra 2025/26**. CONAB. Acesso em: 25 de maio 2026.

CONAG, A. T.; VILLAHERMOSA, J. E. R.; CABATINGAN, L. K.; GO, A. W. Energy densification of sugarcane leaves through torrefaction under minimized oxidative atmosphere. **Energy for Sustainable Development**, 42, 160–169, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.11.004>

CORAL MEDINA, J. D.; ALOMIA, F. B.; MAGALHAES, A. I.; CESAR DE CARVALHO, J.; WOICIECHOWSKY, A. L.; SOCCOL, C. R. Simulation of different biorefinery configuration including environmental, technical and economic assay using sugarcane bagasse. **Journal of Cleaner Production**, 316, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128162>

COUTO, C. M. **Estimativa do poder calorífico de madeiras de acácia-negra e eucalipto do Município de Pelotas – RS**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 56 p. 2014. Acesso em: 25 de maio 2026.

CRUZ, C.D. GENES - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum**. v.35, n.3, p.271-276, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v35i3.21251>

CRUZ, L. P.; PACHECO, V. S.; SILVA, L. M.; ALMEIDA, R. L.; MIRANDA, M. T.; PISSOLATO, M. D.; MACHADO, E. C.; RIBEIRO, R. V. Morpho-physiological bases of biomass production by energy cane and sugarcane: A comparative study. **Industrial Crops and Products**, 171, 113884, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113884>

EPE, E. de P. E. (2023). **Balanço Energético Nacional 2023: Ano Base 2022**. In Empresa de Pesquisa Energética. Acesso em: 28 de abril de 2026.

ESTEVES, B.; SEN, U.; PEREIRA, H. Influence of chemical composition on heating value of biomass: a review and bibliometric analysis. **Energies**, v. 16, n. 10, p. 4226, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16104226>

FREITAS, J. V.; BILATTO, S.; SQUINCA, P.; PINTO, A. S. S.; BRONDI, M. G.; BONDANCIA, T. J.; BATISTA, G.; KLAIC, R.; FARINAS, C. S. Sugarcane biorefineries: potential opportunities towards shifting from wastes to products. **Industrial Crops and Products**, 172, 114057, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114057>

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **FAOSTAT: crops and livestock products**. Rome: FAO, 2024. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 7 maio 2026.

JACOME, D. L. F. **Caracterização Físico-química das Cinzas de Palha de Cana-de-Açúcar Através de Análises Térmicas Simultâneas (STA)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas, 132 f., 2014.

KUMAR, M.; SABBARWAL, S.; MISHRA, P. K.; UPADHYAY, S. N. Thermal degradation kinetics of sugarcane leaves (*Saccharum officinarum* L) using thermogravimetric and differential scanning calorimetric studies. **Bioresource Technology**, 279, 262–270, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.137>

KUMAR, M., UPADHYAY, S., & MISHRA, P. Pyrolysis of Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) Leaves and Characterization of Products. **ACS Omega**, 7, 28052 – 28064, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02076>

LANG, A.; BRADLEY, D.; GAUTHIER, G. Global bioenergy statistics 2021. [S.l.]: **World Bioenergy Association**, 2021. Disponível em: <https://www.worldbioenergy.org/uploads/211214%20WBA%20GBS%202021.pdf>. Acesso em: 7 maio 2026.

LEMÕES, L. S. **Seleção de genótipos de cana-de-açúcar para produção de etanol e silagem**. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Produção Agrícola Familiar). Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 73 f., 2018. Acesso em: 10 de maio 2026.

LIMA, E. A.; ABDALA, E. M.; WENZEL, A. A. **Influência da Umidade no Poder Calorífico Superior de Madeira**. Comunicado Técnico – Embrapa, Colombo/PR, 2008, 3 p. Acesso em: 15 de maio 2026.

LIZCANO, J. V. **Poder calorífico, energia da biomassa cana-de-açúcar irrigada por gotejamento, para diferentes variedades, lâminas e processos de maturação**. Dissertação (Mestrado em ciências), 93 f, 2015. Acesso em: 20 de maio 2026

MACRELLI, S.; ZACCHI, G.; MOGENSEN, J. Techno-economic evaluation of 2nd generation bioethanol production from sugar cane bagasse and leaves integrated with the sugar-based ethanol process. **Biotechnology for Biofuels**, 5(1), art. 152, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/1754-6834-5-22>

MARQUES, C. A.; SILVA, D. L.; APRESENTAÇÃO, M. J. F.; NAKASHIMA, G. T.; YAMAJI, F. M. Production of biochar using sugarcane straw (*Saccharum sp.*). **Research, Society and Development**, 12 f., 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i1.24675>

MENANDRO, L. M. S. **Caracterização e aproveitamento agrônomo e industrial de ponteiros e folhas secas da cana-de-açúcar**. 85 f. Dissertação (Mestrado), 2016. Acesso em: 20 de maio 2026.

- MENANDRO, L. M. S.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H. C. J.; KÖLLN, O. T.; PIMENTA, M. T. B.; SANCHES, G. M.; RABELO, S. C.; CARVALHO, J. L. N. Comprehensive assessment of sugarcane straw: implications for biomass and bioenergy production. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, 11(3), 488–504, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/bbb.1760>
- MOODLEY, P.; KANA, E. B. G. Optimization of xylose and glucose production from sugarcane leaves (*Saccharum officinarum*) using hybrid pretreatment techniques and assessment for hydrogen generation at semi-pilot scale. **International Journal of Hydrogen Energy**, 40(10), 3859–3867, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.087>
- POSOM, J.; SIRISOMBOON, P.; SAECHUA, W. Precision test for spectral characteristic of NIR spectroscopy and bomb calorimeter for measuring higher heating value of *Leucaena leucocephala*. **MATEC Web of Conferences**, v. 192, p. 03049, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819203049>
- RODRIGUES, J. S.; CARMO, K. P.; FREITAS, R. R. M.; SILVA, J. O.; LIMA, V. H.; BOTARO, V. R. Isolamento e caracterização de lignina acetossolve extraída do bagaço de cana-de-açúcar. **Revista Virtual de Química**, v. 12, n. 4, p. 930–937, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20200069>
- SAHITO, Z. A.; ZEHRA, A.; TANG, L.; ALI, Z.; LAEEQ UR REHMAN HASHMI, M.; BANO, N.; ULLAH, M. A.; HE, Z.; YANG, X. Arsenic and mercury uptake and accumulation in oilseed sunflower accessions selected to mitigate co-contaminated soil coupled with oil and bioenergy production. **Journal of Cleaner Production**, 291, 125226, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.125226>
- SANTOS, B. S. F.; PALACIS-BERECHE, M. C.; GALLEG0, A. G.; NEBRA, S.A.; PALACIS-BERECHE, R. **Energy assessment of biofuels production from fast pyrolysis of sugarcane straw, and upgrading of the bio-oil produced through hydrotreatment**. 36ª Conferência Internacional sobre Eficiência, Custo, Otimização, Simulação e Impacto Ambiental de Sistemas de Energia (ECOS 2023). Disponível em: <https://doi.org/10.52202/069564-0141>
- SCHÜRHAUS, P. **Produtos e propriedades energéticas da madeira**. Centro Universitário de União da Vitória. Engenharia Industrial da Madeira. 162 f., 2007.
- SHERPA, K. C.; KUNDU, D.; BANERJEE, S.; GHANGREKAR, M. M.; BANERJEE, R. An integrated biorefinery approach for bioethanol production from sugarcane tops. **Journal of Cleaner Production**, 352, 131451, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131451>
- SOUZA, N. R. D.; DE, DUFT, D. G.; BRUNO, K. M. B.; HENZLER, D. DE S.; JUNQUEIRA, T. L.; CAVALETT, O.; HERNANDES, T. A. D. Unraveling the potential of sugarcane electricity for climate change mitigation in Brazil. **Resources**,

Conservation and Recycling, 175, 2021. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105878>

SUWANREE, S.; KNIJNENBURG, J. T. N.; KASEMSIRI, P.; KRAITHONG, W.; CHINDAPRASIRT, P.; JETSRISUPARB, K. Engineered biochar from sugarcane leaves with slow phosphorus release kinetics. **Biomass and Bioenergy**, 156, 106304, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106304>

TAPPI. **T 264 cm-07**: Preparation of wood for chemical analysis. **Atlanta: Technical Association of the Pulp and Paper Industry**, 2007. Acesso em: 03 maio de 2026.

VIANNA, L. F. **Potencial energético do bagaço e palhiço de cana-de-açúcar, CV, SP80-1842, em área de Alambique artesanal**. 102 f., Tese (Doutorado), 2011. Acesso em: 18 de abril de 2026.

WANG, L.; WU, X.; GAO, X.; WU, Y.; CEN, K. A method for in-situ measurement of calorific value of coal: a numerical study. **Thermochimica Acta**, 703, 179011, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2021.179011>