**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Poder calorífico, energia e cinzas da biomassa de cana-de-açúcar
irrigada por gotejamento, para diferentes variedades,
lâminas e processos de maturação**

Jonathan Vásquez Lizcano

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2015**

Jonathan Vásquez Lizcano
Engenheiro Agrícola

Poder calorífico, energia e cinzas da biomassa de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento, para diferentes variedades, lâminas e processos de maturação
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **RUBENS DUARTE COELHO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP

Vásquez Lizcano, Jonathan

Poder calorífico, energia e cinzas da biomassa de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento, para diferentes variedades, lâminas e processos de maturação / Jonathan Vásquez Lizcano. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2015.
92 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. *Saccharum* spp 2. Irrigação 3. Poder calorífico 4. Biomassa 5. Bioenergia 6. Potencial energético 7. Bagaço 8. Palhiço I. Título

CDD 633.61
V328p

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

DEDICATÓRIA

A minha amada esposa, que me acompanhou e apoiou nesta bela etapa,
Andrea Gutiérrez Hernández.

DEDICO

A Deus, pelo dom da vida.
A minha mãe, irmã e avó, por todo o esforço que fizeram,
Gloria, Stephanie e Dorila.
A meu pai, pelo apoio,
José Vicente.
A meus amigos e professores, pelo incentivo.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Ao professor Rubens Duarte Coelho, pela orientação recebida na execução deste projeto e motivação para continuar na vida acadêmica.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, pela oportunidade da realização deste curso de pós-graduação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP e à Empresa Odebrecht Agroindustrial, que através do Projeto PITE 2012/50083-7 (BIOEN - Programa de Pesquisa FAPESP em Bioenergia) disponibilizaram os recursos financeiros necessários para a realização deste projeto de pesquisa.

Aos colaboradores da Empresa Odebrecht Agroindustrial, Engenheiros Américo Ferraz Dias Neto e Bernardo Yasuhiro Ide, pelas sugestões e experiências compartilhadas nas visitas e reuniões científicas realizadas ao longo do experimento. Aos Srs. Carlos Calmanovici e Frederico Ramazzine Braga pelo apoio administrativo relacionado à gestão do contrato com a Empresa Odebrecht.

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Engenharia da Irrigação (INCTEI) em especial ao Prof. Dr. José Antonio Frizzzone, aos Engenheiros Yoran Kontral, Daniel Pedroso, Marcos Kawasse e Daniel Neves (Empresa Netafim), Dr. Marcio Santos (Empresa Lindsay), Prof. Derrel Martin (University of Nebraska), Prof. Ronnie D. Green (Water for Food Institute), Engenheiros Urubathan Palhares Klink, José Guilherme Scanavini (CanaVialis - Monsanto) e Dr. Geoff Inman-Bamber (CSIRO-Austrália) pelo apoio no encaminhamento deste projeto de pesquisa.

Aos colegas de pesquisa, Fernando da Silva Barbosa, Daniel Philipe Veloso Leal, Lucas da Costa Santos, Eusímio Felisbino Fraga Junior, Marcos Antônio Correa Matos do Amaral, Timóteo H. S. Barros e Nathália L. Ribeiro, que me auxiliaram neste trabalho.

Ao estagiário de iniciação científica Vinícius Perin e ao estagiário do IF Goiano (orientado do Prof. Marconi Batista Teixeira) e, atualmente, colega de pós-graduação, Bruno A. Alves pela ajuda na realização deste trabalho.

À amiga e estagiária de iniciação científica, Liz R. de Oliveira pela amizade e pela colaboração oferecida para a realização deste trabalho.

Aos amigos, Marcos Antônio Correa Matos do Amaral e Jefferson Vieira José pela amizade desde o primeiro dia no Brasil.

Aos amigos, Sergio Arciniegas Alarcón, Marisol García Peña, Yesid Alejandro Mariño, Asdrubal Farias, Maria Alejandra Moreno Pizani, Jhinmy Hemeryth Bartra, Karen Stephanny Cordova Flores e Wagner Wolff pela amizade e momentos de alegria.

Aos professores, funcionários e colegas do programa de pós-graduação pela assistência dada a este projeto.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT.....	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	15
1 INTRODUÇÃO	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 A cana-de-açúcar na matriz elétrica brasileira.....	21
2.2 Tecnologias de conversão da biomassa em energia elétrica.....	22
2.3 Cogeração de energia a partir da biomassa.....	23
2.4 Resíduos da indústria sucroalcooleira	24
2.5 A biomassa residual da cana-de-açúcar como um combustível	26
2.6 Poder calorífico da biomassa residual da cana-de-açúcar	26
2.7 Fatores que incidem no poder calorífico da biomassa.....	30
3 MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1 Localização	33
3.2 Experimento.....	33
3.3 Produção da biomassa de cana-de-açúcar.....	34
3.3.1 Plantio e transplantio das mudas.....	34
3.3.2 Condução da cultura	35
3.3.3 Sistema e manejo da irrigação	36
3.3.4 Condições meteorológicas	36
3.4 Delineamento e esquema experimental	37
3.4.1 Variedades de cana-de-açúcar estudadas.....	38
3.4.2 Lâminas de irrigação.....	39
3.4.3 Processos de maturação analisados	41
3.5 Amostragem.....	42
3.6 Agrupamento da biomassa seca particionada de cana-de-açúcar	45
3.7 Variáveis analisadas.....	46
3.7.1 Mensuração do poder calorífico superior das partições de cana-de-açúcar	46
3.7.2 Mensuração do teor de cinza da biomassa particionada de cana-de-açúcar	49
3.7.3 Estimativa do potencial energético da biomassa seca de cana-de-açúcar	50
3.8 Análise de variância univariada, ANOVA	50

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1	Poder calorífico superior da biomassa particionada de cana-de-açúcar.....	53
4.2	Teor de cinzas da biomassa seca particionada de cana-de-açúcar	55
4.3	Energia da biomassa seca de cana-de-açúcar	59
4.4	Energia potencial (mensurada e estimada) da biomassa seca de cana-de-açúcar .	62
4.5	Energia útil (estimada) para a biomassa seca de cana-de-açúcar.....	74
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
6	CONCLUSÕES.....	87
	REFERÊNCIAS	89

RESUMO

Poder calorífico, energia e cinzas da biomassa de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento, para diferentes variedades, lâminas e processos de maturação

Atualmente as usinas sucroalcooleiras conseguem exportar à matriz elétrica brasileira os excedentes de eletricidade gerados nelas; essa eletricidade é gerada através da combustão direta da biomassa residual da cana-de-açúcar o que requer menor investimento em equipamentos e controle técnico em comparação aos processos de pirólise e gaseificação. Embora o poder calorífico da cana-de-açúcar seja documentado em diversos trabalhos na literatura, em nenhum deles é registrado o histórico de disponibilidade hídrica no solo durante o crescimento da planta; deste modo levanta-se a hipótese que as plantas sob stress hídrico tendo um maior teor de fibra, apresente um poder calorífico diferenciado das plantas que não passaram por stress hídrico. O objetivo deste estudo foi apresentar o poder calorífico, a energia útil e cinzas da biomassa particionada seca de oito variedades de cana-de-açúcar (V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8), submetidas a diferentes disponibilidades hídricas no solo durante o processo de crescimento das plantas através da irrigação por gotejamento (L50, L75, L75* e L100) sob diferentes processos de maturação com base em déficit hídrico na fase final de crescimento (M1, M2, M3 e M4). Determinou-se o poder calorífico superior da biomassa particionada em açúcar, bagaço, bainhas, folhas, perfilhos mortos, ponteiro e raízes de cana-de-açúcar utilizando um calorímetro isoperibólico Parr 6200, seguindo a norma ASTM D5468-02. A produção da cana-de-açúcar analisada foi realizada em ambiente protegido na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (USP). A análise de variância univariada (ANOVA), de cada variável de resposta, correspondeu a um delineamento de três blocos casualizados com esquema experimental de parcelas sub-subdivididas (*split-split-plot*); resultando um total de 396 unidades experimentais. Em cada parcela, foram plantadas duas touceiras de cana (réplicas). A média observada do poder calorífico superior obtido para o bagaço, as bainhas, as folhas e os ponteiros, respectivamente, foi 18,16; 17,21; 17,64; e 17,84 MJ·kg⁻¹. A ordem de grandeza do potencial energético da cana-de-açúcar é dada principalmente pela biomassa. A energia total média medida foi 1241,87 GJ·ha⁻¹ (71,41 t MS) e a energia útil média estimada foi 660,29 GJ·ha⁻¹ (36,90 t MS). Estimou-se que em média são produzidas 0,54 toneladas de cinzas por hectare.

Palavras-chave: *Saccharum* spp; Irrigação; Poder calorífico; Biomassa; Bioenergia; Potencial energético; Bagaço; Palhicho

ABSTRACT

Calorific value, energy and ash of sugarcane biomass drip irrigated, for different varieties, irrigation depth and maturation processes

Currently sugar mills generate electricity over their needs, exporting the surplus to the Brazilian energy matrix; this electricity is generated through direct combustion of the residual biomass, which requires less investment in equipment and technical control compared with the pyrolysis and gasification processes. Although the caloric value of the residual canes is documented by several studies in the literature, no recorded studies consider their qualitative aspect. This work hypothesis suggest that plants subject to water stress have a relative higher fiber content, thus a different calorific value. The objective of this study is to retrieve the calorific value, the useful energy and ashes from dried biomass of eight sugarcane varieties (V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 and V8) under different water availability in the soil during the growth process of plants by drip irrigation (L50, L75, L75 and L100 *) in different ripening processes based water deficit in the final growth stage (M1, M2, M3 and M4). The gross calorific value of biomass was determined by partitioned it into sugar, bagasse, sheaths, leaves, dead tillers, hand and roots using a isoperibol calorimeter Parr 6200, following ASTM D5468-02 normative. The experiment was carried in a greenhouse at the "Luiz de Queiroz" College of Agriculture (USP) in Piracicaba-SP. The univariate analysis (ANOVA), for each response variable, corresponded to a randomized block (split-split-plot design); resulting in 396 experimental units. In each plot were planted two clumps of cane. The gross calorific value average observed obtained for bagasse, sheaths, leaves and pointers was, respectively 18.16; 17.21; 17.64; and 17.84 MJ·kg⁻¹. The order of magnitude of the energy potential of sugarcane was given mainly by biomass. The measurement of average total energy was 1241.87 GJ·ha⁻¹ (71.41 t MS) and average estimated useful energy was 660.29 GJ·ha⁻¹ (36.90 t MS). It is estimated that on average 0.54 tons of ash per hectare are produced.

Keywords: *Saccharum* spp; Irrigation; Calorific Value; Biomass; Bioenergy; Energy potential of sugarcane; bagasse; Residual biomass

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Layout geral do processo de cogeração na indústria açucareira.....	23
Figura 2 - Partes da cana-de-açúcar utilizadas na geração de energia	24
Figura 3 - Produtos e resíduos (subprodutos) da indústria açucareira.....	25
Figura 4 - Variação diária da temperatura média (Temp), radiação solar global (Rad) e umidade relativa média (UR) no interior da estufa para o período de fevereiro de 2013 a fevereiro de 2014	36
Figura 5 - Valores mensais da temperatura média (Temp), radiação solar global (Rad) e umidade relativa média (UR) no interior da estufa e no Posto Meteorológico (PM) de Piracicaba/LEB-ESALQ (Temp-PM, Rad-PM e UR-PM) para o período de fevereiro de 2013 a fevereiro de 2014	37
Figura 6 - Desdobramento dos teores de fibra para as 8 variedades estudadas dentro de cada tratamento de lâmina. Variedades identificadas com letras minúsculas distintas dentro da mesma lâmina e lâminas identificadas com letras maiúsculas distintas para a mesma variedade diferem entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott.....	38
Figura 7 - Irrigação total acumulada (litros) por parcela no tratamento referência (L100xM3) para as oito variedades estudadas (380 dias).	41
Figura 8 - Representação gráfica das frações das lâminas aplicadas durante a fase de maturação para os tratamentos M1, M2, M3 e M4. A lâmina referência é a lâmina do tratamento L100 de cada variedade.	42
Figura 9 - Prensa hidráulica Marconi MA098/CANA	43
Figura 10 - Desintegrador de cana Engehidro DCE-2600.....	43
Figura 11 - Homogeneizador de cana Engehidro HCE-250.....	44
Figura 12 - Moinho TECNAL tipo Willey TE-650.	44
Figura 13 - Estufa elétrica TECNAL TE-394/4	44
Figura 14 - Calorímetro Isoperibólico Parr 6200.	46
Figura 15 - Prensa peletizadora Parr 2811	47
Figura 16 - Montagem da tampa da bomba de combustão: cadinho, amostra peletizada e fusível de ignição.	48
Figura 17 - Bomba de combustão utilizada no Calorímetro Isoperibólico Parr 6200.....	48
Figura 18 - Boxplot para o poder calorífico superior da biomassa seca particionada de cana-de-açúcar.....	54

Figura 19 - Boxplot para os teores de cinzas para a biomassa particionada de cana-de-açúcar	57
Figura 20 - Participação da biomassa residual útil seca de cana-de-açúcar na produção de cinzas pelo processo de combustão direta na geração de energia elétrica	59
Figura 21 - Boxplot para biomassa total do bagaço e palhiço por touceira para variedades V1, V4 e V8 de cana-de-açúcar	61
Figura 22 - Boxplot para energia potencial do bagaço e palhiço por touceira para variedades V1, V4 e V8 de cana-de-açúcar	62
Figura 23 - Participação da biomassa seca à energia potencial total média estimada da cana-de-açúcar ($1241,87 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$, $71,41 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$)	63
Figura 24 - Biomassa seca para as variedades de cana-de-açúcar V1, V4 e V8 submetidas a diferentes lâminas de irrigação.....	72
Figura 25 - Energia potencial para as variedades de cana-de-açúcar V1, V4 e V8 submetidas a diferentes lâminas de irrigação	73
Figura 26 - Energia útil estimada média para o bagaço e o palhiço (bainhas, folhas, perfilhos mortos e ponteiros; descontado $5 \text{ t}\cdot\text{MS ha}^{-1}$ deixadas no campo) das variedades V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8 de cana-de-açúcar	74
Figura 27 - Valores de açúcar total recuperável (ATR) para as 8 variedades estudadas. Variedades identificadas com letras distintas diferem entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott	75
Figura 28 - Participação da biomassa seca à energia útil média da cana-de-açúcar ($660,29 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$).....	75
Figura 29 - Energia útil estimada para o bagaço e o palhiço (bainhas, folhas, perfilhos mortos e ponteiros; descontado $5 \text{ t}\cdot\text{MS ha}^{-1}$ deixadas no campo) da cana-de-açúcar submetidas a diferentes lâminas de irrigação (valores médios dos processos de maturação M1, M2, M3 e M4).....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matriz energética brasileira 2013	21
Tabela 2 - Matriz elétrica brasileira 2013	22
Tabela 3 - Composição química do bagaço (%)	25
Tabela 4 - Composição elementar das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (%).....	25
Tabela 5 - Poder calorífico superior (PCS) da biomassa residual seca particionada de cana-de-açúcar.....	28
Tabela 6 - Poder calorífico superior (PCS) da palha de cana-de-açúcar (folhas secas) segundo Zulauf et al. (1985 apud RIPOLI, 1991)	29
Tabela 7 - Poder calorífico superior da biomassa particionada de cana-de-açúcar estudado por Ripoli et al. (1990 apud RIPOLI, 1991) na safra 1989-1990 na Usina Sta. Lydia (Ribeirão Preto, SP).....	29
Tabela 8 - Poder calorífico superior da biomassa particionada de cana-de-açúcar (RIPOLI, 1991).....	29
Tabela 9 - Poder calorífico superior do palhiço obtido por Furlani Neto et al. (1997)	30
Tabela 10 - Poder calorífico superior para o bagaço de cana-de-açúcar mensurado por Silva e Moraes (2008)	30
Tabela 11- Quantidades e datas de aplicação dos fertilizantes pelo sistema de fertirrigação para nutrição das plantas via solo	35
Tabela 12 - Quantidades e datas de aplicação dos fertilizantes foliares para complementação nutricional das plantas	35
Tabela 13 - Distribuição dos graus de liberdade das fontes de variação para o delineamento e esquema experimental utilizado	38
Tabela 14 - Caracterização físico-hídrica do solo	40
Tabela 15 - Valores de umidade de saturação (θ_s) e residual (θ_r), e dos parâmetros empíricos (α , n e m) do modelo de van Genuchten	40
Tabela 16 - Número de partições e amostras processadas em laboratório	45
Tabela 17 - Resumo da análise de variância univariada para o poder calorífico superior (biomassa seca) do bagaço, das bainhas, das folhas e do desponte das variedades V1, V4 e V8 de cana-de-açúcar sob quatro lâminas de irrigação e três níveis de maturação.....	53
Tabela 18 - Poder calorífico superior das bainhas de cana-de-açúcar para as variedades V1, V4 e V8.....	54

Tabela 19 - Resumo da análise de variância univariada para o teor de cinzas (% base em peso seco) do bagaço, das bainhas, das folhas e do desponete das variedades V1, V4 e V8 de cana-de-açúcar sob quatro lâminas de irrigação e três níveis de maturação	55
Tabela 20 - Teor de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar para diferentes lâminas de irrigação	56
Tabela 21 - Teor de cinzas das bainhas de cana-de-açúcar para as variedades V1, V4 e V8.	56
Tabela 22 - Teor de cinzas do desponete de cana-de-açúcar para as variedades V1, V4 e V8 .	56
Tabela 23 - Teor de cinzas das folhas de cana-de-açúcar das lâminas dentro da interação dos fatores variedade e maturação (V x M)	58
Tabela 24 - Teor de cinzas das folhas de cana-de-açúcar das maturações dentro da interação dos fatores variedade e lâmina (V x L)	58
Tabela 25 - Teor de cinzas das folhas de cana-de-açúcar das variedades dentro de cada interação dos fatores maturação e lâmina (M x L)	58
Tabela 26 - Resumo da análise de variância univariada (ANOVA) para a biomassa e energia disponível por touceira seca das variedades V1, V4 e V8 de cana-de-açúcar sob quatro lâminas de irrigação e três níveis de maturação (área de influência da touceira 0,31 m ²)	60
Tabela 27 - Desdobramento da interação lâmina (L) x variedade (V) para a biomassa e energia disponível do bagaço seco de cana-de-açúcar por touceira (área de influência da touceira 0,31 m ²)	60
Tabela 28 - Biomassa e energia disponível do palhiço seco de cana-de-açúcar por touceira para as lâminas	61
Tabela 29 - Biomassa e energia disponível do palhiço seco de cana-de-açúcar por touceira para as variedades	61
Tabela 30 - Poder calorífico superior atribuído à biomassa seca particionada das variedades V2, V3, V5, V8, V7 de cana-de-açúcar	62
Tabela 31 - Biomassa seca total medida para as variedades V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8 de cana-de-açúcar por hectare (açúcar, bagaço, bainhas, folhas, perfilhos mortos, ponteiros e raízes) sob os tratamentos lâmina (L) x maturação (M)	64
Tabela 32 - Energia potencial da biomassa seca para as variedades V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8 de cana-de-açúcar por hectare (açúcar, bagaço, bainhas, folhas, perfilhos mortos, ponteiros e raízes) sob os tratamentos lâmina (L) x variedade (V). Valores em negrito indicam mensurações e os demais valores são estimativas.	68

Tabela 33 - Biomassa seca utilizável estimada para as variedades V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8 de cana-de-açúcar (bagaço+palhiço_utilizável) sob os tratamentos lâmina (L) x maturações (M).....	77
Tabela 34 - Energia útil da biomassa seca utilizável de cana-de-açúcar por hectare (bagaço + palhiço_utilizável) para as variedades V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8 sob os tratamentos lâmina (L) x Maturação (M). *Valores em negrito indicam mensurações e os demais valores são estimativas	80
Tabela 35 - Eficiência de captura da energia solar pela cultura da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento (biomassa total).....	84
Tabela 36 - Eficiência de captura da energia solar pela cultura da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento (biomassa utilizável)	85
Tabela 37 - Porcentagem de área destinada à geração de energia para a irrigação da área total	86
Tabela 38 - Relação energia elétrica biomassa/hidrelétrica.....	86

1 INTRODUÇÃO

A política energética dos países vem-se construindo sob um cenário de crise energética, obrigando-se assim a procurar uma alternativa que garanta o normal funcionamento das atividades econômicas e continuar na rota do desenvolvimento. Essa crise se deve ao fato de que as fontes de energia tradicionais (não renováveis) no mundo são finitas e contribuem para a questão do aquecimento global, por exemplo: petróleo, carvão mineral e gás natural. A partir das duas crises de petróleo que ocorreram no século passado, o Brasil começou a usar novas fontes de energia para suprir, principalmente, a demanda energética do transporte; utilizou-se a cultura de cana-de-açúcar para produzir etanol. Uns dos maiores problemas que teve inicialmente o setor sucroalcooleiro foi o manejo dos resíduos sólidos (por exemplo, o bagaço), mas com o desenvolvimento da tecnologia estes resíduos tornaram-se uma fonte para a geração de energia térmica, mecânica e elétrica (co-geração).

Atualmente as usinas sucroalcooleiras conseguem exportar à matriz elétrica brasileira os excedentes de eletricidade gerados nelas; a magnitude da energia exportada depende da quantidade e qualidade da biomassa, além da tecnologia de conversão utilizada. A qualidade da biomassa pode-se definir por seu poder calorífico superior, teor de lignina (~teor de fibra) e conteúdo de cinzas; quanto à quantidade da biomassa pode-se dizer que varia de acordo com a variedade e as condições de disponibilidade hídrica no solo (efeito do genótipo). Logo, a oferta energética de uma cultura é uma função da quantidade de biomassa produzida e do poder calorífico que essa apresenta. A qualidade da biomassa de cana-de-açúcar tem sido menos estudada do que a quantidade. Embora o poder calorífico da cana-de-açúcar seja documentado em diversos trabalhos na literatura, em nenhum deles é registrado o histórico de disponibilidade hídrica no solo durante o crescimento da planta; deste modo levanta-se a hipótese que as plantas sob stress hídrico tendo um maior teor de fibra, apresente um poder calorífico diferenciado das plantas que não passaram por stress hídrico.

Este trabalho tem por hipótese, que o poder calorífico das diferentes partições da biomassa seca de cana-de-açúcar (por exemplo, o bagaço; as bainhas; as folhas; e o ponteiro) varia em função das variedades, das condições hídricas no solo durante o ciclo de crescimento (lâminas de irrigação) e dos diferentes processos de maturação (níveis de stress hídrico impostos na fase final do ciclo da cultura).

Assim, o objetivo desta dissertação é apresentar o poder calorífico, a energia útil e cinzas da biomassa particionada seca para oito variedades de cana-de-açúcar, submetidas a diferentes disponibilidades hídricas no solo durante o processo de crescimento das plantas

(lâminas de irrigação por gotejamento 50%, 75%, 75*% e 100%) e diferentes processos de maturação com base em déficit hídrico (M1, M2, M3 e M4).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cana-de-açúcar na matriz elétrica brasileira

Após duas crises mundiais do petróleo, começou-se a introduzir o conceito de segurança energética, similar ao de segurança alimentar, em diversos países. Foi a partir daí que o Brasil iniciou projetos voltados ao desenvolvimento de energias alternativas ou renováveis; referindo-se, assim, àquelas energias que podem garantir as necessidades requeridas causando um impacto menor sobre o ambiente (desenvolvimento sustentável); sendo que o uso desse tipo de energia no Brasil está crescendo.

Em 2013, a oferta de energia interna no Brasil atingiu 296,2 Mtep¹; a participação das fontes de energia renováveis foi 41,0% (EPE, 2014), mantendo-se entre as mais elevadas do mundo. Na Tabela 1, apresenta-se a matriz energética brasileira.

Tabela 1 - Matriz energética brasileira 2013

Fonte	Repartição da oferta interna de energia
Renováveis	(41,0%)
Biomassa de cana	16,1%
Hidráulica	12,5%
Lenha e carvão vegetal	8,3%
Lixívia e outras renováveis	4,2%
Não renováveis	(59,0%)
Petróleo e derivados	39,3%
Gás natural	12,8%
Carvão mineral	5,6%
Urânio	1,3%

Fonte: EPE, Empresa de Pesquisa Energética, Balanço Energético Nacional 2014 - Ano base 2013

A biomassa de cana-de-açúcar é uma energia renovável; caracteriza-se por ser um material fibroso, rico em celulose, hemicelulose e lignina. Essa biomassa se transforma em energia elétrica quando queimada dentro de uma caldeira, que aquecerá a água gerando vapor de água que incidirá sobre as turbinas dos geradores elétricos; gerando-se, assim, a energia elétrica que será transmitida e distribuída.

De acordo com Botha e von Blottnitz (2006) o bagaço é utilizado por 80 países produtores de cana-de-açúcar como insumo na geração de eletricidade. A cana-de-açúcar é amplamente plantada em países tropicais (LOPES SILVA et al., 2014). O Brasil é de longe o principal produtor de açúcar a nível mundial, entre mais de 100 países produtores (EVANS et al., 2010).

¹ 1 tonelada equivalente de petróleo (tep) = $41,87 \cdot 10^9$ J

Segundo EPE (2014), a participação da biomassa de cana na matriz elétrica brasileira, no ano 2013, foi menor que na matriz energética, pois teve uma participação inferior a 7,6% (Tabela 2); no entanto, a geração de eletricidade a partir de bagaço de cana aumentou 19,2% em relação a 2012.

Tabela 2 - Matriz elétrica brasileira 2013

Fonte	Participação na matriz elétrica brasileira
Renováveis	(79,3%)
Hidráulica: inclui importação	70,6%
Biomassa: lenha, bagaço de cana, lixo e outras recuperações	7,6%
Eólica	1,1%
Não renováveis	(20,7%)
Gás natural	11,3%
Derivados de petróleo	4,4%
Carvão e derivados: inclui gás de coqueria	2,6%
Nuclear	2,4%

Fonte: EPE, Empresa de Pesquisa Energética, Balanço Energético Nacional 2014

A energia elétrica gerada no Brasil durante o ano 2013 foi 609,9 TWh, dessa energia a biomassa contribuiu com 46,4 TWh, porém a energia consumida foi 516,3 TWh devido a que as perdas foram 93,6 TWh (EPE, 2014); o setor industrial é o principal consumidor de energia elétrica no Brasil (210,1 TWh), seguido esse pelo setor residencial (124,9 TWh), comercial (84,4 TWh), público (41,3 TWh), energético (29,7 TWh), agropecuário (24,1 TWh) e transportes (1,9 TWh).

Em um total de 62 países no mundo que produzem e comercializam eletricidade a partir da biomassa, os Estados Unidos de América é o produtor dominante de bioeletricidade, com 26% de produção mundial, seguido pela Alemanha (15%), o Brasil (7%), o Japão (7%) e o Reino Unido (5%) (EVANS et. al, 2010).

A ANEEL (2008), afirma que o bagaço e a palha (palhiço) de cana-de-açúcar tem uma grande sinergia potencial para a geração de eletricidade, devido ao fato de que a safra coincide com o período de estiagem da região Sudeste/Centro-Oeste, onde está concentrada a maior potência instalada em hidrelétricas do Brasil.

2.2 Tecnologias de conversão da biomassa em energia elétrica

De acordo com Evans et al. (2010) há três categorias primárias de tecnologia para converter a biomassa em eletricidade: pirólise, gaseificação e combustão direta. Esta última consiste na completa oxidação da biomassa em excesso de ar, produzindo dióxido de carbono e água. A tecnologia de combustão direta é a mais usada na indústria açucareira devido ao fato de requerer menor investimento em equipamentos e controle técnico em comparação com

a pirólise e a gaseificação, embora apresente um rendimento térmico bem inferior no processo de cogeração (LOPES SILVA et al., 2014).

2.3 Cogeração de energia a partir da biomassa

A cogeração é um processo de produção de energia térmica, mecânica e elétrica utilizável. Bain et al. (1998) explica que o processo de cogeração de energia segue o ciclo de Rankine, em que os gases a alta temperatura de combustão da biomassa acionam as turbinas produzindo eletricidade. Um esquema geral de como ocorre a cogeração na indústria açucareira se resume na Figura 1. Para obter elevados níveis de potência líquida a partir do bagaço se requer alta pressão e alta temperatura (LOPES SILVA et al., 2014).

Figura 1 - Layout geral do processo de cogeração na indústria açucareira.

*Fonte: Adaptado de Lopes Silva et al. (2014)

Parte da eletricidade gerada na cogeração é utilizada na própria indústria para iluminar a usina e satisfazer a demanda elétrica dos laboratórios e equipamentos; o vapor, além disso, é transformado em energia mecânica e térmica; no primeiro caso para satisfazer as necessidades energéticas do maquinário da moenda e/ou difusor e do tratamento de caldo, e no segundo caso para os processos de aquecimento, evaporação e cozimento da usina (LIMA, 2011).

Segundo Evans et al. (2010) pode se dizer que a biomassa que é utilizada como insumo combustível na geração de energia elétrica se classifica em: resíduos de atividades agrícolas ou florestais (biomassa residual); e, aquela que provém propriamente de culturas energéticas. Pelo fato de que todas as partes da cana-de-açúcar podem ser utilizadas na geração de energia, considera-se essa como uma cultura energética (Figura 2). Segundo Bain et al. (1998) a biomassa residual é acessível a baixo custo, salvo algumas situações em que a sua disponibilidade gera um custo adicional.

Figura 2 - Partes da cana-de-açúcar utilizadas na geração de energia

*Fonte: Adaptado de Pippo et al. (2011)

O açúcar é o produto principal da cana-de-açúcar seguido pela energia elétrica, conforme a Bain et al. (1998).

2.4 Resíduos da indústria sucroalcooleira

O resultado da fotossíntese é a produção de carboidratos estruturais e não estruturais que compreendem os tecidos das plantas. Os componentes da biomassa incluem celulose, hemicelulose, lignina, lipídios, proteínas, açúcares simples, amidos, água, hidrocarbonetos, cinzas e outros componentes. A concentração varia dependendo da espécie da planta, tipo de tecido e estado de crescimento (JENKINS et al., 1998). De acordo com Jenkins et al. (1998) a composição da biomassa é complexa, envolve seis elementos na fase orgânica (C, H, N, S, Cl, O) e pelo menos 10 outros elementos, não incluindo metais pesados, na fase inorgânica (Si, Al, Ti, Fe, Ca, Mg, Na, K, S e P).

A indústria sucroalcooleira gera dois tipos principais de resíduos: agrícolas e industriais (Figura 3). O primeiro grupo é composto pelo palhicho² e o segundo faz referência a cinco tipos de resíduos dos processos industrializados (cinzas, bagaço, torta de filtro, melaço e vinhaça) que podem ser reutilizados e/ou vendidos como coprodutos (LOPES SILVA et al., 2014); uma breve descrição dos resíduos que provém dos processos industrializados se apresenta a continuação:

² O palhicho, material constituído de palhas, folhas verdes, rebolos, raízes e ervas daninhas, que ficam sobre a superfície do talhão após a colheita mecanizada, quando não é realizada a queimada (VIAN, 2014).

Figura 3 - Produtos e resíduos (subprodutos) da indústria açucareira.

*Fonte: Adaptado de Lopes Silva et al. (2014)

O bagaço é obtido após a extração do caldo da cana (HUGOT, 1964); esse é o resíduo mais importante da cana-de-açúcar; caracteriza-se por ser a biomassa residual mais utilizada na geração de energia no mundo (LOPES SILVA et al., 2014), na Tabela 3 está apresentada a composição química deste resíduo;

Tabela 3 - Composição química do bagaço (%)

Carbono	Hidrogênio	Oxigênio	Nitrogênio	Enxofre	Cloro	Cinzas
48,64	5,87	42,82	0,16	0,04	0,03	2,44

Fonte: Adaptado de Jenkins et al. (1998)

As cinzas resultam da queima da biomassa (principalmente, bagaço) nas caldeiras do processo de cogeração que servem como fertilizante conforme Lopes Silva et al. (2014); essas correspondem à fase inorgânica da biomassa (Tabela 4).

Tabela 4 - Composição elementar das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	Outros
46,61	17,69	2,63	14,14	4,47	3,33	0,79	0,15	2,08	2,72	5,39

Fonte: Adaptado de Jenkins et al. (1998)

A torta do filtro é um resíduo orgânico que provém do processo de filtragem do caldo da cana que serve como fertilizante e para produzir biogás via digestão anaeróbica, conforme Contreras et al. (2009). A composição química desta torta, apresenta altos teores de matéria orgânica, fósforo, nitrogênio e cálcio; possui teores consideráveis de potássio e magnésio de

acordo com Nunes Júnior³. (2005, apud FRAVET et al., 2010); e tem quantidades expressivas de Fe, Mn, Zn e Cu segundo Cerri⁴ et al. (1988 apud FRAVET et al., 2010);

O melaço é um resíduo do processo de centrifugação na produção de açúcar que pode ser utilizado na alimentação animal e/ou como uma fonte para a produção de etanol, segundo Chauhan et al. (2011); e,

A vinhaça (“ou água residual”) é um coproduto do processo de destilação do álcool que pode ser usado na produção de biogás (LOPES SILVA et al. 2014), ou reutilizado em campo como fertilizante (OMETTO et al., 2009).

Em alguns casos se utiliza o termo SCAR (*Sugar Cane Agricultural Residue*) para referir-se à palhada da cana-de-açúcar, essa é composta pelas folhas da cana (verdes e secas) e seus ponteiros; por exemplo, Pippo et al. (2011).

2.5 A biomassa residual da cana-de-açúcar como um combustível

Assim como os combustíveis das energias não renováveis (por exemplo, o petróleo) a biomassa residual da cana-de-açúcar deve ser caracterizada com o fim de comparar seu potencial energético com o potencial de outros combustíveis. Para isso, o parâmetro mais utilizado é o poder calorífico. Jenkins et al. (1998) relatam que existem estudos nos quais se caracteriza a biomassa residual como combustível a partir das seguintes propriedades: conteúdo de umidade, poder calorífico, composição elementar, densidade aparente, densidade relativa ou gravidade específica, densidade energética por volume, condutividade térmica, mecânica, acústica, e propriedades elétricas; quase sempre medidas a temperatura ambiente.

2.6 Poder calorífico da biomassa residual da cana-de-açúcar

Segundo Jenkins et al. (1998), a medida padrão do potencial energético de um combustível (por exemplo, biomassa) é o poder calorífico; sendo esta medida a mais importante para caracterizá-lo (TELMO; LOUSADA, 2011). A ASTM (2007) estabeleceu que o valor ou poder calorífico faz referência ao calor produzido na combustão de uma quantidade unitária de um espécime em determinadas condições, expresso em joules por quilograma ($J \cdot kg^{-1}$) ou em calorias por grama ($cal \cdot g^{-1}$).

³ NUNES JÚNIOR, D. O insumo torta de filtro. IDEA News, Ribeirão Preto, 2005.

⁴ CERRI, C.C.; POLO, A.; ANDREUX, F.; LOBO, M.C.; EDUARDO, B.P. Resíduos orgânicos da agroindústria canavieira: 1., características físicas e químicas. STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos, Piracicaba, v. 6, n. 1, p. 34-37, 1988.

Hugot (1986) distingue dois valores de poder calorífico: poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI).

A ASTM (2007) define o poder calorífico superior (PCS) como o calor produzido pela combustão de uma quantidade unitária de um combustível, sólido ou líquido, quando queimado a volume constante em uma bomba calorimétrica sob condições específicas de modo que, toda a água proveniente da combustão, esteja no estado líquido depois da queima.

Hugot (1986) define o poder calorífico superior (PCS) como o calor produzido pela combustão de um quilograma de combustível, a 0°C e a 760 mmHg de pressão; todos os produtos da combustão se reduzem às mesmas condições. A água presente no combustível, bem como a formada pela combustão do hidrogênio se condensam em consequência.

A ASTM (2007) define o poder calorífico inferior (PCI) como o calor produzido pela combustão de uma quantidade unitária de combustível, líquido ou sólido, quando queimado a pressão constante de 0,1 MPa (1 atm), sob condições tais que toda a água formada durante a queima permanece na forma de vapor após a combustão.

O poder calorífico superior (PCS), diferentemente do poder calorífico inferior (PCI), leva em conta a energia que liberam ou perdem as partículas de vapor de água, ao passar para a forma de água líquida, isso ocorre uma vez que termina a combustão e a excitação das partículas diminui (JENKINS; EBELING, 1985); ou seja, o PCI, ao contrário do PCS, assume que a água formada pela combustão assim como aquela que constitui o combustível permanece em estado de vapor (HUGOT, 1986), razões pelas quais o PCS sempre é maior do que o PCI (JENKINS; EBELING, 1985).

Segundo Hugot (1986) o poder calorífico superior (PCS) dá uma medida do calor disponível ou potencial no combustível; mas, na prática, o poder calorífico inferior (PCI) dá uma medida próxima ao calor utilizável. O aproveitamento total da energia potencial da biomassa, poder-se-ia dar, em um cenário, no qual fosse possível, após a queima, diminuir a temperatura dos produtos de combustão abaixo do ponto de orvalho.

Jenkins e Ebeling (1985) comentam que o uso do poder calorífico superior (PCS) nos estudos de potencial energético dos combustíveis se deve a que este é comumente utilizado para descrever a eficiência térmica dos sistemas de combustão; além disso, a maioria dos sistemas de combustão de biomassa e gaseificação operam a pressão e volume constante.

O poder calorífico superior (PCS) da biomassa, em geral, encontra-se entre 5,63 e 23,46 MJ·kg⁻¹ (NHUCHHEN; SALAM, 2012). Alguns valores de poder calorífico superior (PCS) para a biomassa residual de cana-de-açúcar são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Poder calorífico superior (PCS) da biomassa residual seca particionada de cana-de-açúcar

Biomassa residual	PCS (MJ·kg ⁻¹)	Referência
Bagaço	19,27	Innocente (2011)
	19,25	Mbohwa e Fukuda (2003)
	18,89	Protásio et al. (2011)
	18,73	Channiwala e Parikh (2002)
	18,32	Ripoli et al. (2000)
	18,11	Grover (1989)
	18,10	Hassuani et al. (2005)
	17,70	Munir et al. (2009)
	17,33	Jenkins e Ebeling (1985)
	17,32	Suárez et al. (2000)
	17,02	Lee et al. (2013)
Folhas secas	17,40	Hassuani et al. (2005)
Folhas verdes	17,40	Hassuani et al. (2005)
Palhiço	17,90	Innocente (2011)
	17,19	Suárez et al. (2000)
Ponteiros	18,14	Ripoli et al. (2000)
	16,40	Hassuani et al. (2005)
SCAR	17,43	Jorapur e Rajvanshi (1997)

SCAR, biomassa residual composta pelas folhas da cana (verdes e secas) e seus ponteiros

Oliveira⁵, 1982 apud Ripoli (1991) afirma que os valores de poder calorífico superior do bagaço de cana são bastante próximos em várias regiões do mundo sendo que as diferenças ficam por conta do seu teor de cinzas e da umidade presente.

Leite e Pinto⁶, 1983 apud Ripoli (1991) comentam que para as condições da região canavieira do Centro-Sul do Brasil, o bagaço com 50% de umidade fornece 7,49 MJ·kg⁻¹ e com 20% de umidade fornece 13,58 MJ·kg⁻¹.

Zulauf⁷ et al., 1985 apud Ripoli (1991) determinaram o poder calorífico superior da palha, para três variedades de cana-de-açúcar cultivada no estado de São Paulo (Tabela 6).

Hugot (1986), citando a vários autores, afirma que o poder calorífico superior do bagaço seco de cana-de-açúcar é 19,26 MJ·kg⁻¹ e, o poder calorífico inferior do mesmo é 17,79 MJ·kg⁻¹; ele propõe que esses valores sejam adotados como referência.

⁵ OLIVEIRA, E.R. Bagaço de cana: um combustível que ainda não recebeu a devida atenção. *Álcool e Açúcar*, v. 2, n. 4, p. 10-19, 1982.

⁶ LEITE, W.B.; PINTO, L.A. O valor do bagaço como combustível. In: _____. *Avaliação do bagaço da cana-de-açúcar*. São Paulo: SOPRAL, 1983.

⁷ ZULAUAF, W.E.; CAPORALI, S.A.; VIDEIRA, R.M. Cálculo preliminar da energia liberada anualmente na queima dos canaviais brasileiros. In: SIMPÓSIO SOBRE QUEIMA DE PALHA DE CANAVIAIS, 2., Araraquara, 1985, p. 1-7.

Tabela 6 - Poder calorífico superior (PCS) da palha de cana-de-açúcar (folhas secas) segundo Zulauf et al. (1985 apud RIPOLI, 1991)

Região	Variedade	PCS (MJ·kg ⁻¹)
Bauru	SP701143	18,07
Piracicaba	NA5679	16,66
Araraquara	NA5679	17,51
Ribeirão Preto	SP701143	17,15
Campinas	CP5122	17,16

Aguilar⁸, 1989 apud Ripoli (1991) estudaram, na safra cubana de 1986-1987, algumas características dos resíduos agrícolas da cana, provenientes de canaviais sem queima prévia e colhidos manual e/ou mecanicamente; o poder calor superior do bagaço para essas condições foi respectivamente, 19,99 e 20,52 MJ·kg⁻¹.

Ripoli et al.⁹, 1990 apud Ripoli (1991) determinaram o poder calorífico superior para os ponteiros, as folhas verdes e o palhiço de três variedades de cana-de-açúcar (Tabela 7).

Tabela 7 - Poder calorífico superior da biomassa particionada de cana-de-açúcar estudado por Ripoli et al. (1990 apud RIPOLI, 1991) na safra 1989-1990 na Usina Sta. Lydia (Ribeirão Preto, SP)

Biomassa	SP701284		SP706163		SP701143	
	PCS	CV	PCS	CV	PCS	CV
	(MJ·kg ⁻¹)	(%)	(MJ·kg ⁻¹)	(%)	(MJ·kg ⁻¹)	(%)
Ponteiros	18,76	3,24	17,51	3,25	17,70	3,57
Folhas verdes	18,45	2,47	18,72	3,78	17,71	2,31
Palhiço (palha)	17,93	1,66	17,99	4,84	17,90	4,85

Ripoli (1991) apresentou o poder calorífico superior da biomassa particionada de cana-de-açúcar para as variedades cultivadas na região de Ribeirão Preto, no estado de São Paulo (Tabela 8).

Tabela 8 - Poder calorífico superior da biomassa particionada de cana-de-açúcar (RIPOLI, 1991)

Biomassa	SP711406		NA5679	
	PCS (MJ·kg ⁻¹)	CV (%)	PCS (MJ·kg ⁻¹)	CV (%)
Bagaço	18,33	3,35	15,79	8,04
Colmos	18,33	3,35	15,84	8,01
Folhas verdes	18,45	1,55	17,87	6,80
Palhas (folhas secas)	18,88	4,29	16,67	3,57
Ponteiros	18,15	3,90	16,86	2,61

Furlani Neto et al. (1997) estudando a energia disponível que existe no material remanescente de colheita mecanizada em canaviais com e sem queima prévia, na região de

⁸ AGUILAR, A.; PEÑA, V.; FRIEDMAN, P.; BRITO, B. La combustión de los residuos agrícolas de la caña de azúcar. Parte I. Características combustibles. **Cuba Azúcar**, La Habana, p. 40, 1989.

⁹ RIPOLI, T.C.; MIALHE, L.G.; BRITO, J.O. Queima de canavial: o desperdício não mais admissível! **Álcool e Açúcar**, São Paulo, n. 54, p. 18-23, 1990.

Ribeirão Preto, no estado de São Paulo, mensuraram os valores de poder calorífico superior para duas variedades de cana-de-açúcar (Tabela 9).

Tabela 9 - Poder calorífico superior do palhiço obtido por Furlani Neto et al. (1997)

Variedade	Tipo	PCS (MJ·kg ⁻¹)
SP711406	Cana crua	18,28
	Cana queimada	18,55
SP716163	Cana crua	19,51
	Cana queimada	18,78

Silva e Moraes (2008) mesuraram o poder calorífico superior do bagaço de cana em diferentes níveis de umidade; os resultados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Poder calorífico superior para o bagaço de cana-de-açúcar mensurado por Silva e Moraes (2008)

U (%)	0%	10%	20%	30%	50%
PCS (MJ·kg ⁻¹)	18,25	16,68	15,24	13,17	9,52

U, umidade; PCS, poder calorífico superior.

O teor de umidade da biomassa que será usada na geração de energia, pela usina sucroalcooleira, dependerá, principalmente, do tempo de armazenamento no pátio de recepção; do grau de exposição à precipitação natural; e das propriedades psicrométricas do ar (secagem natural). Além disso, estará sujeita a seu nível de processamento: por exemplo, os colmos após a moenda (bagaço) terão uma umidade inferior. Se a biomassa for enfardada com alto teor de umidade poderá ocorrer combustão espontânea.

O poder calorífico superior do bagaço da cana tem sido amplamente estudado, ao contrário do que ocorre com o estudo do potencial energético das outras “partições” da biomassa residual da cana-de-açúcar.

2.7 Fatores que incidem no poder calorífico da biomassa

Segundo Jenkins et al. (1998) devido à estrutura de carboidratos, a biomassa é altamente oxigenada com relação aos combustíveis fósseis, mesmo incluído os hidrocarbonetos líquidos e o carvão; cerca de 30% a 40% da matéria seca da biomassa é composta por oxigênio (O), esse é o segundo maior constituinte orgânico; o principal é o carbono (C), que varia entre 30 e 60% da matéria seca em função do conteúdo de cinzas; e, o hidrogênio (H) é o terceiro maior constituinte, esse varia entre 5% e 6% da matéria seca. Por outro lado, os principais constituintes inorgânicos são o nitrogênio (N), o enxofre (S) e o cloro (Cl); que podem ser achados em quantidades usualmente inferiores a 1% de matéria seca, mas

ocasionalmente bem acima desse valor. Em geral, a relação que existe entre o poder calorífico superior (PCS) e os anteriores elementos é a seguinte:

- O teor de carbono e o poder calorífico superior da biomassa se correlacionam positivamente; o mesmo ocorre com o hidrogênio (PROTÁSIO et al., 2011; HUANG et al., 2009);
- Huang et al. (2009) relata que o oxigênio contribui negativamente ao poder calorífico superior dos resíduos agrícolas; porém, Protásio et al. (2011) afirma que oxigênio contido no espécime é essencial para promover a sua combustão, apesar de não contribuir para o aumento do seu poder calorífico superior;
- O poder calorífico superior da biomassa diminui com o seu teor de cinzas (por exemplo, PROTÁSIO et al, 2011); e,
- Segundo Jenkins et al. (1998) o poder calorífico superior se reduz conforme o conteúdo de umidade é maior; ou seja, o valor máximo de liberação de energia se obtém quando a umidade do material é próxima de zero; dessa forma, quando o material contém umidade, parte da energia liberada na combustão é absorvida pela água existente no material até evaporar.

Existem, na literatura, diversos modelos que relacionam o poder calorífico superior da biomassa com as respectivas análises químicas imediatas e elementares; por exemplo, Nhuchhen e Salam (2012), Protásio et al. (2011), Yin (2011), Parikh et al. (2005), Channiwala e Parikh (2002), Jenkins et al. (1998) e, Jenkins e Ebeling (1985). Alguns trabalhos têm tratado a influência do conteúdo de umidade no poder calorífico superior da biomassa; por exemplo, Silva e Moraes (2008) e, Jenkins e Ebeling (1985). São poucos os estudos que têm-se centrado na relação do poder calorífico superior do espécime e a concentração de oxigênio na atmosfera de combustão; por exemplo, Shafizadeh¹⁰, 1981 apud Jenkins et al. (1998).

O comportamento da biomassa frente ao processo de queima é o somatório do comportamento de cada um de seus componentes: celulose, hemicelulose, lignina e extrativos. Cintra (2009) afirma que a estrutura da lignina pode influenciar a degradação térmica da madeira (biomassa), elevando o seu poder calorífico superior. Segundo Ogata (2013) a participação da celulose, hemicelulose e lignina nos materiais lignocelulósicos depende de

¹⁰ SHAFIZADEH, F. **Basic principles of direct combustion**, in: S.S. Sofer, O.R. Zaborsky (Eds), Biomass Conversion Processes for Energy and Fuels, Plenum, New York, 1981, p.103-124.

diversos fatores; por exemplo, o teor de lignina no bagaço de cana-de-açúcar, varia com a variedade, a maturidade, os métodos de colheita e com a eficiência da unidade de moagem da usina e/ou destilaria. Silva (2010) afirma que o teor de lignina presente nos materiais lignocelulósicos é da ordem de 20 a 30%. Barbosa (2015) determinou que o teor de fibra (celulose+hemicelulose+lignina) no bagaço de cana-de-açúcar é influenciado pela variedade e a disponibilidade de água no solo (irrigação). Meschede et al. (2012) encontrou que os teores de lignina e celulose em plantas de cana-de-açúcar são alterados pela aplicação de maturadores para a colheita.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento apresentado nesta dissertação está vinculado ao projeto de pesquisa FAPESP 2012/50083-7: "*Produtividade da Água em Biomassa e Energia para Variedades de Cana-de-açúcar em Função dos Níveis de Irrigação: Experimentação e Simulação*", aprovado em edital específico do Programa de Apoio à Pesquisa em Parceria para Inovação Tecnológica (PITE) junto à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). Assim, a metodologia adotada e os resultados apresentados foram definidos e redigidos em comum acordo, seguindo as cláusulas do Termo de Convênio de Cooperação firmado entre FAPESP, Odebrecht Agroindustrial (Empresa parceira) e a Universidade de São Paulo - USP (Instituição sede do projeto).

3.1 Localização

As análises laboratoriais da biomassa seca particionada de cana-de-açúcar, foram realizadas nas instalações do Laboratório de Solos e Qualidade de Água do Departamento de Engenharia de Biossistemas (LEB) da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP), em Piracicaba, no estado de São Paulo.

3.2 Experimento

A biomassa analisada foi proveniente da Tese de Doutorado de Barbosa (2015) cujo experimento baseou-se em oito variedades de cana-de-açúcar (V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8), submetidas a quatro lâminas de irrigação (L50, L75, L75*¹¹ e L100) (irrigação por gotejamento de alta frequência) e quatro processos de maturação (M1, M2, M3 e M4); esse experimento foi conduzido em uma das estufas instaladas na área experimental do Departamento de Engenharia de Biossistemas (LEB) da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP), em Piracicaba, no estado de São Paulo. A estufa foi constituída de três vãos conjugados, com área total de aproximadamente 400 m² e pé-direito de 5,2 m, tendo cobertura plástica transparente e laterais fechadas com tela tipo "sombrite" preta, com 50% de interceptação da radiação.

Nesta dissertação, devido ao tempo disponível para executar as análises laboratoriais dentro do prazo do curso de mestrado, foi reduzido o número de variedades de cana-de-açúcar e processos de maturação; diminuindo assim o número de parcelas originais utilizadas por

¹¹ Na tese de Barbosa (2015) a lâmina aqui denominada de L75* apresenta-se com a nomenclatura L125 (ver explicação no item 3.4.2).

Barbosa (2015). Os critérios utilizados nessa redução de unidades experimentais expõem-se de maneira detalhada nos itens 3.4.1; e 3.4.3.

As variedades de cana-de-açúcar estudadas por Barbosa (2015) foram definidas de comum acordo com os responsáveis técnico e administrativo da empresa parceira no projeto, contemplando as principais variedades de interesse científico e comercial disponíveis para o momento. Barbosa (2015) utilizou 8 variedades atualmente representativas dos três principais (mais tradicionais) programas de melhoramento do país: Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético (RIDESA); Instituto Agrônomo de Campinas (IAC); Centro de Tecnologia Canavieira (CTC).

Ressalta-se que, atendendo à cláusula terceira do termo de convênio de cooperação firmado entre FAPESP, Odebrecht Agroindustrial e USP (*"Respeitar e fazer respeitar as restrições à divulgação de informações e as limitações impostas por direitos autorais e de propriedade intelectual"*), as variedades foram codificadas aleatoriamente como V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8, respeitando o direito de exclusividade para a empresa parceira do projeto.

3.3 Produção da biomassa de cana-de-açúcar

A seguir descreve-se de maneira geral como Barbosa (2015) produziu a biomassa de cana-de-açúcar aqui analisada.

3.3.1 Plantio e transplântio das mudas

Barbosa (2015) para evitar qualquer tipo de problema com a sanidade das mudas e ter certeza de que o material genético selecionado era exatamente o material plantado, optou por coletar cada variedade em seu programa original de melhoramento genético. Assim, os colmos que deram origem às mudas para as variedades estudadas foram coletados no CTC (Piracicaba-SP), RIDESA (Araras-SP) e IAC (Ribeirão Preto-SP), com a garantia dos programas de origem de que eram colmos propícios para produção das mudas, ou seja, idade entre 10 e 12 meses, sem problemas de sanidade e principalmente, com a identificação correta da variedade fornecida.

Barbosa (2015) relatou que desses colmos selecionados, foram descartadas as gemas da base e do ponteiro, pois o terço médio do colmo apresentava gemas mais uniformes. A metodologia de plantio utilizada por Barbosa (2015) foi semelhante à empregada e recomendada pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), denominada de sistema de

Mudas Pré-Brotadas (MPB). Toda a fase de produção das mudas foi conduzida em casa de vegetação. As irrigações das mudas foram realizadas diariamente, de modo a manter a umidade do substrato sempre próxima da umidade na capacidade de campo, favorecendo assim o pleno desenvolvimento das mudas. Foram necessárias adubações foliares, suprimindo as necessidades nutricionais das mudas que não estavam sendo atendidas com o substrato utilizado. O transplântio das mudas pré-brotadas foi realizado 40 dias após o plantio (DAP) da gema. Barbosa (2015) optou por um solo representativo das áreas de expansão da cultura de cana-de-açúcar no Brasil, o Latossolo Vermelho Amarelo, textura franco-arenosa (Série “Sertãozinho”), disponível na região de Piracicaba - SP.

3.3.2 Condução da cultura

Durante todo o ciclo da cultura (380 dias) as plantas foram constantemente monitoradas de modo a assegurar a sua sanidade, garantindo que os efeitos dos tratamentos aplicados não tivessem influência de fatores não mensurados. Barbosa (2015) relatou que o pacote tecnológico de adubação utilizado foi o recomendado pela Produquímica®, utilizando-se produtos próprios para sistemas de fertirrigação, não prejudicando a vazão do sistema pelo baixo risco de entupimento. As quantidades e os dias de aplicação estão detalhados na Tabela 11 para as aplicações via fertirrigação e na Tabela 12 para as aplicações foliares.

Tabela 11- Quantidades e datas de aplicação dos fertilizantes pelo sistema de fertirrigação para nutrição das plantas via solo

Produto	Dias após o plantio						
	45	83	137	189	240	291	318
ProAcqua Inicial®	3,8 kg	-	1,0 kg	-	1,0 kg	-	-
ProAcqua Crescimento®	-	1,0 kg	-	1,0 kg	-	1,0 kg	1,0 kg
CanaMicros®	-	200,0 ml	-	-	-	-	-
Improve®	-	20,0 ml	20,0 ml	-	-	-	-
Ácido Húmico	-	-	-	-	300,0 ml	300,0 ml	300,0 ml
Ever®	-	-	-	-	10,0 ml	10,0 ml	10,0 ml

*Fonte: Barbosa (2015)

Tabela 12 - Quantidades e datas de aplicação dos fertilizantes foliares para complementação nutricional das plantas

Produto	Dias após o plantio				
	40	107	128	240	291
Concorde®	35,0 ml	60,0 ml	100,0 ml	100,0 ml	100,0 ml
Improve®	30,0 ml	-	-	-	-
Triunfo®	2,5 ml	30,0 ml	150,0 ml	150,0 ml	150,0 ml
CanaMicros®	-	210,0 ml	400,0 ml	400,0 ml	400,0 ml

*Fonte: Barbosa (2015)

3.3.3 Sistema e manejo da irrigação

O sistema de irrigação adotado para irrigar a cultura de cana-de-açúcar foi o gotejamento (alta frequência), utilizando tubo gotejador com emissor autocompensante, anti-sifão e antidrenante. Para controlar individualmente cada parcela experimental, Barbosa (2015) instalou uma linha de gotejo com 5 emissores espaçados em 0,20 m e com vazão de $1,6 \text{ L h}^{-1}$ em cada parcela. Assim, foi utilizado aproximadamente 1,0 m de tubo gotejador em cada parcela, somando uma vazão de 8 L h^{-1} por parcela.

O manejo da irrigação (irrigação por gotejamento de alta frequência) baseou-se no monitoramento do potencial mátrico do solo; para isso, uma bateria com três tensiômetros foi instalada nas parcelas de referência a profundidades de 0,10 m, 0,30 m e 0,50 m, representando assim às camadas de 0,0-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m, respectivamente (3 repetições). As parcelas de referência, para cada variedade, definiram-se como aquelas que foram conduzidas com o tratamento L100 x M3.

3.3.4 Condições meteorológicas

O experimento conduzido por Barbosa (2015) teve uma duração de 380 dias (31/01/2013 a 15/02/2014) e nesse período os valores mínimos e máximos de temperatura no interior da estufa ocorreram respectivamente aos 210 DAP ($5,97^\circ\text{C}$) e aos 374 DAP ($43,91^\circ\text{C}$). Para a temperatura média diária, os valores variaram de $10,82^\circ\text{C}$ (175 DAP) a $31,13^\circ\text{C}$ (368 DAP) (Figura 4).

Figura 4 - Variação diária da temperatura média (Temp), radiação solar global (Rad) e umidade relativa média (UR) no interior da estufa para o período de fevereiro de 2013 a fevereiro de 2014

*Fonte: Barbosa (2015)

Para a radiação solar global no interior da estufa, os valores mínimo e máximo ocorreram aos 117 DAP ($0,59 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e 320 DAP ($20,81 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), respectivamente. Na Figura 5, apresentam-se os dados mensurados de temperatura média, radiação solar global e umidade relativa no interior da estufa e os dados registrados dessas mesmas variáveis meteorológicas pelo posto meteorológico de Piracicaba/LEB-ESALQ para todo o ciclo de crescimento da cana-de-açúcar conduzido por Barbosa (2015).

Figura 5 - Valores mensais da temperatura média (Temp), radiação solar global (Rad) e umidade relativa média (UR) no interior da estufa e no Posto Meteorológico (PM) de Piracicaba/LEB-ESALQ (Temp-PM, Rad-PM e UR-PM) para o período de fevereiro de 2013 a fevereiro de 2014

*Fonte: Barbosa (2015)

3.4 Delineamento e esquema experimental

As análises de variância univariada (ANOVA) das variáveis de resposta medidas nos ensaios do calorímetro de combustão, foram realizadas sobre três blocos casualizados com parcelas sub-subdivididas (*split-split-plot*). Levaram-se a cabo 36 tratamentos em 108 parcelas (unidades experimentais) que equivalem, para cada bloco, a três procedimentos de maturação (M1, M3 e M4), quatro lâminas de irrigação (L50, L75, L75* e L100), e três variedades de cana-de-açúcar (V1, V4 e V8). Cada parcela, foi composta por duas touceiras de cana (réplicas) alocadas em um "vaso/caixa" com aproximadamente $0,33 \text{ m}^3$ de solo ($1,04 \times 0,41 \times 0,76 \text{ m}$). A distribuição dos graus de liberdade da análise de variância, para o delineamento e esquema experimental utilizado, apresenta-se na Tabela 13.

Tabela 13 - Distribuição dos graus de liberdade das fontes de variação para o delineamento e esquema experimental utilizado

Fontes de variação	Graus de liberdade
Blocos	2
Maturações (M)	2
Resíduo (a)	4
Lâminas (L)	3
M x L	6
Resíduo (b)	18
Variedades (V)	2
M x V	4
L x V	6
M x L x V	12
Resíduo (c)	48
TOTAL	107

3.4.1 Variedades de cana-de-açúcar estudadas

Foi analisado no calorímetro de combustão, o poder calorífico da biomassa particionada de três variedades de cana-de-açúcar das oito estudadas por Barbosa (2015). Essas três variedades foram escolhidas a partir dos resultados de comparação múltipla, pelo teste de Scott Knott ($p \geq 0,05$), para as médias de teor de fibra do bagaço para a combinação do fator lâmina (L) e variedade (V) (Figura 6). As variedades V1, V4 e V8 de cana-de-açúcar foram as mais contrastantes nos teores de fibra; uma vez que, essas abrangem toda a variação encontrada nas variedades estudadas por Barbosa (2015): V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8.

Figura 6 - Desdobramento dos teores de fibra para as 8 variedades estudadas dentro de cada tratamento de lâmina. Variedades identificadas com letras minúsculas distintas dentro da mesma lâmina e lâminas identificadas com letras maiúsculas distintas para a mesma variedade diferem entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott

*Fonte: Barbosa (2015)

3.4.2 Lâminas de irrigação

Barbosa (2015) aplicou para cada variedade de cana-de-açúcar, quatro lâminas de irrigação: L50, L75, L75* e L100. A lâmina L100 visava para manter a umidade do solo de cada variedade próxima a capacidade de campo; as lâminas L50 e L75 corresponderam, respectivamente, a 50 e 75% da lâmina L100; e, a lâmina L75*, foi variada gradativamente, ao longo do experimento, ela iniciou em 125%, logo passou a 75% e finalizou em 50% da lâmina L100. Observa-se que a lâmina L100 foi diferente para cada variedade em função do potencial de evapotranspiração de cada uma delas ao longo do ciclo de crescimento.

A lâmina de irrigação L100 foi estimada somando-se as lâminas de água necessárias para elevar a umidade do solo até capacidade de campo em cada uma das seguintes camadas 0,0-0,2 m; 0,2-0,4 m; e 0,4-0,6 m; como expressado pela Equação 1.

$$L100 = L_{(0,0-0,2)} + L_{(0,2-0,4)} + L_{(0,4-0,6)} \quad \text{Equação 1}$$

em que,

L100 - lâmina de irrigação necessária para elevar a umidade do solo até a capacidade de campo, em mm;

$L_{(0,0-0,2)}$ - lâmina necessária para elevar a umidade da camada 0,0-0,2 m até a capacidade de campo, em mm;

$L_{(0,2-0,4)}$ - lâmina necessária para elevar a umidade da camada 0,2-0,4 m até a capacidade de campo, em mm;

$L_{(0,4-0,6)}$ - lâmina necessária para elevar a umidade da camada 0,4-0,6 m até a capacidade de campo, em mm.

As lâminas anteriores foram estimadas em relação à capacidade de campo, umidade e espessura da camada de solo (Equação 2).

$$L_x = (\theta_{cc} - \theta) \cdot Z \quad \text{Equação 2}$$

em que,

L_x - lâmina necessária para elevar a umidade da camada x até a capacidade de campo, em mm;

θ_{cc} - umidade volumétrica na capacidade de campo para a camada x , em $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$;

θ - umidade volumétrica atual estimada para a camada x , em $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$; e,

Z - espessura da camada x , em mm.

A capacidade de campo assumida em cada camada de solo está apresentada na Tabela 14. A umidade do solo (antes de cada irrigação) foi estimada, para cada camada, pelo modelo de retenção de água proposto por van Genuchten¹², 1980 apud Barbosa (2015) em função do potencial mátrico mensurado na unidade experimental de referência; definida essa unidade, para cada variedade, como aquela onde foi conduzido o tratamento M3xL100 (Equação 3).

¹² van GENUCHTEN, M, Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, p. 892- 898, 1980.

$$\theta(\psi_m) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \cdot |\psi_m|^n)]^m} \quad \text{Equação 3}$$

em que,

$\theta(\psi_m)$ - umidade volumétrica em função do potencial mátrico, em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$;

θ_r - umidade volumétrica residual do solo, em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$;

θ_s - umidade volumétrica do solo saturado, em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$;

m, n - parâmetros de regressão da equação, adimensionais;

α - parâmetro com dimensão igual ao inverso da tensão, em kPa^{-1} ; e,

ψ_m - potencial mátrico, em kPa.

Os parâmetros de ajuste do modelo de van Genuchten assumidos por Barbosa (2015) estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 14 - Caracterização físico-hídrica do solo

Camada (m)	θ_{cc} ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	θ_{pmp}	CAD (mm)	Ds ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Dp ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	PT (%)	Frações granulométricas		
							Areia	Silte	Argila
							(%)		
0,00 - 0,20	0,227	0,106	24,2	1,53	2,65	42,3	75,1	7,8	17,1
0,20 - 0,40	0,226	0,098	25,6	1,50	2,65	43,4	74,5	8,0	17,5
0,40 - 0,60	0,241	0,132	21,8	1,69	2,64	36,0	74,4	8,6	17,0

θ_{cc} , umidade na capacidade de campo, correspondente ao potencial mátrico (ψ_m) de 4,85 kPa; θ_{pmp} , umidade no ponto de murcha permanente, correspondente ao potencial mátrico (ψ_m) de 1500 kPa; CAD, capacidade de água disponível; Ds, densidade do solo; Dp, densidade de partículas do solo; e, PT; porosidade total do solo. Fonte: Adaptado de Chaves¹³, 2008 apud Barbosa (2015)

Tabela 15 - Valores de umidade de saturação (θ_s) e residual (θ_r), e dos parâmetros empíricos (α , n e m) do modelo de van Genuchten

Camada (m)	θ_s ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	θ_r ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	α (kPa^{-1})	m	n
0,00 - 0,20	0,4210	0,0980	1,3464	0,1799	2,7175
0,20 - 0,40	0,4120	0,0850	1,5708	0,1648	2,5028
0,40 - 0,60	0,3740	0,1220	1,1291	0,2749	1,5619

Fonte: Adaptado de Chaves¹⁴, 2008 apud Barbosa (2015)

Na Figura 7, apresenta-se a irrigação acumulada (380 dias) por parcela no tratamento de referência (L100xM3) para as oito variedades estudadas por Barbosa (2015).

¹³ CHAVES, S.W.P. Efeito da alta frequência de irrigação e do “mulching” plástico na produção da pimenta ‘Tabasco’ fertirrigada por gotejamento. 2008. 153 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

¹⁴ Ibid.

Figura 7 - Irrigação total acumulada (litros) por parcela no tratamento referência (L100xM3) para as oito variedades estudadas (380 dias).

*Fonte: Barbosa (2015)

3.4.3 Processos de maturação analisados

Foram estudados somente três dos quatro processos de maturação implementados por Barbosa (2015): M1, M3 e M4; devido ao fato de não ter havido diferença significativa entre a média de teor de fibra do bagaço para o nível de maturação M2 e M3, pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$). Os níveis de maturação M1 e M2 consistiram em diminuir gradativamente a lâmina de irrigação ao longo dos últimos 60 dias antes da colheita, sendo reduzida até 60% e 30% da inicial, respectivamente; a maturação M3 consistiu em manter a irrigação até o início da colheita; e, finalmente, a maturação M4 (*Drying off*) consistiu em cortar a irrigação totalmente 15 dias antes do início da colheita de tal modo a esgotar a capacidade de água disponível no solo no momento da colheita em função da capacidade de água disponível no solo e da taxa de evapotranspiração da cana neste período (Figura 8).

Figura 8 - Representação gráfica das frações das lâminas aplicadas durante a fase de maturação para os tratamentos M1, M2, M3 e M4. A lâmina referência é a lâmina do tratamento L100 de cada variedade.

*Fonte: Barbosa (2015)

3.5 Amostragem

Realizaram-se duas coletas de folhas (folhas#1 e folhas#2) antes do corte de cana-de-açúcar (colheita); seguido a esse corte, cada touceira, da cana planta, foi particionada em colmos (“bagaço”), bainhas, folhas#3, ponteiro e perfilhos mortos. Obteve-se o bagaço conforme CONSECANA (2006) após extraído o caldo dos colmos utilizando uma prensa hidráulica para extração e esmagamento de cana Marconi MA098/CANA (Figura 9).

Utilizaram-se três amostras de açúcar mascavo comercial; pois, não se separou em nenhum caso o açúcar do caldo extraído. Foram retiradas amostras de solo com trado de caneca, e separadas as raízes por meio de lavagem em água corrente; obtendo assim 12 amostras de raiz, correspondentes às combinações dos fatores lâmina (L) e variedade (V); uma vez que, a biomassa de raiz obtida por parcela era insuficiente para ser analisada.

Figura 9 - Prensa hidráulica Marconi MA098/CANA

*Fonte: <http://www.marconi.com.br>

O material particionado foi empacotado em sacos de papel e secos a 65°C em estufa elétrica. O tempo de secagem do ponteiro foi 48 horas, enquanto 24 horas para o bagaço, as bainhas, as folhas (#1, #2 e #3) e os perfilhos mortos.

Finalizada a secagem, as partições foram pesadas; obtendo-se a biomassa seca de cada uma delas. Após a pesagem, as partições foram desintegradas e homogeneizadas através de um desintegrador de cana Engehidro DCE-2600 (Figura 10) acompanhado de um homogeneizador de cana Engehidro HCE-250 (Figura 11); coletou-se, para cada partição, uma amostra desse material desintegrado. No caso dos perfilhos mortos, obtiveram-se 12 amostras correspondentes combinações dos fatores lâmina (L) e variedade (V).

Figura 10 - Desintegrador de cana Engehidro DCE-2600

*Fonte: Repositório pessoal do professor Rubens Duarte Coelho (2015)

Figura 11 - Homogeneizador de cana Engehidro HCE-250

*Fonte: <http://www.engehidropiracicaba.com.br>

Em seguida, as amostras (açúcar, bagaço, bainhas, folhas#1, folhas#2, folhas#3, perfilhos mortos, ponteiro e raízes) foram moídas e passadas por uma peneira de 60 mesh em um moinho TECNAL tipo Willye TE-650/1 (Figura 12); o material pulverizado, resultante, foi submetido a secagem, em estufa elétrica, por 24 horas a 65°C.

Figura 12 - Moinho TECNAL tipo Willye TE-650.

*Fonte: <http://www.tecnallab.com.br>

A secagem, das partições e amostras, foi realizada em uma estufa elétrica, com circulação e renovação de ar, TECNAL TE-394/4 (Figura 13). Na Tabela 16, apresenta-se o número de partições e amostras que foram processadas em laboratório:

Figura 13 - Estufa elétrica TECNAL TE-394/4

*Fonte: <http://www.tecnallab.com.br>

Tabela 16 - Número de partições e amostras processadas em laboratório

Biomassa particionada	Partições	Amostras
Açúcar	-	3
Bagaço	216	108
Bainhas	216	216
Folhas	648	648
Folhas#1	(216)	(216)
Folhas#2	(216)	(216)
Folhas#3	(216)	(216)
Perfilhos mortos	216	12
Ponteiro	216	216
Raízes	-	12
TOTAL	1512	1215

3.6 Agrupamento da biomassa seca particionada de cana-de-açúcar

Nesta dissertação, as partições da cana de açúcar foram agrupadas em três grupos: biomassa seca total ($biomassa_{TOTAL}$); biomassa seca do palhiço ($biomassa_{palhiço}$); e, biomassa seca utilizável, ou útil, para a geração de energia ($biomassa_{\text{útil}}$). A biomassa seca particionada de cana-de-açúcar foi mensurada por touceira. A biomassa produzida por área foi extrapolada ao associar a cada touceira uma área de 0,31 m², ver considerações sobre a área de influência de cada touceira em Barbosa (2015).

A biomassa seca total ($biomassa_{TOTAL}$), estimou-se somando a biomassa seca das raízes e a biomassa seca da parte aérea¹⁵. A biomassa de açúcar foi estimada por Barbosa (2015); enquanto, a biomassa das raízes, estimou-se a partir da relação raiz:parte aérea (*root:shoot*) medida por Ribeiro¹⁶ (informação pessoal) para cada uma das variedades de cana-de-açúcar estudadas, com base em coleta de amostras de solo e lavagem do material em peneira nos vasos do experimento conduzido por Barbosa (2015).

A biomassa do palhiço ($biomassa_{palhiço}$) agrupa a biomassa seca das bainhas, das folhas#1, das folhas#2, das folhas#3, dos perfilhos mortos e do ponteiro.

A biomassa utilizável ou útil ($biomassa_{\text{útil}}$) foi estimada somando a biomassa do bagaço mais a biomassa utilizável do palhiço. Nesta dissertação, analisou-se um cenário no qual são deixadas em campo 5 t ha⁻¹ de palhiço (matéria seca), dando origem ao termo de biomassa utilizável. A participação das bainhas, das folhas#1, das folhas#2, das folhas#3 e do ponteiro na biomassa seca do palhiço deixado em campo foi a mesma para aquele que recolhido considerado palhiço utilizável.

¹⁵ A biomassa seca da parte aérea corresponde à soma das partições: bagaço, bainhas, folhas#1, folhas#2, folhas#3, ponteiro, açúcar e perfilhos mortos.

¹⁶ RIBEIRO, NATHÁLIA LOPES. **Raízes**. Mensagem recebida por <jlizcanova@usp.br> em 10 de mar. 2015.

3.7 Variáveis analisadas

Foram mensuradas e analisadas as seguintes variáveis de resposta por parcela: poder calorífico superior das partições de cana-de-açúcar; teor de cinzas da biomassa particionada de cana-de-açúcar; e potencial energético da biomassa seca de cana-de-açúcar. Os valores dessas variáveis de resposta correspondem ao valor médio (média) observado nas duas touceiras da unidade experimental.

3.7.1 Mensuração do poder calorífico superior das partições de cana-de-açúcar

Adotou-se a norma padrão ASTM D5468-02. Utilizou-se o calorímetro isoperibólico Parr 6200 (Figura 14); o detalhamento técnico desse equipamento pode ser revisado no site oficial da *Parr Instrument Company* (<http://www.parrinst.com>).

Figura 14 - Calorímetro Isoperibólico Parr 6200.

*Fonte: <http://www.chimicacentro.it>

3.7.1.1 Condições do local de ensaio

Como recomendado, pela norma ASTM D5468-02, o local de ensaio foi mantido livre de correntes de ar; além disso, protegeu-se o calorímetro da radiação direta da luz solar e outras fontes de energia. O calorímetro foi instalado no Laboratório de Solos e Qualidade de Água do Departamento de Engenharia de Biossistemas (LEB) da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP).

3.7.1.2 Reagentes utilizados

Os principais reagentes utilizados na determinação do poder calorífico superior da biomassa particionada seca de cana-de-açúcar foi água e oxigênio. A água foi utilizada para limpar e lavar as paredes interiores da bomba após a combustão; enquanto o oxigênio para preencher a bomba antes de cada teste; a pureza do oxigênio usado foi 99,5% como estabelecido na norma ASTM D5468-02.

3.7.1.3 Padronização do calorímetro

A padronização do Calorímetro Isoperibólico Parr 6200 foi realizada em relação ao poder calorífico superior do ácido benzóico: 6314,4 cal·g⁻¹ ou 26419,5 J g⁻¹. O procedimento de padronização está descrito norma ASTM D5468-02.

3.7.1.4 Peletização das amostras

Peletizaram-se todas as amostras de biomassa seca de cana-de-açúcar (item 3.5), com ajuda da prensa Parr 2811 (Figura 15); o peso de cada pellet obtido foi sempre superior a 0,4 g e inferior a 0,6 g; evitando assim um aumento de temperatura excessivo durante a combustão. O peso foi medido em uma balança analítica SHIMADZU AUY220 (0,0001 g de resolução). A peletização da amostra evita que parte da amostra colocada no cadinho seja “assoprada” para outras regiões da bomba de combustão no momento de injeção do oxigênio ou no início da ignição do material, o que leva a uma queima incompleta da amostra, resultando em um poder calorífico medido menor do que o valor real; este é o principal fator de erro que se tem na determinação do poder calorífico neste tipo de equipamento.

Figura 15 - Prensa peletizadora Parr 2811

*Fonte: <http://www.parrinst.com>

3.7.1.5 Análise térmica das amostras peletizadas

O pellet foi posicionado dentro de uma cápsula de combustão (ou cadinho). O conjunto cápsula e pellet foi montado no suporte da bomba de combustão como apresentado na Figura 16; em seguida, montou-se o fusível de ignição¹⁷.

Figura 16 - Montagem da tampa da bomba de combustão: cadinho, amostra peletizada e fusível de ignição.

*Fonte: Repositório pessoal do professor Rubens Duarte Coelho (2015)

Logo, carregou-se a bomba de combustão com o oxigênio de alta pureza (99,5%) a uma pressão constante de 3 MPa (~ 435 psi); na Figura 17a, indica-se as válvulas de carga e descarga de oxigênio dessa bomba. Em seguida, montou-se a bomba de combustão no Calorímetro Isoperibólico Parr 6200; conectou-se os terminais de ignição da bomba (Figura 17b) aos cabos de ignição do calorímetro. A análise térmica começou com a combustão do pellet.

Figura 17 - Bomba de combustão utilizada no Calorímetro Isoperibólico Parr 6200

*Fonte: Adaptada pelo Autor de <http://www.parrinst.com>

¹⁷ Utilizou-se como fusível de ignição, um fio de algodão de 100 mm de comprimento e 0,16 mm de diâmetro.

Feito o teste, abriu-se a tampa do calorímetro e retirou-se a bomba de combustão do banho em água; despressurizou-se o recipiente com taxa uniforme em um intervalo não inferior a 1 minuto; logo, abriu-se a bomba e examinou-se visualmente o seu interior. Cada vez que se observaram depósitos de biomassa pulverizada não queimada (pó) no fundo da bomba foi refeita a análise térmica devido a combustão incompleta. Finalizado o teste, lavaram-se as paredes internas da bomba de combustão para dar início a mais um ciclo de análise. Realizaram-se 1215 análises de poder calorífico (~ 300 horas de laboratório).

3.7.1.6 Estimativa do poder calorífico superior das folhas

Para facilitar o trânsito dentro da estufa, realizaram-se três coletas de folhas ao longo do primeiro ciclo de produção (cana-planta): folhas#1, folhas#2 e folhas#3. Nas duas primeiras coletas de folhas, só foram colhidas as folhas secas observadas na touceira; já na última coleta foram colhidas todas as folhas, sem diferenciar entre secas e verdes. Para as partições de folhas#1, folhas#2 e folhas#3 foi determinado o respectivo poder calorífico superior em laboratório (item 3.7.1). O poder calorífico superior dessas partições foi integrado em uma única partição de folhas; esse foi estimado a partir da Equação 4 (média ponderada).

$$PCS_{f,n} = \frac{m_{f,\#1}PCS_{f,\#1} + m_{f,\#2}PCS_{f,\#2} + m_{f,\#3}PCS_{f,\#3}}{m_{f,\#1} + m_{f,\#2} + m_{f,\#3}} \quad \text{Equação 4}$$

em que,

$PCS_{f,n}$ - poder calorífico superior integrado para as folhas da n ésima touceira, expressado em $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$;

$m_{f,x}$ - peso das folhas correspondente à colheita “ x ” da n ésima touceira, expressada em kg; e,

$PCS_{f,x}$ - poder calorífico superior, medido pelo calorímetro, das folhas correspondentes a colheita “ x ” da n ésima touceira, expressada em $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

3.7.2 Mensuração do teor de cinza da biomassa particionada de cana-de-açúcar

A metodologia utilizada neste experimento (resíduo da queima do calorímetro de combustão) não seguiu a norma técnica para determinar com exatidão o teor de cinzas das partições de biomassa seca de cana-de-açúcar, a qual requer uma grande quantidade de matéria seca por amostra e equipamento de queima específico não disponíveis neste projeto de pesquisa. Após a combustão, estimou-se o teor de cinzas para cada amostra peletizada de biomassa analisada. Para isso, secou-se com papel absorvente qualquer umidade da superfície exterior da cápsula de combustão e em seguida se realizou a pesagem para fornecer uma estimativa do conteúdo de cinzas da subamostra. O cálculo da estimativa realizou-se conforme a Equação 5.

$$cinzas = 100 \left(\frac{r - c}{g} \right) \% \quad \text{Equação 5}$$

em que,

cinzas - teor de cinzas da amostra peletizada, expressado em %;

r - peso da cápsula e do resíduo de combustão, em g;

c - peso da cápsula, em g; e,

g - peso da amostra, em g.

3.7.3 Estimativa do potencial energético da biomassa seca de cana-de-açúcar

A energia potencial foi estimada para cada partição da cana-de-açúcar pelo produto entre os respectivos valores de biomassa e poder calorífico superior. A partir desses valores obtidos para às partições, foi estimada a energia potencial para os três agrupamentos de biomassa definidos no item 3.6: total, palhiço e utilizável. Estimada a energia potencial por touceira ($\text{MJ} \cdot \text{Touceira}^{-1}$), foi extrapolada para uma área de 1 ha ($\text{GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$) considerando-se $0,31 \text{ m}^2$ a área de influência de cada touceira.

3.8 Análise de variância univariada, ANOVA

Analizou-se a influência dos fatores maturação (M), lâmina (L) e variedade de cana-de-açúcar (V) sobre o poder calorífico superior (PCS) e o teor de cinzas (*cinzas*) do bagaço (_b); das bainhas (_{ba}); das folhas (_f); e, ponteiro (_p). Além disso, foi estudada a influência dos anteriores fatores sobre a biomassa (*biomassa*) e energia potencial (*energia*) do bagaço e o palhiço para as mesmas três variedades. Utilizou-se a linguagem e o ambiente R versão 3.1.1 “Sock it to Me” (R CORE TEAM, 2014) para comparar os tratamentos em função dos resultados obtidos (análises de variância).

O valor de resposta por tratamento correspondeu ao valor médio da variável dentro da parcela. Fizeram-se doze análises de variância univariada; ou seja, todas as variáveis de resposta consideraram-se independentes: PCS_b , PCS_{ba} , PCS_f , PCS_p , cinzas_b , cinzas_{ba} , cinzas_f , cinzas_p , $\text{biomassa}_{\text{bagaço}}$, $\text{biomassa}_{\text{palhiço}}$, $\text{energia}_{\text{bagaço}}$ e $\text{energia}_{\text{palhiço}}$.

Realizada a análise de variância, foi verificada a normalidade dos resíduos e a homogeneidade de variância dos resíduos para os tratamentos; utilizou-se para isso, respectivamente, o teste de Shapiro-Wilk (SHAPIRO-WILK, 1965) e o teste de Levene (BOX, 1953). As pressuposições de independência dos resíduos e aditividade dos efeitos do modelo foram garantidas pelos princípios básicos de experimentação (repetição, casualização e controle local).

Os valores iniciais do teor de cinzas das bainhas (cinzas_{ba}), biomassa do palhiço ($\text{biomassa}_{\text{palhiço}}$) e enegia do palhiço ($\text{energia}_{\text{palhiço}}$) foram transformados devido ao fato de

que foi violado o pressuposto de normalidade residual; utilizou-se a transformação Box-Cox (BOX e COX, 1964) e a transformação raiz quadrática.

Quando foi verificada influência significativa de um fator ou vários deles sobre uma das variáveis de resposta, pelo teste F na análise de variância (ANOVA), utilizou-se o teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade, para comparar as médias dos tratamentos.

As análises de variância foram realizadas utilizando o pacote ‘agricolae’ versão 1.2-1 para o ambiente R (MENDIBURU, 2014); utilizaram-se as funções estatísticas ‘shapiro.test()’ e ‘levene.test()’ do pacote R ‘Stats’ (R CORE TEAM, 2014) para verificar as pressuposições do modelo estatístico; para transformar os dados conforme a transformação Box-Cox foi utilizada a função ‘boxcox’ do pacote ‘MASS’ para o ambiente R (VENABLES e RIPLEY, 2002). As comparação das médias para os tratamentos, realizou-se com a função ‘HSD.test()’ do pacote ‘agricolae’ (MENDIBURU, 2014). Quando existiu interação significativa entre os fatores, os desdobramentos realizaram-se usando o software Sisvar versão 5.3 (FERREIRA, 2011).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Poder calorífico superior da biomassa particionada de cana-de-açúcar

Os resultados da análise de variância univariada (ANOVA) do poder calorífico superior do bagaço (PCS_b), das bainhas (PCS_{ba}), das folhas (PCS_f) e do ponteiro (PCS_p) de cana-de-açúcar, encontram-se sumarizados na Tabela 17. Observa-se que os coeficientes de variação nas parcelas, nas subparcelas e nas sub-subparcelas foram baixos (<2,4%) e que não houve diferença significativa pelo teste F ($p \geq 0,05$) entre as médias dos fatores e a média dos tratamentos (combinação de fatores) para a maioria das variáveis de poder calorífico superior (PCS) analisadas, com exceção do PCS_{ba}. A média geral observada para o poder calorífico superior do bagaço foi 18,16 MJ·kg⁻¹, para as bainhas 17,21 MJ·kg⁻¹, para as folhas 17,64 MJ·kg⁻¹, e para o ponteiro 17,84 MJ·kg⁻¹.

Tabela 17 - Resumo da análise de variância univariada para o poder calorífico superior (biomassa seca) do bagaço, das bainhas, das folhas e do desponte das variedades V1, V4 e V8 de cana-de-açúcar sob quatro lâminas de irrigação e três níveis de maturação

Fontes de Variação		PCS _b	PCS _{ba} <i>p-valor pelo teste F, Pr > F</i>	PCS _f	PCS _p
Parcelas	Blocos (B)	0,35110 ^{ns}	0,05310 ^{ns}	0,15350 ^{ns}	0,07127 ^{ns}
	Maturações (M)	0,71570 ^{ns}	0,76568 ^{ns}	0,28980 ^{ns}	0,93922 ^{ns}
Subparcela	Lâminas (L)	0,72160 ^{ns}	0,70003 ^{ns}	0,84340 ^{ns}	0,11652 ^{ns}
	M x L	0,60330 ^{ns}	0,43617 ^{ns}	0,39330 ^{ns}	0,07671 ^{ns}
Sub-subparcela	Variedades (V)	0,19940 ^{ns}	0,01016 *	0,42370 ^{ns}	0,51422 ^{ns}
	M x V	0,88380 ^{ns}	0,36027 ^{ns}	0,94780 ^{ns}	0,80835 ^{ns}
	L x V	0,85400 ^{ns}	0,68507 ^{ns}	0,89240 ^{ns}	0,44548 ^{ns}
	M x L x V	0,33920 ^{ns}	0,14051 ^{ns}	0,40850 ^{ns}	0,34841 ^{ns}
CV (%)	Parcela	1,6	1,7	2,3	2,3
	Subparcela	2,4	2,2	1,9	2,1
	Sub-subparcela	2,1	2,1	1,6	2,1
Shapiro-Wilk		0,36090 ^{ns}	0,35510 ^{ns}	0,37550 ^{ns}	0,86110 ^{ns}
Levene		0,99900 ^{ns}	0,85840 ^{ns}	0,94610 ^{ns}	0,99910 ^{ns}
Média geral (MJ·kg ⁻¹)		18,16	17,21	17,64	17,84

PCS, poder calorífico superior; os subscritos 'b', 'ba', 'f' e 'p' indicam, respectivamente, bagaço, bainhas, folhas e ponteiro; CV, coeficiente de variação. ^{ns}: não significativo ($0,05 \leq p$); *: significativo ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

Quando comparadas as médias de PCS_{ba} das variedades, observou-se diferença significativa ($p < 0,05$), por meio do teste de Tukey, sendo identificada a formação de dois grupos de médias (Tabela 18).

Tabela 18 - Poder calorífico superior das bainhas de cana-de-açúcar para as variedades V1, V4 e V8

Variedade	PCSba (MJ·kg ⁻¹)
V1	17,14 b
V4	17,36 a
V8	17,12 b

PCSba, poder calorífico superior das bainhas de cana-de-açúcar. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)

Esperava-se que o poder calorífico superior do bagaço, das bainhas, das folhas e do ponteiro da cana-de-açúcar fosse influenciado pela combinação dos níveis dos fatores variedade, lâmina e maturação; porém, o resultado da ANOVA não evidencia essa influência dos tratamentos sobre o PCS da biomassa particionada de cana-de-açúcar.

Os gráficos de caixas para o poder calorífico superior da biomassa particionada seca para as variedades V1, V4 e V8 estão apresentados na Figura 18.

Figura 18 - Boxplot para o poder calorífico superior da biomassa seca particionada de cana-de-açúcar

4.2 Teor de cinzas da biomassa seca particionada de cana-de-açúcar

O resumo da análise de variância univariada (ANOVA) do teor de cinzas do bagaço (*cinzas_b*), das bainhas (*cinzas_{ba}*), das folhas (*cinzas_f*) e do ponteiro (*cinzas_p*) de cana-de-açúcar, encontram-se sumarizados na Tabela 19. Embora os coeficientes de variação nas parcelas, nas subparcelas e nas sub-subparcelas tenham sido bem mais elevados nos teor de cinza do que no PCS, verificou-se pelo teste F, que houve diferença significativa ($p < 0,05$) entre as médias do teor de cinza do bagaço (*cinzas_b*) para as lâminas; identificou-se diferença significativa entre as médias do teor de cinzas das bainhas (*cinzas_{ba}*) e do ponteiro (*cinzas_p*) para as variedades; foi observada interação significativa entre os fatores maturação (M), lâmina (L) e variedade (V) para o teor de cinzas das folhas (*cinzas_f*). Em média o teor de cinzas do bagaço foi 0,86%, das bainhas 2,18%, das folhas 2,17 e do ponteiro 1,91%.

Tabela 19 - Resumo da análise de variância univariada para o teor de cinzas (% base em peso seco) do bagaço, das bainhas, das folhas e do desponte das variedades V1, V4 e V8 de cana-de-açúcar sob quatro lâminas de irrigação e três níveis de maturação

Fontes de Variação		<i>cinzas_b</i>	<i>Cinzas_{ba}</i> <i>p-valor pelo teste F, Pr > F</i>	<i>Cinzas_f</i>	<i>Cinzas_p</i>
Parcela	Blocos (B)	0,67545 ^{ns}	0,590469 ^{ns}	0,66824 ^{ns}	0,08110 ^{ns}
	Maturações (M)	0,21818 ^{ns}	0,201048 ^{ns}	0,29139 ^{ns}	0,09653 ^{ns}
Subparcela	Lâminas (L)	0,02052 [*]	0,274740 ^{ns}	0,10110 ^{ns}	0,17383 ^{ns}
	M x L	0,06836 ^{ns}	0,199576 ^{ns}	0,74172 ^{ns}	0,30152 ^{ns}
Sub-subparcela	Variedades (V)	0,57629 ^{ns}	0,006248 [*]	0,76008 ^{ns}	3,20e-06 [*]
	M x V	0,69843 ^{ns}	0,823113 ^{ns}	0,04446 [*]	0,22146 ^{ns}
	L x V	0,32390 ^{ns}	0,298369 ^{ns}	0,28381 ^{ns}	0,05048 ^{ns}
	M x L x V	0,07014 ^{ns}	0,232398 ^{ns}	0,02648 [*]	0,05544 ^{ns}
CV (%)	Parcela	82,6	36,5	44,3	25,5
	Subparcela	36,9	20,2	19,0	23,4
	Sub-subparcela	42,0	18,9	13,3	19,7
Shapiro-Wilk		0,90470 ^{ns}	0,49200 ^{ns}	0,66440 ^{ns}	0,94190 ^{ns}
Levene		0,99950 ^{ns}	0,99260 ^{ns}	0,94250 ^{ns}	0,99860 ^{ns}
Transformação Box-Cox; λ		-	-0,78	-	-
Média geral (%)		0,86	2,18	2,17	1,91

cinzas, teor de cinzas (% base em peso seco); os subscritos ‘b’, ‘ba’, ‘f’ e ‘p’ indicam, respectivamente, bagaço, bainhas, folhas e ponteiro; CV, coeficiente de variação. ‘^{ns}’: não significativo ($0,05 \leq p$); ‘^{*}’: significativo ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

Quando comparadas as médias do teor de cinzas do bagaço (*cinzas_b*) das lâminas, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), corroborou-se que diferem significativamente entre si formando-se dois grupos de médias (Tabela 20).

Tabela 20 - Teor de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar para diferentes lâminas de irrigação

Lâmina (L)	<i>cinzas_b</i> (%)
L50	0,81 ab
L75	0,80 b
L75*	0,79 b
L100	1,05 a

cinzas_b, teor de cinzas para a fração de biomassa seca do bagaço de cana-de-açúcar. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey

Da mesma forma, constatou-se pelo teste de Tukey, que as médias do teor de cinzas das bainhas (*cinzas_{ba}*) dos níveis do fator variedade (V) diferem significativamente entre si ao nível de 5% de probabilidade; sendo formados dois grupos de médias (Tabela 21).

Tabela 21 - Teor de cinzas das bainhas de cana-de-açúcar para as variedades V1, V4 e V8

Variedade (V)	<i>cinzas_{ba}</i> (%)
V1	2,14 ab
V4	2,02 b
V8	2,37 a

cinzas_{ba}, teor de cinzas para a fração de biomassa seca das bainhas de cana-de-açúcar. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey

Também foi observado que as médias do teor de cinzas do ponteiro (*cinzas_p*) das variedades diferem entre si, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); formando-se dois grupos de médias (Tabela 22).

Tabela 22 - Teor de cinzas do desponte de cana-de-açúcar para as variedades V1, V4 e V8

Variedade (V)	<i>cinzas_p</i> (%)
V1	1,74 b
V4	1,79 b
V8	2,21 a

cinzas_p, teor de cinzas para a fração de biomassa seca do ponteiro de cana-de-açúcar. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey

Quanto ao resultado de comparação múltipla, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), as médias do teor de cinzas das folhas (*cinzas_f*) correspondente à interação dos fatores maturação (M), lâmina (L) e variedade (V) estão apresentadas na Tabela 23, Tabela 24, Tabela 25.

Os gráficos de caixas para o teor de cinzas da biomassa particionada seca para as variedades V1, V4 e V8 estão apresentados na Figura 19.

Figura 19- Boxplot para os teores de cinzas para a biomassa particionada de cana-de-acar

Tabela 23 - Teor de cinzas das folhas de cana-de-açúcar das lâminas dentro da interação dos fatores variedade e maturação (V x M)

Lâmina	Teor de cinzas das folhas, <i>cinzas_f</i> (%)								
	V1xM1	V1xM3	V1xM4	V4xM1	V4xM3	V4xM4	V8xM1	V8xM3	V8xM4
L50	2,16 b	1,82 a	1,89 a	2,33 ab	1,81 a	2,27 a	2,44 a	2,09 a	1,89 b
L75	2,22 b	1,89 a	2,13 a	2,03 b	1,88 a	2,23 a	2,19 a	1,74 a	2,17 ab
L75*	3,15 a	2,09 a	1,84 a	2,36 ab	1,95 a	2,25 a	2,14 a	2,10 a	2,20 ab
L100	2,64 ab	2,20 a	2,13 a	2,68 a	1,91 a	1,96 a	2,37 a	2,28 a	2,61 a

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey; comparação entre os níveis de lâmina dentro de cada nível interação de variedade e maturação (M x V)

Tabela 24 - Teor de cinzas das folhas de cana-de-açúcar das maturações dentro da interação dos fatores variedade e lâmina (V x L)

Maturação	Teor de cinzas das folhas, <i>cinzas_f</i> (%)											
	V1xL50	V1xL75	V1xL75*	V1xL100	V4xL50	V4xL75	V4xL75*	V4xL100	V8xL50	V8xL75	V8xL75*	V8xL100
M1	2,16 a	2,22 a	3,15 a	2,64 a	2,33 a	2,03 a	2,36 a	2,68 a	2,44 a	2,19 a	2,14 a	2,37 a
M3	1,82 a	1,89 a	2,09 b	2,20 a	1,81 a	1,88 a	1,95 a	1,91 b	2,09 a	1,74 a	2,10 a	2,28 a
M4	1,89 a	2,13 a	1,84 b	2,13 a	2,27 a	2,23 a	2,25 a	1,96 b	1,89 a	2,17 a	2,20 a	2,61 a

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey; comparação entre os níveis de maturações dentro de cada nível interação de variedade e lâmina (V x L)

Tabela 25 - Teor de cinzas das folhas de cana-de-açúcar das variedades dentro de cada interação dos fatores maturação e lâmina (M x L)

Variedade	Teor de cinzas das folhas, <i>cinzas_f</i> (%)											
	M1xL50	M1xL75	M1xL75*	M1xL100	M3xL50	M3xL75	M3xL75*	M3xL100	M4xL50	M4xL75	M4xL75*	M4xL100
V1	2,16 a	2,22 a	3,15 a	2,64 a	1,82 a	1,89 a	2,09 a	2,20 a	1,89 a	2,13 a	1,84 a	2,13 ab
V4	2,33 a	2,03 a	2,36 b	2,68 a	1,81 a	1,88 a	1,95 a	1,91 a	2,27 a	2,23 a	2,25 a	1,96 b
V8	2,44 a	2,19 a	2,14 b	2,37 a	2,09 a	1,74 a	2,10 a	2,28 a	1,89 a	2,17 a	2,20 a	2,61 a

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey; comparação entre os níveis de variedade dentro de cada nível interação de maturação e lâmina (M x L)

A partir dos resultados obtidos, estima-se que seriam produzidas, em média para as 3 variedades analisadas, $0,54 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de cinzas pelo processo de combustão direta na geração de energia elétrica, correspondentes a um rendimento médio de biomassa residual utilizável seca de $38,55 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de cana-de-açúcar; a participação da biomassa residual utilizável seca de cana na produção de cinzas está representada na Figura 20.

Figura 20 - Participação da biomassa residual útil seca de cana-de-açúcar na produção de cinzas pelo processo de combustão direta na geração de energia elétrica

Deve-se esclarecer que a metodologia utilizada para determinação das cinzas neste experimento (resíduo de combustão no cadinho do calorímetro) não é a metodologia padrão para a determinação de cinzas em biomassa vegetal. Deste modo os resultados aqui apresentados para os teores de cinzas devem servir como referências aproximadas da ordem de grandeza destes teores e da possível influência dos fatores maturação (M), lâmina (L) e variedade (V) sobre os mesmos.

4.3 Energia da biomassa seca de cana-de-açúcar

Os resultados da análise de variância univariada (ANOVA) para a biomassa e energia potencial ou disponível do bagaço e do palhiço seco por touceira, encontram-se sumarizados na Tabela 26. Verificou-se, pelo teste F ($p \geq 0,05$), que existe interação significativa entre os fatores lâmina (L) e variedade (V) para a biomassa e energia disponível do bagaço seco por touceira. Observou-se que as médias de biomassa e energia disponível do palhiço seco por touceira para as lâminas e variedades diferiram entre si, pelo teste F ($p \geq 0,05$). A energia média disponível do bagaço por touceira seca de cana-de-açúcar foi $12,38 \text{ MJ}$, enquanto para o palhiço $11,75 \text{ MJ}$.

Tabela 26 - Resumo da análise de variância univariada (ANOVA) para a biomassa e energia disponível por touceira seca das variedades V1, V4 e V8 de cana-de-açúcar sob quatro lâminas de irrigação e três níveis de maturação (área de influência da touceira 0,31 m²)

Fontes de Variação		<i>biomassabagaço</i>	<i>energiabagaço</i>	<i>biomassapalhiço</i>	<i>energiapalhiço</i>
		<i>p-valor pelo teste F, Pr > F</i>			
Parcela	Blocos (B)	0,60689 ^{ns}	0,50452 ^{ns}	0,28770 ^{ns}	0,23300 ^{ns}
	Maturações (M)	0,12554 ^{ns}	0,09215 ^{ns}	0,27080 ^{ns}	0,21790 ^{ns}
Subparcela	Lâminas (L)	3,538e-08 *	4,092e-08 *	3,194e-08 *	3,66e-08 *
	M x L	0,67390 ^{ns}	0,63782 ^{ns}	0,13550 ^{ns}	0,12320 ^{ns}
Sub-subparcela	Variedades (V)	< 2,2e-16 *	< 2,2e-16 *	< 2,2e-16 *	< 2,2e-16 *
	M x V	0,85842 ^{ns}	0,86304 ^{ns}	0,73680 ^{ns}	0,74700 ^{ns}
	L x V	0,00753 *	0,00837 *	0,54590 ^{ns}	0,51700 ^{ns}
	M x L x V	0,62490 ^{ns}	0,59486 ^{ns}	0,23060 ^{ns}	0,16310 ^{ns}
CV (%)	Parcela	15,4	14,1	9,0	8,6
	Subparcela	20,0	20,3	7,5	7,6
	Sub-subparcela	13,6	14,0	5,5	5,5
Shapiro-Wilk		0,33230 ^{ns}	0,20040 ^{ns}	0,15770 ^{ns}	0,10400 ^{ns}
Levene		0,91210 ^{ns}	0,96770 ^{ns}	0,91860 ^{ns}	0,91580 ^{ns}
Transformação raiz quadrada, λ		-	-	0,5	0,5
Média geral (Touceira ⁻¹)		0,68 kg	12,38 MJ	0,67 kg	11,75 MJ

CV, coeficiente de variação. ^{ns}: não significativo (0,05≤p); ^{*}: significativo ao nível de 5% de probabilidade (p<0,05)

O desdobramento da interação entre os fatores lâmina e variedade para a biomassa e energia disponível do bagaço seco por touceira estão apresentados na Tabela 27; para o teste de Tukey (p<0,05).

Tabela 27 - Desdobramento da interação lâmina (L) x variedade (V) para a biomassa e energia disponível do bagaço seco de cana-de-açúcar por touceira (área de influência da touceira 0,31 m²)

Lâmina	V1	V4	V8
	kg·Touceira ⁻¹ (MJ·Touceira ⁻¹)		
L50	0,53 cA (9,72 cA)	0,53 cA (9,55 cA)	0,37 bB (6,70 cB)
L75	0,77 bA (14,13 bA)	0,80 bA (14,60 bA)	0,45 bB (8,25 bB)
L75*	0,77 bA (14,09 bA)	0,80 bA (14,51 bA)	0,48 bB (8,76 bB)
L100	1,01 aA (18,32 aA)	1,02 aA (18,66 aA)	0,63 aB (11,30 aB)

Variedades identificadas com letras maiúsculas distintas dentro da mesma lâmina e lâminas identificadas com letras minúsculas distintas para a mesma variedade diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Quando comparadas as médias de biomassa do palhiço seco por touceira de cada nível de lâmina e variedade, observou-se que estas diferiram entre si, pelo teste de Tukey (p<0,05); o mesmo ocorreu ao comparar as médias de energia disponível do palhiço seco por touceira para as lâminas e variedades (Tabela 28 e Tabela 29).

Tabela 28 - Biomassa e energia disponível do palhiço seco de cana-de-açúcar por touceira para as lâminas

Lâmina (L)	<i>biomassapalhiço</i> (kg·Touceira ⁻¹)	<i>energiapalhiço</i> (MJ·Touceira ⁻¹)
L50	0,53 c	9,34 c
L75	0,64 b	11,24 b
L75*	0,67 b	11,74 b
L100	0,83 a	14,69 a

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey (área de influência da touceira 0,31 m²)

Tabela 29 - Biomassa e energia disponível do palhiço seco de cana-de-açúcar por touceira para as variedades

Variedade (V)	<i>biomassapalhiço</i> (kg·Touceira ⁻¹)	<i>energiapalhiço</i> (MJ·Touceira ⁻¹)
V1	0,77 a	13,51 a
V4	0,75 a	13,15 a
V8	0,49 b	8,60 b

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si significativamente ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey (área de influência da touceira 0,31 m²)

Esperava-se que a biomassa e energia, do bagaço e do palhiço das variedades de cana-de-açúcar estudadas, fossem influenciadas pelo menos por algum dos níveis do fator maturação.

Boxplot para a biomassa e energia do bagaço e palhiço estão apresentados Figura 21 e Figura 22.

Figura 21 - Boxplot para biomassa total do bagaço e palhiço por touceira para variedades V1, V4 e V8 de cana-de-açúcar

Figura 22 - Boxplot para energia potencial do bagaço e palhiço por touceira para variedades V1, V4 e V8 de cana-de-açúcar

4.4 Energia potencial (mensurada e estimada) da biomassa seca de cana-de-açúcar

A energia potencial da biomassa seca de cana-de-açúcar foi mensurada para as variedades V1, V4 e V8 e estimada para as variedades V2, V3, V5, V6 e V7 (Tabela 32). A energia potencial das variedades V1, V4 e V8 foi obtida em relação aos valores mensurados de biomassa seca (Tabela 31) e de poder calorífico superior; enquanto a energia potencial das variedades V2, V3, V5, V6 e V7 com base nos valores de biomassa seca mensurados e de poder calorífico superior atribuídos (Tabela 30). A energia potencial média para as variedades V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8 foi 1477,8; 1427,5; 1214,8; 1438,8; 1149,1; 1106,4; 1262,0; 862,3 GJ·ha⁻¹, respectivamente.

Tabela 30 - Poder calorífico superior atribuído à biomassa seca particionada das variedades V2, V3, V5, V8, V7 de cana-de-açúcar

Biomassa	Variedades	PCS (MJ·kg ⁻¹) --- Atribuído ---
Açúcar	V2, V3, V5, V6, V7	16,63
Bagaço	V2, V3, V5, V6, V7	18,16
Bainhas	V3, V5, V6	17,13
	V2, V7	17,36
Folhas	V2, V3, V5, V6, V7	17,64
Perfilhos mortos	V2, V3, V5, V6, V7	17,11
Ponteiro	V2, V3, V5, V6, V7	17,84
Raízes	V2, V3, V5, V6, V7	16,77

Utilizou-se o valor médio de poder calorífico superior do bagaço, folhas e ponteiro para estimar a energia potencial das variedades V2, V3, V5, V8 e V7 devido ao fato que não foi verificada diferença significativa entre as médias de poder calorífico superior dessas partições para as variedades V1, V4 e V8 (item 4.1); caso contrário ao poder calorífico superior das bainhas que teve que ser atribuído a cada variedade com base aos resultados de comparação múltipla das médias de teor de fibra, apresentados por Barbosa (2015). O poder calorífico superior utilizado para a biomassa seca de açúcar, perfilhos mortos e raízes correspondeu ao valor médio geral das mensurações realizada em laboratório.

A biomassa e energia potencial mensurada para as variedades V1, V4 e V8 por hectare para a combinação ou interação dos fatores lâmina e variedade, encontram-se, respectivamente, na Figura 24 e Figura 25. Observou-se que, sem importar o nível de lâmina ou variedade, a participação das frações de cana-de-açúcar foi semelhante na biomassa como na energia potencial da cultura de cana-de-açúcar.

A energia potencial média, aqui estimada, para a cana-de-açúcar é $1241,87 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$ correspondente $71,41 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ (biomassa seca total); a participação da biomassa seca à energia total estimada da cana está apresentada na Figura 23.

Figura 23 - Participação da biomassa seca à energia potencial total média estimada da cana-de-açúcar ($1241,87 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$, $71,41 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$)

Tabela 31 - Biomassa seca total medida para as variedades V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8 de cana-de-açúcar por hectare (açúcar, bagaço, bainhas, folhas, perfilhos mortos, ponteiros e raízes) sob os tratamentos lâmina (L) x maturação (M)

(continua)

Biomassa	<i>biomassa</i> TOTAL (t·ha ⁻¹)															
	L50				L75				L75*				L100			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
Variedade, V1																
Açúcar	12,9	13,5	15,7	13,4	17,5	17,4	20,3	14,4	21,0	19,4	15,3	19,0	21,1	20,5	25,5	23,3
Bagaço	16,6	17,3	18,8	16,2	22,9	22,3	26,6	25,4	26,9	24,9	22,6	25,1	28,5	28,3	35,4	33,4
Bainhas	4,5	4,3	5,0	4,0	5,2	6,5	6,0	5,8	6,4	5,8	6,1	6,6	6,7	6,7	8,1	8,1
Folhas	10,1	9,1	10,1	9,6	11,6	12,7	13,5	11,3	12,6	12,1	12,4	12,6	13,6	13,1	15,7	15,1
Perfilhos mortos	0,9	1,8	0,5	1,6	1,2	1,1	1,8	1,5	1,1	1,8	1,0	0,7	0,7	1,4	1,3	0,9
Ponteiros	4,4	3,0	3,7	5,0	3,7	5,6	6,3	4,7	4,9	5,9	4,1	4,9	5,0	5,6	9,1	8,2
Raízes	13,0	12,9	14,2	13,1	16,4	17,3	19,6	16,6	19,2	18,4	16,2	18,1	19,9	19,9	25,0	23,4
<i>Total</i>	62,4	61,9	68,0	62,9	78,6	82,9	94,1	79,8	92,1	88,4	77,6	86,9	95,6	95,4	120,1	112,4
Variedade, V2																
Açúcar	12,3	11,8	12,8	12,5	17,6	16,5	21,1	16,9	18,3	17,4	18,1	20,2	23,4	20,6	20,9	21,0
Bagaço	15,5	14,9	16,0	15,6	20,9	18,1	26,3	23,4	22,9	21,6	20,1	23,4	28,6	26,4	30,4	29,2
Bainhas	4,9	5,1	5,4	4,6	6,4	6,8	8,0	7,1	7,6	7,6	7,2	7,7	9,3	8,2	8,7	8,7
Folhas	9,1	9,3	9,8	9,3	11,9	12,3	13,6	12,9	13,0	12,7	12,1	11,9	15,4	14,2	15,6	14,9
Perfilhos mortos	0,5	0,8	0,8	0,7	1,2	1,3	0,8	1,4	0,8	1,2	1,4	0,9	0,6	0,6	0,8	1,1
Ponteiros	4,9	3,7	3,1	5,8	4,9	3,9	7,4	4,8	5,6	5,6	4,3	6,1	8,8	6,0	6,4	5,4
Raízes	12,0	11,6	12,2	12,4	16,0	15,0	19,7	16,9	17,4	16,9	16,1	17,9	22,0	19,4	21,2	20,5
<i>Total</i>	59,2	57,2	60,1	60,9	78,9	74,0	96,8	83,4	85,6	83,0	79,3	88,0	108,2	95,4	104,1	100,9

Tabela 31 - Biomassa seca total medida para as variedades V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8 de cana-de-açúcar por hectare (açúcar, bagaço, bainhas, folhas, perfilhos mortos, ponteiros e raízes) sob os tratamentos lâmina (L) x maturação (M)

(continuação)

Biomassa	<i>biomassa</i> TOTAL (t·ha ⁻¹)															
	L50				L75				L75*				L100			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
Variedade, V3																
Açúcar	12,0	11,2	10,5	11,3	15,1	14,5	15,8	14,6	16,7	14,2	15,5	15,4	17,4	18,4	18,8	19,3
Bagaço	15,7	14,0	15,0	14,6	18,7	18,4	22,5	19,1	20,9	18,9	20,2	21,4	24,1	25,2	25,3	27,8
Bainhas	4,0	3,6	3,8	4,0	4,5	4,3	5,3	4,6	5,2	5,1	4,9	5,3	5,8	5,8	6,0	6,1
Folhas	7,9	7,9	7,6	8,5	9,2	9,4	10,4	9,8	10,3	10,4	10,3	10,7	11,3	11,3	12,5	11,5
Perfilhos mortos	0,6	0,6	0,4	0,8	0,7	1,0	1,2	0,7	0,3	1,1	0,6	0,8	0,7	0,9	1,1	0,4
Ponteiros	4,0	3,0	2,9	3,4	3,6	4,0	5,1	4,1	4,2	4,9	4,9	4,8	5,0	5,6	6,8	5,7
Raízes	11,8	10,8	10,7	11,4	13,8	13,8	16,1	14,1	15,4	14,6	15,1	15,6	17,2	17,9	18,8	18,9
<i>Total</i>	56,0	51,1	50,9	54,0	65,5	65,5	76,3	67,0	72,9	69,2	71,4	74,0	81,4	85,1	89,3	89,8
Variedade, V4																
Açúcar	11,3	14,2	12,2	14,8	19,7	20,8	19,3	16,5	19,3	18,3	20,7	19,3	22,4	19,0	25,1	20,2
Bagaço	16,5	18,2	17,0	17,7	23,7	27,0	27,4	26,6	23,9	25,1	28,3	25,2	31,2	28,1	34,5	33,1
Bainhas	5,2	4,8	4,9	5,6	6,5	7,6	7,4	6,5	6,9	7,6	8,0	7,0	8,9	7,0	9,3	8,7
Folhas	8,6	7,2	7,8	8,5	10,1	11,8	11,2	10,0	10,0	10,2	11,9	10,5	13,0	11,2	14,1	12,9
Perfilhos mortos	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	1,7	1,1	0,6	1,2	0,6	1,1	0,8	0,9	1,1	1,7	0,8
Ponteiros	4,2	3,7	3,1	7,0	4,6	6,4	4,6	5,2	5,2	6,3	4,3	5,2	8,0	6,2	7,7	5,1
Raízes	10,3	10,8	10,1	12,1	14,5	16,7	15,7	14,5	14,8	15,1	16,5	15,1	18,7	16,1	20,5	17,9
<i>Total</i>	56,8	59,7	55,8	66,5	79,9	92,1	86,7	79,7	81,4	83,1	90,7	83,1	102,9	88,7	113,0	98,7

Tabela 31 - Biomassa seca total medida para as variedades V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8 de cana-de-açúcar por hectare (açúcar, bagaço, bainhas, folhas, perfilhos mortos, ponteiros e raízes) sob os tratamentos lâmina (L) x maturação (M)

(continuação)

Biomassa	<i>biomassa</i> TOTAL (t·ha ⁻¹)															
	L50				L75				L75*				L100			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
Variedade, V5																
Açúcar	9,4	9,0	10,1	10,9	13,4	13,5	14,0	14,5	14,5	12,5	12,1	16,4	17,2	15,6	20,9	17,2
Bagaço	13,4	13,7	13,7	15,3	19,5	18,8	21,7	21,1	18,9	17,6	19,4	20,6	24,6	24,4	30,1	26,3
Bainhas	4,3	4,0	4,2	4,4	5,3	5,3	6,5	5,9	6,0	5,7	6,0	6,0	6,3	6,2	7,7	6,7
Folhas	6,6	6,1	6,5	6,8	7,5	7,6	8,9	8,9	8,3	8,2	8,7	9,0	8,4	8,5	11,6	9,6
Perfilhos mortos	0,7	0,8	1,0	0,4	1,0	0,9	0,7	1,1	0,9	1,2	0,9	0,8	0,6	0,8	1,4	0,4
Ponteiros	4,1	4,0	3,0	3,6	4,2	5,1	5,8	5,5	4,6	6,2	4,6	6,6	8,2	5,7	7,6	4,9
Raízes	8,9	8,7	8,9	9,6	11,8	11,8	13,3	13,1	12,2	11,9	11,9	13,7	15,1	14,1	18,3	15,0
<i>Total</i>	47,2	46,4	47,2	51,0	62,7	63,0	70,9	70,0	65,3	63,4	63,6	73,2	80,6	75,3	97,5	80,1
Variedade, V6																
Açúcar	10,9	11,3	11,9	11,3	16,0	16,4	16,6	16,9	19,3	15,6	17,6	17,4	20,2	20,5	22,3	21,0
Bagaço	12,8	13,7	13,6	12,6	17,7	18,3	20,4	20,5	21,4	17,9	19,0	19,1	23,3	25,0	23,1	26,4
Bainhas	3,4	3,4	3,9	3,3	4,0	4,6	5,2	4,6	5,0	4,7	4,8	4,6	5,7	5,4	6,5	5,8
Folhas	6,1	5,6	6,4	5,8	6,9	8,0	8,4	6,9	8,3	7,5	7,7	7,6	9,3	8,0	9,7	8,8
Perfilhos mortos	0,4	0,4	0,5	0,6	1,0	0,7	0,8	0,4	0,7	0,7	1,0	0,6	0,4	0,2	0,9	0,5
Ponteiros	3,1	2,1	1,9	2,3	3,0	3,2	2,9	3,5	3,7	4,7	3,6	3,6	4,0	3,3	5,3	3,3
Raízes	8,5	8,5	8,8	8,3	11,2	11,8	12,5	12,2	13,5	11,8	12,4	12,2	14,5	14,4	15,7	15,2
<i>Total</i>	45,3	45,1	47,0	44,1	59,9	63,0	66,9	65,0	71,8	62,9	66,0	65,1	77,4	76,9	83,7	80,9

Tabela 31 - Biomassa seca total medida para as variedades V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8 de cana-de-açúcar por hectare (açúcar, bagaço, bainhas, folhas, perfilhos mortos, ponteiros e raízes) sob os tratamentos lâmina (L) x maturação (M)

(conclusão)

Biomassa	<i>biomassa</i> TOTAL (t·ha ⁻¹)															
	L50				L75				L75*				L100			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
Variedade, V7																
Açúcar	11,1	8,8	11,1	12,0	14,6	17,4	16,1	12,5	16,4	15,2	16,4	14,9	19,6	16,5	22,9	15,6
Bagaço	13,9	11,6	13,8	15,0	17,6	22,0	19,5	21,7	19,2	18,0	18,8	18,4	24,9	24,6	27,7	26,1
Bainhas	4,0	3,6	4,1	3,8	4,6	5,0	5,1	4,3	5,0	5,1	5,6	5,1	6,8	5,6	6,6	6,1
Folhas	9,5	8,1	10,1	10,5	11,0	11,2	11,9	9,7	11,5	11,5	13,5	11,0	15,7	13,0	15,0	14,0
Perfilhos mortos	0,7	1,1	1,3	0,9	0,6	0,7	0,8	1,1	0,6	2,1	0,8	0,9	0,9	0,7	0,8	1,1
Ponteiros	4,9	3,7	3,9	4,2	4,8	5,7	5,7	6,1	6,0	5,8	5,4	5,8	6,9	5,6	9,8	5,7
Raízes	11,2	9,3	11,2	11,8	13,5	15,7	15,0	14,1	14,9	14,6	15,4	14,2	19,0	16,8	21,0	17,4
<i>Total</i>	55,4	46,2	55,4	58,2	66,7	77,6	74,0	69,7	73,5	72,3	75,9	70,2	93,9	82,9	103,8	85,9
Variedade, V8																
Açúcar	8,2	7,4	7,9	8,8	9,3	10,0	10,4	8,4	11,7	9,6	10,4	10,2	12,6	10,1	13,6	13,3
Bagaço	11,2	9,9	11,8	13,1	12,4	15,7	15,4	16,2	16,8	14,4	15,6	14,2	18,7	15,7	20,9	21,2
Bainhas	3,0	3,1	3,3	3,3	3,1	3,9	4,3	3,7	4,5	4,2	4,2	4,5	4,6	4,6	5,3	4,4
Folhas	6,3	5,6	6,3	6,1	5,9	6,9	8,3	7,0	7,6	7,1	7,8	7,5	8,3	8,5	9,7	8,1
Perfilhos mortos	0,6	0,5	0,5	0,4	0,9	0,3	0,7	1,1	0,6	0,3	0,5	0,2	0,1	0,2	0,5	0,6
Ponteiros	3,0	2,6	2,5	2,9	2,6	4,1	3,5	3,3	3,5	4,1	3,9	4,1	5,8	4,5	5,3	6,0
Raízes	6,9	6,2	6,9	7,4	7,3	8,8	9,1	8,5	9,6	8,5	9,0	8,7	10,7	9,3	11,8	11,4
<i>Total</i>	39,2	35,4	39,1	42,0	41,4	49,8	51,6	48,2	54,4	48,1	51,4	49,4	60,8	53,1	67,1	65,0

Tabela 32 - Energia potencial da biomassa seca para as variedades V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8 de cana-de-açúcar por hectare (açúcar, bagaço, bainhas, folhas, perfilhos mortos, ponteiros e raízes) sob os tratamentos lâmina (L) x variedade (V). Valores em negrito indicam mensurações e os demais valores são estimativas.

(continua)

Biomassa	<i>energia</i> TOTAL (GJ·ha ⁻¹)															
	L50				L75				L75*				L100			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
Variedade, V1																
Açúcar	215,1	225,1	260,7	222,4	291,1	289,5	337,7	239,1	349,8	322,9	255,0	315,4	351,0	341,2	423,8	388,1
Bagaço	303,2	314,1	343,5	293,7	406,8	405,5	492,5	468,1	495,0	452,9	410,6	458,0	525,7	513,6	643,3	603,4
Bainhas	78,1	73,2	86,2	67,1	87,3	111,0	105,0	99,3	110,2	99,4	104,2	113,5	114,9	115,1	140,1	138,3
Folhas	179,9	161,1	179,9	168,0	199,9	224,6	241,5	199,1	221,9	213,3	215,5	222,3	241,1	230,6	277,8	264,3
Perfilhos mortos	15,7	30,7	8,6	27,9	21,6	18,4	31,2	26,7	18,2	31,5	16,6	12,1	12,0	23,7	23,2	15,8
Ponteiros	79,4	53,1	66,8	87,3	64,5	99,5	114,4	83,7	86,5	104,8	72,8	88,1	92,2	99,6	162,0	145,6
Raízes	208,9	216,2	227,9	210,7	286,1	289,4	342,3	290,4	303,8	308,6	256,2	286,8	352,0	333,3	442,4	414,2
<i>Total</i>	1080,2	1073,5	1173,6	1077,0	1357,1	1437,8	1664,6	1406,3	1585,4	1533,5	1330,8	1496,2	1689,0	1657,1	2112,6	1969,7
Variedade, V2																
Açúcar	204,1	196,3	212,8	208,5	292,7	274,5	350,5	281,6	305,1	290,0	301,5	336,0	389,9	342,2	348,1	349,0
Bagaço	282,1	271,2	291,4	282,4	380,1	328,9	477,7	424,4	415,9	392,7	364,1	424,9	520,2	478,9	551,9	530,6
Bainhas	85,6	88,0	93,6	79,9	110,5	118,4	138,9	122,7	131,5	131,5	124,6	133,9	161,1	143,1	151,2	151,1
Folhas	159,6	163,3	172,9	164,2	209,5	217,9	240,2	227,0	230,1	223,8	213,2	209,5	271,9	250,4	276,0	263,3
Perfilhos mortos	8,3	13,0	13,2	12,4	21,1	21,6	13,2	23,6	13,5	19,7	24,0	15,4	10,4	10,1	13,5	19,5
Ponteiros	87,9	66,3	54,9	103,3	86,6	69,3	131,2	85,3	99,1	100,2	76,6	108,0	157,5	107,6	114,9	96,7
Raízes	202,0	194,9	204,9	207,6	269,0	252,2	330,1	284,2	291,9	282,9	270,2	300,2	369,0	325,3	354,8	344,1
<i>Total</i>	1029,6	993,0	1043,7	1058,2	1369,4	1282,7	1681,8	1448,9	1487,1	1440,9	1374,2	1527,9	1880,1	1657,6	1810,4	1754,3

Tabela 32 - Energia potencial da biomassa seca para as variedades V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8 de cana-de-açúcar por hectare (açúcar, bagaço, bainhas, folhas, perfilhos mortos, ponteiros e raízes) sob os tratamentos lâmina (L) x variedade (V). Valores em negrito indicam mensurações e os demais valores são estimativas (continuação)

Biomassa	<i>energia</i> TOTAL (GJ·ha ⁻¹)															
	L50				L75				L75*				L100			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
Variedade, V3																
Açúcar	199,6	186,7	175,3	188,4	250,6	242,0	262,8	242,5	277,3	236,0	257,9	256,9	288,6	306,3	312,2	321,3
Bagaço	285,2	254,2	272,1	265,3	339,0	334,1	408,0	347,7	379,3	343,8	365,9	388,5	438,2	456,9	458,9	505,5
Bainhas	68,7	61,4	65,0	69,3	76,7	74,5	90,8	79,0	89,3	86,8	84,2	91,2	99,1	98,6	103,4	105,2
Folhas	140,0	139,1	134,0	149,9	162,3	166,3	183,4	172,3	181,6	184,2	182,1	188,5	198,7	199,0	220,3	202,4
Perfilhos mortos	9,6	10,8	6,4	13,3	11,4	17,5	19,7	11,2	4,7	19,1	10,8	13,1	12,3	15,2	18,7	7,2
Ponteiros	71,8	53,7	51,5	60,2	65,0	70,8	91,4	73,3	75,6	87,1	86,9	85,1	89,6	100,7	122,2	101,7
Raízes	198,0	180,5	179,8	190,8	231,5	231,5	269,7	236,7	257,7	244,5	252,4	261,4	287,7	300,5	315,6	317,3
<i>Total</i>	972,8	886,5	884,2	937,1	1136,5	1136,6	1325,9	1162,7	1265,5	1201,5	1240,1	1284,8	1414,1	1477,2	1551,3	1560,7
Variedade, V4																
Açúcar	188,5	235,7	202,9	246,6	327,0	345,7	321,2	274,0	321,7	304,5	343,7	321,3	371,9	315,9	417,3	335,6
Bagaço	295,5	330,7	308,1	320,6	433,3	490,8	493,1	486,9	430,2	455,6	518,0	456,2	567,0	510,0	629,5	609,3
Bainhas	88,2	83,6	85,6	96,8	114,9	131,4	126,9	112,9	118,1	131,3	136,3	124,3	154,8	121,9	162,0	151,4
Folhas	150,4	127,4	138,6	150,0	177,8	208,8	199,5	177,4	175,3	179,5	211,4	185,0	228,6	197,7	249,8	226,6
Perfilhos mortos	11,9	12,3	12,3	13,1	15,2	29,7	19,7	9,8	20,3	10,3	20,1	13,4	15,5	18,9	29,8	13,7
Ponteiros	74,0	66,7	54,1	126,4	81,8	114,9	82,8	93,9	92,3	112,7	75,3	93,0	143,3	110,2	142,5	92,9
Raízes	171,3	181,7	168,4	200,4	242,1	280,3	262,6	241,4	259,3	253,0	289,0	264,8	320,9	269,9	352,3	307,8
<i>Total</i>	979,8	1038,0	969,9	1153,8	1392,1	1601,6	1505,8	1396,3	1417,2	1446,8	1593,9	1457,9	1802,0	1544,6	1983,3	1737,2

Tabela 32 - Energia potencial da biomassa seca para as variedades V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8 de cana-de-açúcar por hectare (açúcar, bagaço, bainhas, folhas, perfilhos mortos, ponteiros e raízes) sob os tratamentos lâmina (L) x variedade (V). Valores em negrito indicam mensurações e os demais valores são estimativas (continuação)

Biomassa	<i>energiaTOTAL</i> (GJ·ha ⁻¹)															
	L50				L75				L75*				L100			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
Variedade, V5																
Açúcar	156,2	150,1	167,7	181,2	223,5	224,8	233,4	240,4	240,9	208,4	202,0	273,1	286,5	258,6	347,0	286,2
Bagaço	243,6	249,3	248,1	277,7	354,5	341,9	393,7	383,7	342,3	319,6	352,3	374,4	447,5	444,0	546,4	477,5
Bainhas	73,3	69,0	71,6	75,8	90,1	90,9	110,9	100,9	102,0	96,9	102,0	102,4	108,5	105,6	132,0	115,0
Folhas	115,7	107,1	113,9	119,5	132,5	133,6	157,7	156,1	146,0	144,9	153,4	159,5	148,7	149,7	204,8	168,9
Perfilhos mortos	11,3	13,3	16,9	6,8	17,3	15,0	11,4	18,4	14,7	21,3	14,6	14,0	10,1	14,2	24,1	6,1
Ponteiros	72,5	72,0	53,2	64,8	74,7	90,7	103,1	97,8	81,8	110,9	82,1	117,7	146,7	101,8	134,9	88,3
Raízes	148,6	145,9	148,6	160,4	197,3	198,2	223,0	220,4	205,4	199,3	200,1	230,4	253,5	237,0	306,9	252,1
<i>Total</i>	821,3	806,6	820,0	886,3	1089,9	1095,0	1233,3	1217,8	1133,1	1101,3	1106,4	1271,4	1401,7	1310,8	1696,1	1394,1
Variedade, V6																
Açúcar	181,8	188,6	197,2	187,7	265,6	272,0	276,2	281,9	320,3	259,1	292,2	289,3	335,2	341,0	370,3	348,9
Bagaço	232,6	249,4	246,5	228,6	321,6	331,8	370,6	371,7	388,8	325,2	344,2	346,8	422,3	454,6	420,3	479,5
Bainhas	58,2	58,4	66,8	56,3	69,3	79,5	89,9	78,3	85,5	80,9	81,9	78,3	97,7	92,1	112,1	99,7
Folhas	108,5	99,4	113,6	102,6	122,0	140,5	148,6	121,2	146,3	133,1	136,3	134,0	164,5	141,2	171,9	154,7
Perfilhos mortos	7,7	7,7	8,2	10,5	17,2	12,0	13,4	7,4	11,5	11,4	17,7	10,1	7,1	3,6	16,1	8,5
Ponteiros	54,6	36,6	34,3	40,4	54,0	57,9	51,0	62,0	66,4	84,1	63,4	64,7	71,4	59,5	95,1	58,1
Raízes	142,5	141,8	147,9	138,9	188,5	198,3	210,4	204,4	226,0	198,1	207,7	204,8	243,5	241,9	263,3	254,6
<i>Total</i>	786,0	781,9	814,5	765,0	1038,3	1092,1	1160,1	1126,9	1244,9	1091,9	1143,4	1128,0	1341,7	1333,9	1449,1	1404,1

Tabela 32 - Energia potencial da biomassa seca para as variedades V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8 de cana-de-açúcar por hectare (açúcar, bagaço, bainhas, folhas, perfilhos mortos, ponteiros e raízes) sob os tratamentos lâmina (L) x variedade (V). Valores em negrito indicam mensurações e os demais valores são estimativas (conclusão)

Biomassa	<i>energia</i> TOTAL (GJ·ha ⁻¹)															
	L50				L75				L75*				L100			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
Variedade, V7																
Açúcar	185,1	146,2	184,2	199,6	242,7	288,9	267,3	208,4	272,2	253,1	273,1	248,0	326,2	274,5	380,6	259,5
Bagaço	252,9	210,4	250,1	271,8	319,1	398,8	353,5	394,8	348,3	326,1	340,9	333,5	452,0	447,3	502,8	473,9
Bainhas	69,2	62,4	70,5	66,8	80,0	86,5	87,9	74,9	86,8	88,1	97,7	88,1	118,3	97,5	114,0	105,1
Folhas	168,0	142,4	178,7	185,4	193,6	197,8	209,2	171,6	203,3	202,0	238,1	193,9	276,9	230,2	265,2	247,0
Perfilhos mortos	11,8	18,5	22,4	15,1	10,8	11,7	14,1	19,5	9,8	36,4	13,8	14,6	15,8	12,2	13,2	18,2
Ponteiros	88,0	66,3	69,2	74,9	86,0	101,7	101,9	109,7	107,0	103,6	96,4	103,6	123,5	100,6	175,4	102,1
Raízes	188,0	156,7	188,2	197,4	226,4	263,4	251,0	236,6	249,5	245,2	257,5	238,3	318,5	281,5	352,2	291,7
<i>Total</i>	962,9	802,8	963,2	1011,0	1158,5	1348,8	1284,9	1215,5	1276,8	1254,5	1317,5	1220,1	1631,3	1443,9	1803,4	1497,5
Variedade, V8																
Açúcar	135,6	123,7	131,3	147,0	154,7	165,8	172,4	139,8	195,1	159,8	172,8	169,1	210,0	168,4	226,5	221,2
Bagaço	202,1	180,6	212,1	233,9	221,4	286,0	282,2	295,0	310,5	260,9	284,3	253,2	333,9	285,9	375,0	384,4
Bainhas	50,6	53,2	56,7	56,5	52,3	67,5	75,3	63,1	78,5	72,2	72,7	77,2	81,2	79,2	89,5	72,6
Folhas	110,1	98,8	111,5	106,9	102,4	121,8	147,9	121,9	134,6	125,0	137,9	132,2	145,3	149,8	171,1	140,5
Perfilhos mortos	9,9	7,7	8,2	7,3	16,0	6,0	11,2	19,6	10,1	5,5	8,1	4,0	1,9	4,2	8,4	10,2
Ponteiros	50,9	46,5	44,9	50,9	45,3	73,4	62,6	59,4	64,8	72,5	69,2	73,9	104,9	81,1	93,1	107,2
Raízes	113,4	104,4	113,3	121,8	122,6	146,9	153,0	142,7	156,9	142,0	148,2	142,5	170,8	156,8	188,7	182,7
<i>Total</i>	672,6	615,0	677,9	724,2	714,7	867,3	904,6	841,6	950,6	837,9	893,2	852,1	1047,9	925,4	1152,3	1118,8

Figura 24 - Biomassa seca para as variedades de cana-de-açúcar V1, V4 e V8 submetidas a diferentes lâminas de irrigação

Figura 25 - Energia potencial para as variedades de cana-de-açúcar V1, V4 e V8 submetidas a diferentes lâminas de irrigação

4.5 Energia útil (estimada) para a biomassa seca de cana-de-açúcar

A energia útil da biomassa estimada por hectare para a combinação ou interação dos fatores lâmina e variedade (exceto: açúcar, raízes e 5 ton MS palhiço/ha), encontra-se na Figura 29. Observou-se que, sem importar o nível de lâmina ou variedade, a participação do bagaço na energia útil da cana-de-açúcar é sempre maior em relação ao palhiço. Na Tabela 33 e Tabela 34, apresenta-se a biomassa e energia útil estimada para as variedades V1-V8 de cana-de-açúcar. A energia útil média para as variedades V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8 foi 790,2; 766,7; 629,6; 792,2; 623,5; 542,5; 677,0; 462,3 $\text{GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$, respectivamente (Figura 26).

Esperava-se, para a mesma variedade de cana-de-açúcar, um aumento da energia útil com a diminuição do açúcar total recuperável (ATR); porém, os valores de energia útil e ATR para a variedade V8 foram os menores entre todas as variedades estudadas (Figura 26 e Figura 27). Isto devido, talvez, à produção de cana-de-açúcar sob irrigação de alta frequência (gotejamento); evitando assim, o estresse hídrico que houvesse favorecido o aumento do açúcar total recuperável na cana.

Figura 26 - Energia útil estimada média para o bagaço e o palhiço (bainhas, folhas, perfilhos mortos e ponteiros; descontado 5 t·MS ha⁻¹ deixadas no campo) das variedades V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8 de cana-de-açúcar

Figura 27 - Valores de açúcar total recuperável (ATR) para as 8 variedades estudadas. Variedades identificadas com letras distintas diferem entre si a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Scott Knott

*Fonte: Barbosa (2015)

A participação da biomassa seca à energia útil média da cana-de-açúcar está apresentada na Figura 28; a biomassa seca utilizável média é 36,90 t·ha⁻¹ que corresponde a 660,29 GJ.

Figura 28 - Participação da biomassa seca à energia útil média da cana-de-açúcar (660,29 GJ·ha⁻¹)

A energia útil real é menor do que a energia útil aqui apresentada, devido a que na prática a biomassa de cana-de-açúcar não é submetida a secagem industrial prévia a sua combustão; ou seja, os resultados aqui apresentados correspondem à energia máxima (potencial) que a biomassa utilizável de cana-de-açúcar pode liberar. No caso da energia potencial por hectare, deve-se levar em conta que os valores foram extrapolados da energia por touceira – área de influência 0.31 m².

Figura 29 - Energia útil estimada para o bagaço e o palhiço (bainhas, folhas, perfilhos mortos e ponteiros; descontado 5 t·MS ha⁻¹ deixadas no campo) da cana-de-açúcar submetidas a diferentes lâminas de irrigação (valores médios dos processos de maturação M1, M2, M3 e M4)

Tabela 33 - Biomassa seca utilizável estimada para as variedades V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8 de cana-de-açúcar (bagaço+palhiço_utilizável) sob os tratamentos lâmina (L) x maturações (M)

(continua)																
Biomassa	<i>biomassa</i> Útil (t·ha ⁻¹)															
	L50				L75				L75*				L100			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
Variedade, V1																
Bagaço	16,6	17,3	18,8	16,2	22,9	22,3	26,6	25,4	26,9	24,9	22,6	25,1	28,5	28,3	35,4	33,4
Bainhas	3,3	3,1	3,7	3,0	4,0	5,2	4,9	4,6	5,1	4,7	4,8	5,2	5,4	5,5	6,9	6,8
Folhas	7,5	6,6	7,5	7,3	9,0	10,3	11,0	8,9	10,1	9,7	9,7	10,0	11,0	10,6	13,4	12,8
Perfilhos mortos	0,7	1,3	0,4	1,2	0,9	0,9	1,5	1,2	0,9	1,5	0,8	0,6	0,6	1,1	1,1	0,8
Ponteiros	3,3	2,2	2,8	3,7	2,9	4,5	5,1	3,7	3,9	4,7	3,3	3,9	4,1	4,5	7,7	6,9
Útil	31,4	30,5	33,2	31,4	39,7	43,2	49,2	43,8	46,8	45,5	41,1	44,8	49,6	50,0	64,6	60,7
Variedade, V2																
Bagaço	15,5	14,9	16,0	15,6	20,9	18,1	26,3	23,4	22,9	21,6	20,1	23,4	28,6	26,4	30,4	29,2
Bainhas	3,7	3,7	4,0	3,5	5,1	5,4	6,7	5,7	6,2	6,2	5,7	6,3	7,9	6,8	7,3	7,3
Folhas	6,7	6,8	7,2	7,0	9,4	9,8	11,3	10,4	10,6	10,3	9,7	9,6	13,2	11,8	13,2	12,5
Perfilhos mortos	0,4	0,6	0,6	0,5	1,0	1,0	0,6	1,1	0,6	0,9	1,1	0,7	0,5	0,5	0,7	0,9
Ponteiros	3,7	2,7	2,3	4,4	3,9	3,1	6,1	3,9	4,5	4,6	3,4	4,9	7,5	5,0	5,4	4,5
Útil	29,9	28,7	30,1	31,0	40,3	37,4	51,0	44,5	44,9	43,7	40,0	44,9	57,8	50,4	57,0	54,4
Variedade, V3																
Bagaço	15,7	14,0	15,0	14,6	18,7	18,4	22,5	19,1	20,9	18,9	20,2	21,4	24,1	25,2	25,3	27,8
Bainhas	2,8	2,4	2,5	2,8	3,2	3,2	4,1	3,4	3,9	3,9	3,7	4,1	4,5	4,5	4,9	4,8
Folhas	5,5	5,3	5,0	6,0	6,6	6,9	8,0	7,2	7,7	8,0	7,8	8,2	8,8	8,9	10,1	9,1
Perfilhos mortos	0,4	0,4	0,2	0,5	0,5	0,8	0,9	0,5	0,2	0,9	0,5	0,6	0,6	0,7	0,9	0,3
Ponteiros	2,8	2,0	1,9	2,4	2,6	2,9	4,0	3,0	3,2	3,7	3,7	3,7	3,9	4,4	5,6	4,5
Útil	27,2	24,1	24,6	26,3	31,7	32,2	39,4	33,3	35,9	35,4	35,9	37,9	41,9	43,7	46,7	46,6

Tabela 33 - Biomassa seca utilizável estimada para as variedades V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8 de cana-de-açúcar (bagaço+palhiço_utilizável) sob os tratamentos lâmina (L) x maturações (M)

Biomassa	<i>biomassa</i> Útil (t·ha ⁻¹)															
	L50				L75				L75*				L100			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
Variedade, V4																
Bagaço	16,5	18,2	17,0	17,7	23,7	27,0	27,4	26,6	23,9	25,1	28,3	25,2	31,2	28,1	34,5	33,1
Bainhas	3,8	3,4	3,4	4,3	5,1	6,2	5,8	5,0	5,4	6,0	6,4	5,5	7,5	5,6	7,9	7,1
Folhas	6,3	5,0	5,4	6,5	7,8	9,7	8,9	7,7	7,8	8,1	9,5	8,3	10,8	9,0	12,0	10,6
Perfilhos mortos	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	1,4	0,9	0,4	0,9	0,5	0,9	0,6	0,8	0,9	1,5	0,6
Ponteiros	3,1	2,6	2,1	5,4	3,6	5,3	3,7	4,0	4,1	5,0	3,4	4,1	6,7	5,0	6,6	4,2
Útil	30,2	29,7	28,5	34,6	40,8	49,6	46,7	43,8	42,3	44,7	48,6	43,7	56,9	48,6	62,4	55,6
Variedade, V5																
Bagaço	13,4	13,7	13,7	15,3	19,5	18,8	21,7	21,1	18,9	17,6	19,4	20,6	24,6	24,4	30,1	26,3
Bainhas	2,9	2,7	2,8	3,0	3,8	3,9	5,0	4,5	4,4	4,3	4,5	4,6	5,0	4,7	6,3	5,2
Folhas	4,5	4,0	4,2	4,6	5,4	5,6	6,9	6,8	6,2	6,3	6,5	7,0	6,6	6,5	9,6	7,4
Perfilhos mortos	0,5	0,5	0,7	0,3	0,7	0,6	0,5	0,8	0,6	1,0	0,6	0,6	0,5	0,6	1,2	0,3
Ponteiros	2,8	2,7	2,0	2,4	3,0	3,7	4,5	4,2	3,4	4,8	3,5	5,1	6,5	4,4	6,2	3,8
Útil	24,0	23,6	23,3	25,5	32,5	32,7	38,5	37,4	33,5	33,9	34,5	38,0	43,2	40,6	53,4	42,9
Variedade, V6																
Bagaço	12,8	13,7	13,6	12,6	17,7	18,3	20,4	20,5	21,4	17,9	19,0	19,1	23,3	25,0	23,1	26,4
Bainhas	2,1	1,9	2,4	1,9	2,7	3,2	3,7	3,1	3,6	3,4	3,4	3,2	4,2	3,8	5,1	4,2
Folhas	3,8	3,2	3,9	3,4	4,6	5,6	6,0	4,6	5,9	5,4	5,5	5,3	6,9	5,6	7,6	6,4
Perfilhos mortos	0,3	0,3	0,3	0,4	0,7	0,5	0,6	0,3	0,5	0,5	0,7	0,4	0,3	0,1	0,7	0,4
Ponteiros	1,9	1,2	1,2	1,3	2,0	2,3	2,0	2,3	2,7	3,4	2,5	2,5	3,0	2,4	4,1	2,4
Útil	20,9	20,3	21,3	19,6	27,7	29,8	32,7	30,8	34,1	30,6	31,1	30,5	37,7	37,0	40,7	39,7

Tabela 33 - Biomassa seca utilizável estimada para as variedades V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8 de cana-de-açúcar (bagaço+palhiço_utilizável) sob os tratamentos lâmina (L) x maturações (M)

Biomassa	(conclusão)															
	<i>biomassa</i> Útil (t·ha-1)															
	L50				L75				L75*				L100			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
Variedade, V7																
Bagaço	13,9	11,6	13,8	15,0	17,6	22,0	19,5	21,7	19,2	18,0	18,8	18,4	24,9	24,6	27,7	26,1
Bainhas	2,9	2,5	3,0	2,9	3,5	3,9	4,0	3,3	3,9	4,0	4,5	4,0	5,7	4,5	5,5	4,9
Folhas	7,0	5,6	7,5	7,8	8,4	8,7	9,3	7,4	9,0	9,1	10,8	8,6	13,1	10,4	12,7	11,4
Perfilhos mortos	0,5	0,8	1,0	0,7	0,5	0,5	0,6	0,9	0,4	1,7	0,6	0,7	0,8	0,6	0,7	0,9
Ponteiros	3,6	2,6	2,9	3,1	3,7	4,4	4,5	4,7	4,7	4,6	4,3	4,5	5,8	4,5	8,3	4,7
Útil	28,1	23,0	28,2	29,4	33,6	39,5	37,9	38,1	37,3	37,4	39,1	36,1	50,2	44,7	54,9	47,9
Variedade, V8																
Bagaço	11,2	9,9	11,8	13,1	12,4	15,7	15,4	16,2	16,8	14,4	15,6	14,2	18,7	15,7	20,9	21,2
Bainhas	1,8	1,8	2,0	2,0	1,8	2,7	3,0	2,4	3,1	2,9	2,9	3,1	3,4	3,3	4,0	3,2
Folhas	3,9	3,2	3,8	3,7	3,5	4,6	5,8	4,7	5,3	4,8	5,4	5,2	6,1	6,1	7,4	6,0
Perfilhos mortos	0,4	0,3	0,3	0,3	0,6	0,2	0,5	0,8	0,4	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	0,4	0,4
Ponteiros	1,8	1,5	1,5	1,7	1,5	2,8	2,4	2,2	2,4	2,8	2,7	2,9	4,2	3,3	4,0	4,4
Útil	19,1	16,7	19,3	20,8	19,8	26,1	27,2	26,3	28,1	25,1	26,9	25,6	32,5	28,7	36,7	35,2

Tabela 34 - Energia útil da biomassa seca utilizável de cana-de-açúcar por hectare (bagaço + palhiço_utilizável) para as variedades V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8 sob os tratamentos lâmina (L) x Maturação (M). *Valores em negrito indicam mensurações e os demais valores são estimativas

(continua)

Biomassa	<i>energia</i> Útil (GJ·ha ⁻¹)															
	L50				L75				L75*				L100			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
Variedade, V1																
Bagaço	303,4	314,1	343,2	293,8	405,8	405,5	492,5	469,2	494,6	452,9	409,8	458,1	525,3	513,6	642,7	603,6
Bainhas	58,5	53,0	64,0	50,5	67,1	89,5	86,0	77,9	88,0	80,0	81,9	90,7	92,7	93,6	119,4	117,0
Folhas	134,7	116,7	133,4	126,5	154,1	181,2	197,9	156,4	177,3	171,7	169,6	177,8	194,7	187,6	237,2	223,2
Perfilhos mortos	11,8	22,2	6,4	21,0	16,6	14,9	25,6	21,0	14,5	25,3	13,1	9,6	9,7	19,2	19,8	13,4
Ponteiros	59,5	38,5	49,6	65,5	49,6	80,2	93,7	66,0	69,0	84,4	57,3	70,6	74,4	81,0	137,9	123,3
Útil	567,9	544,7	596,6	557,4	693,4	771,3	895,7	790,5	843,5	814,2	731,6	807,0	896,9	895,0	1157,2	1080,4
Variedade, V2																
Bagaço	282,1	271,2	291,4	282,4	380,1	328,9	477,7	424,4	415,9	392,7	364,1	424,9	520,2	478,9	551,9	530,6
Bainhas	63,5	64,6	69,0	60,3	87,8	94,1	115,6	99,2	107,1	107,2	99,6	108,6	137,5	118,5	127,2	126,0
Folhas	118,5	119,9	127,5	124,0	166,4	173,1	199,8	183,5	187,4	182,4	170,5	170,0	232,1	207,3	232,3	219,7
Perfilhos mortos	6,2	9,5	9,7	9,3	16,8	17,2	11,0	19,1	11,0	16,0	19,2	12,5	8,9	8,4	11,4	16,2
Ponteiros	65,2	48,7	40,5	78,0	68,8	55,0	109,1	69,0	80,7	81,7	61,3	87,6	134,4	89,1	96,7	80,7
Útil	535,5	513,9	538,1	554,1	719,8	668,2	913,2	795,2	802,1	780,0	714,7	803,7	1033,1	902,2	1019,5	973,3
Variedade, V3																
Bagaço	285,2	254,2	272,1	265,3	339,0	334,1	408,0	347,7	379,3	343,8	365,9	388,5	438,2	456,9	458,9	505,5
Bainhas	47,9	41,1	42,8	48,6	55,4	54,6	70,2	58,4	67,0	66,6	63,9	70,0	77,4	77,7	83,8	83,0
Folhas	97,7	93,1	88,3	105,0	117,2	122,0	141,7	127,3	136,2	141,4	138,2	144,8	155,1	156,8	178,7	159,8
Perfilhos mortos	6,7	7,2	4,2	9,3	8,2	12,9	15,2	8,3	3,5	14,7	8,2	10,1	9,6	12,0	15,2	5,7
Ponteiros	50,1	35,9	34,0	42,1	47,0	51,9	70,6	54,1	56,7	66,8	65,9	65,4	69,9	79,4	99,1	80,3
Útil	487,6	431,5	441,4	470,3	566,8	575,5	705,7	595,8	642,7	633,3	642,1	678,8	750,1	782,6	835,8	834,3

Tabela 34 - Energia útil da biomassa seca utilizável de cana-de-açúcar por hectare (bagaço + palhiço_utilizável) para as variedades V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8 sob os tratamentos lâmina (L) x Maturação (M). *Valores em negrito indicam mensurações e os demais valores são estimativas

(continuação)

Biomassa	<i>energia</i> Útil (GJ·ha ⁻¹)															
	L50				L75				L75*				L100			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
Variedade, V4																
Bagaço	296,0	330,7	308,6	320,5	433,1	490,8	494,0	486,9	430,6	455,6	516,6	456,3	566,5	510,0	629,6	609,8
Bainhas	64,7	58,3	59,8	74,6	88,7	107,6	100,8	87,5	93,2	104,7	109,3	97,9	129,6	98,0	137,2	123,8
Folhas	110,2	88,8	96,7	115,7	137,4	170,9	158,4	137,3	138,0	143,1	169,5	145,8	191,6	159,0	212,0	185,3
Perfilhos mortos	8,7	8,6	8,6	10,1	11,8	24,3	15,6	7,6	15,9	8,2	16,1	10,5	13,0	15,2	25,2	11,2
Ponteiros	54,1	46,5	37,8	97,5	64,0	94,1	65,9	72,7	73,1	89,9	60,3	73,2	120,3	88,6	119,6	76,0
Útil	533,6	532,8	511,5	618,3	734,9	887,7	834,7	792,0	750,8	801,4	871,8	783,7	1021,0	870,8	1123,7	1006,1
Variedade, V5																
Bagaço	243,6	249,3	248,1	277,7	354,5	341,9	393,7	383,7	342,3	319,6	352,3	374,4	447,5	444,0	546,4	477,5
Bainhas	49,8	45,9	47,1	50,9	65,0	66,7	85,6	77,2	76,0	74,2	76,7	79,6	85,5	80,6	108,7	88,4
Folhas	78,5	71,2	74,9	80,3	95,6	98,1	121,6	119,5	108,9	111,0	115,2	124,0	117,2	114,4	168,6	129,8
Perfilhos mortos	7,7	8,8	11,1	4,6	12,5	11,0	8,8	14,1	11,0	16,3	11,0	10,8	8,0	10,8	19,8	4,7
Ponteiros	49,2	47,9	35,0	43,5	53,9	66,6	79,5	74,9	61,0	84,9	61,7	91,4	115,6	77,8	111,1	67,8
Útil	428,8	423,0	416,2	457,0	581,6	584,3	689,3	669,4	599,3	605,9	616,8	680,2	773,8	727,6	954,5	768,2
Variedade, V6																
Bagaço	232,6	249,4	246,5	228,6	321,6	331,8	370,6	371,7	388,8	325,2	344,2	346,8	422,3	454,6	420,3	479,5
Bainhas	35,9	33,1	40,6	32,8	46,2	55,5	63,9	52,8	61,3	58,0	58,0	54,4	72,6	64,9	87,2	72,5
Folhas	66,9	56,3	69,0	59,8	81,3	98,1	105,7	81,7	104,9	95,4	96,4	93,1	122,2	99,5	133,8	112,5
Perfilhos mortos	4,7	4,4	5,0	6,1	11,5	8,4	9,5	5,0	8,2	8,1	12,5	7,0	5,3	2,5	12,5	6,2
Ponteiros	33,7	20,8	20,8	23,6	36,0	40,4	36,2	41,8	47,6	60,3	44,9	45,0	53,1	41,9	74,0	42,3
Útil	374,0	363,9	381,9	350,9	496,5	534,2	586,0	553,0	611,0	547,0	556,0	546,2	675,4	663,4	727,9	713,0

Tabela 34 - Energia útil da biomassa seca utilizável de cana-de-açúcar por hectare (bagaço + palhiço_utilizável) para as variedades V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8 sob os tratamentos lâmina (L) x Maturação (M). *Valores em negrito indicam mensurações e os demais valores são estimativas

(conclusão)

Biomassa	<i>energia</i> Útil (GJ·ha-1)															
	L50				L75				L75*				L100			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
Variedade, V7																
Bagaço	252,9	210,4	250,1	271,8	319,1	398,8	353,5	394,8	348,3	326,1	340,9	333,5	452,0	447,3	502,8	473,9
Bainhas	51,1	43,4	52,3	49,6	61,0	67,3	69,2	57,4	68,0	70,1	78,4	68,7	98,8	78,0	96,3	85,5
Folhas	124,1	99,1	132,6	137,7	147,6	154,0	164,6	131,4	159,3	160,7	191,1	151,3	231,3	184,2	224,1	201,0
Perfilhos mortos	8,7	12,9	16,6	11,2	8,2	9,1	11,1	14,9	7,7	29,0	11,1	11,4	13,2	9,8	11,2	14,8
Ponteiros	65,0	46,2	51,4	55,6	65,5	79,2	80,2	84,0	83,9	82,4	77,4	80,8	103,2	80,5	148,2	83,1
Útil	501,8	412,0	502,9	525,9	601,4	708,4	678,6	682,4	667,1	668,3	698,9	645,8	898,5	799,8	982,5	858,4
Variedade, V8																
Bagaço	202,4	180,6	211,9	234,1	221,9	286,0	282,3	294,5	310,3	260,9	284,4	253,3	334,7	285,9	375,0	385,4
Bainhas	30,9	30,6	34,1	34,3	31,3	45,4	52,8	42,2	54,4	49,2	50,4	53,4	59,5	57,1	67,9	53,5
Folhas	67,3	56,8	67,1	64,8	61,3	82,0	103,6	81,4	93,1	85,2	95,5	91,3	106,6	107,9	129,9	103,1
Perfilhos mortos	6,0	4,4	4,9	4,4	9,5	4,0	7,9	13,1	7,0	3,7	5,6	2,8	1,4	3,0	6,4	7,5
Ponteiros	31,5	26,8	27,0	30,8	27,0	49,4	43,9	39,4	44,8	49,4	48,1	51,0	77,0	58,5	70,7	79,2
Útil	338,2	299,3	345,1	368,4	351,1	466,8	490,5	470,6	509,6	448,4	484,1	451,8	579,2	512,4	649,8	628,8

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir das informações obtidas nesta dissertação foram realizadas as seguintes estimativas exploratórias:

- a) Estimou-se o índice de captura de irradiação solar para as variedades V1, V2, V3, V4, V5, V6, V7 e V8 da cultura de cana-de-açúcar; na Tabela 35 e Tabela 36, observa-se que a eficiência de captura aumentou com a disponibilidade hídrica do solo (lâmina de irrigação). Os valores de eficiência de captura da Tabela 35 foram o resultado de dividir os valores de energia total da cana-de-açúcar (Tabela 32) entre a irradiância solar dentro da estufa, mensurada durante todo o ciclo de crescimento da cultura ($39,15 \text{ TJ ha}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$); enquanto os índices de captura enunciados na Tabela 36 foram estimados como a relação entre a energia útil das variedades de cana analisadas (Tabela 34) e a mesma irradiância solar mensurada dentro da estufa citada anteriormente. O valor médio estimado de captura da irradiância solar para cultura de cana-de-açúcar foi 3,17%.
- b) Estimou-se a fração em termos de percentagem da área necessária para irrigar a área total da cultura de cana-de-açúcar a partir da produção de biomassa e conversação dessa em eletricidade para movimentar os equipamentos de irrigação. Na Tabela 37 apresentam-se os valores que foram obtidos para diferentes cenários de requerimento de energia (tempo de irrigação). Os valores mensurados de poder calorífico superior da biomassa seca particionada de cana-de-açúcar foram ajustados (“corrigidos”) para a umidade provável. Logo, junto com os valores de biomassa útil (Tabela 33) foi estimada a energia útil ajustada. Dessa biomassa, assumiu-se que 30% é convertida em eletricidade; dessa eletricidade o 35% é autoconsumida na usina, e o 65% restante é utilizada na irrigação. Utilizou-se a seguinte relação de potência para irrigação: $3,0 \text{ C.V. ha}^{-1}$. Irrigação de 21 horas por dia. Em média 38 % da área de cana-de-açúcar da usina deve ser utilizada para a geração de energia elétrica consumida no sistema de irrigação da área total.

Tabela 35 - Eficiência de captura da energia solar pela cultura da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento (biomassa total)

Variedade	Eficiência da captura da irradiação solar (estufa) em porcentagem, tendo como referência a <i>energiaTOTAL</i>															
	L50				L75				L75*				L100			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
V1	2,76%	2,74%	3,00%	2,75%	3,47%	3,67%	4,25%	3,59%	4,05%	3,92%	3,40%	3,82%	4,31%	4,23%	5,40%	5,03%
V2	2,63%	2,54%	2,67%	2,70%	3,50%	3,28%	4,30%	3,70%	3,80%	3,68%	3,51%	3,90%	4,80%	4,23%	4,62%	4,48%
V3	2,48%	2,26%	2,26%	2,39%	2,90%	2,90%	3,39%	2,97%	3,23%	3,07%	3,17%	3,28%	3,61%	3,77%	3,96%	3,99%
V4	2,50%	2,65%	2,48%	2,95%	3,56%	4,09%	3,85%	3,57%	3,62%	3,70%	4,07%	3,72%	4,60%	3,95%	5,07%	4,44%
V5	2,10%	2,06%	2,09%	2,26%	2,78%	2,80%	3,15%	3,11%	2,89%	2,81%	2,83%	3,25%	3,58%	3,35%	4,33%	3,56%
V6	2,01%	2,00%	2,08%	1,95%	2,65%	2,79%	2,96%	2,88%	3,18%	2,79%	2,92%	2,88%	3,43%	3,41%	3,70%	3,59%
V7	2,46%	2,05%	2,46%	2,58%	2,96%	3,45%	3,28%	3,10%	3,26%	3,20%	3,37%	3,12%	4,17%	3,69%	4,61%	3,82%
V8	1,72%	1,57%	1,73%	1,85%	1,83%	2,22%	2,31%	2,15%	2,43%	2,14%	2,28%	2,18%	2,68%	2,36%	2,94%	2,86%
Média	2,33%	2,23%	2,35%	2,43%	2,96%	3,15%	3,44%	3,13%	3,31%	3,16%	3,19%	3,27%	3,90%	3,62%	4,33%	3,97%

Irradiação solar medida = 3915,17 MJ m⁻² ciclo⁻¹ = 39151,7 GJ ha⁻² ciclo⁻¹ (380 dias)

Tabela 36 - Eficiência de captura da energia solar pela cultura da cana-de-açúcar irrigada por gotejamento (biomassa utilizável)

Variedade	Eficiência da captura da irradiação solar (estufa) em porcentagem, tendo como referência a <i>energia</i> ÚTIL															
	L50				L75				L75*				L100			
	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
V1	1,45%	1,39%	1,52%	1,42%	1,77%	1,97%	2,29%	2,02%	2,15%	2,08%	1,87%	2,06%	2,29%	2,29%	2,96%	2,76%
V2	1,37%	1,31%	1,37%	1,42%	1,84%	1,71%	2,33%	2,03%	2,05%	1,99%	1,83%	2,05%	2,64%	2,30%	2,60%	2,49%
V3	1,25%	1,10%	1,13%	1,20%	1,45%	1,47%	1,80%	1,52%	1,64%	1,62%	1,64%	1,73%	1,92%	2,00%	2,13%	2,13%
V4	1,36%	1,36%	1,31%	1,58%	1,88%	2,27%	2,13%	2,02%	1,92%	2,05%	2,23%	2,00%	2,61%	2,22%	2,87%	2,57%
V5	1,10%	1,08%	1,06%	1,17%	1,49%	1,49%	1,76%	1,71%	1,53%	1,55%	1,58%	1,74%	1,98%	1,86%	2,44%	1,96%
V6	0,96%	0,93%	0,98%	0,90%	1,27%	1,36%	1,50%	1,41%	1,56%	1,40%	1,42%	1,40%	1,73%	1,69%	1,86%	1,82%
V7	1,28%	1,05%	1,28%	1,34%	1,54%	1,81%	1,73%	1,74%	1,70%	1,71%	1,79%	1,65%	2,29%	2,04%	2,51%	2,19%
V8	0,86%	0,76%	0,88%	0,94%	0,90%	1,19%	1,25%	1,20%	1,30%	1,15%	1,24%	1,15%	1,48%	1,31%	1,66%	1,61%
Média	1,20%	1,12%	1,19%	1,25%	1,52%	1,66%	1,85%	1,71%	1,73%	1,69%	1,70%	1,72%	2,12%	1,96%	2,38%	2,19%

Irradiação solar medida = $3915,17 \text{ MJ m}^{-2} \text{ ciclo}^{-1} = 39151,7 \text{ GJ ha}^{-2} \text{ ciclo}^{-1}$ (380 dias)

Tabela 37 - Porcentagem de área destinada à geração de energia para a irrigação da área total

Tempo de irrigação	L100			
	M1	M2	M3	M4
4 meses/ano	23,49%	25,59%	20,77%	23,06%
6 meses/ano	35,24%	38,39%	31,16%	34,58%
10 meses/ano	58,73%	63,98%	51,93%	57,64%

Considerações: umidade do bagaço = 50%; umidade do palhico = 15%; teor de hidrogênio da biomassa da cana-de-açúcar = 6%; estimativas realizadas a partir da energia útil da cultura de cana.

- c) Estimou-se a eficiência de uso da água para gerar energia por médio da seguinte relação: energia gerada pela combustão direta da biomassa utilizável (ajustada) de cana-de-açúcar e a energia hidrelétrica que seria gerada com o volume de água irrigado na produção da biomassa anteriormente citada. Os valores obtidos apresentam-se na Tabela 38. Em média a relação estimada entre energia elétrica biomassa/hidrelétrica foi 3,5.

Tabela 38 - Relação energia elétrica biomassa/hidrelétrica

Variedade	L100			
	M1	M2	M3	M4
V1	3,36	3,54	3,90	3,96
V2	4,07	3,65	3,52	3,60
V3	3,36	3,68	3,37	3,52
V4	3,90	3,41	3,85	3,59
V5	3,52	3,41	3,84	3,29
V6	3,19	3,14	3,17	3,16
V7	4,09	3,67	3,93	3,64
V8	3,37	3,16	3,27	3,41
Média	3,61	3,46	3,61	3,52

Considerações: biomassa utilizável ajustada: umidade do bagaço = 50%; umidade do palhico = 15%; eficiência da turbina hidráulica = 80%; altura manométrica 240 metros (6 barragens).

6 CONCLUSÕES

Nas condições em que este experimento foi conduzido, irrigação por gotejamento de alta frequência, pode-se concluir que:

- a) Para o bagaço, as folhas e o ponteiro não se confirmou a hipótese de trabalho, de que existe uma relação entre o poder calorífico das diferentes partições da biomassa seca de cana-de-açúcar em função das variedades, das condições hídricas no solo durante o ciclo de crescimento (lâminas de irrigação) e dos diferentes processos de maturação (níveis de stress hídrico impostos na fase final do ciclo da cultura); enquanto que para as bainhas essa hipótese foi confirmada;
- b) A energia total média para as oito variedades estudadas foi 1241,87 GJ ha⁻¹ que correspondem a 71,41 t MS ha⁻¹ (açúcar, bagaço, bainhas, folhas, perfilhos mortos, ponteiros e raízes);
- c) A energia útil média para as oito variedades estudadas de cana-de-açúcar foi 660,29 GJ·ha⁻¹, em relação a 36,90 t MS ha⁻¹ (bagaço e palhiço utilizável) e 0,54 t de cinzas;
- d) O poder calorífico superior médio do bagaço foi 18,16 MJ·kg⁻¹, para as bainhas 17,21 MJ·kg⁻¹, para as folhas 17,64 MJ·kg⁻¹, e para o ponteiro 17,84 MJ·kg⁻¹;
- e) O teor de cinzas médio do bagaço foi 0,86%, das bainhas 2,18%, das folhas 2,17 e do ponteiro 1,91%;
- f) A eficiência de captura da irradiância solar pela cultura de cana-de-açúcar foi 2,34%; 3,17%; 3,23%; e 3,96% para as lâminas L50, L75, L75* e L100, respectivamente;
- g) A área plantada de cana-de-açúcar necessária para gerar a energia elétrica consumida no sistema de irrigação com relação à área total plantada pela usina é aproximadamente 23%; 34% e 58% para períodos anuais de operação do sistema de irrigação de 4, 6 e 10 meses respectivamente;

- h) Para o cenário proposto neste estudo, em média, a relação estimada entre a energia elétrica gerada por meio da combustão direta da biomassa útil de cana-de-açúcar e a energia hidroelétrica produzida pelo volume equivalente de água consumido pela cultura de cana-de-açúcar no tratamento L100 é de 3,61; 3,46; 3,61 e 3,52 para os processos de maturação M1, M2, M3 e M4, respectivamente, evidenciando que a política energética nacional deverá focar-se futuramente na bioeletricidade em detrimento à hidroeletricidade quando se considera a questão de sustentabilidade e os usos múltiplos dos recursos hídricos nas bacias hidrográficas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3.ed. Brasília: Aneel, 2008. 236p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D5468-02 (2007)**: Standard test method for gross calorific and ash value of waste materials. West Conshohocken, 2007. 8p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D1193-06 (2007)**: Standard Specification for Reagent Water. West Conshohocken, 2007. 6p.

BAIN R.L.; OVEREND, R.P.; CRAIG, K.R. Biomass-fired powergeneration. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 54, p. 1-16, 1998.

BARBOSA, F.S. **Produtividade de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento: interações entre variedades, lâminas e intensidade do déficit hídrico na fase de maturação**. 2015. 174p. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

BOTHA, T.; von BLOTTNITZ, H. A comparison of the environmental benefits of bagasse-derived electricity and fuel ethanol on a life-cycle basis. **Energy Policy**, Amsterdam, v. 34, p. 2654-2661, 2006.

BOX, G.E.P. Non-normality and test on variance. **Biometrika**, London, v. 40, n. 4, p. 318-335, 1953.

BOX, G.E.P.; COX, D.R. An analysis of transformations. **Journal of the Royal Statistical Society**, London, v. 26, n. 2, p. 211-252, 1964.

CHANNIWALA, S.A.; PARIKH, P.P. A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. **Fuel**, Amsterdam, v. 81, p. 1051-1063, 2002

CHAUHAN, M.K.; VARUN; CHAUDHARY, S; KUMAR, S.; SAMAR. Life cycle assessment of sugar industry: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 15, n. 7, p. 3445-3453, 2011.

CINTRA, T.C. **Avaliações energéticas de espécies florestais nativas plantadas na região do Médio Paranapanema, SP**. 2009. 84p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

CONTRERAS, A.M.; ROSA, E.; PÉREZ, M.; LANGENHOVE, H.V.; DEWULF, J. Comparative life cycle assessment of four alternatives for using by-products of cane sugar production. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 17, p. 772-779, 2009.

CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual de instruções**. 5. ed. Piracicaba, 2006. 112p.

EVANS, A; STREZOV, V; EVANS, T.J. Sustainability considerations for electricity generation from biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 14, p. 1419-1427, 2010.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2014 – Ano base 2013**. Disponível em:

<https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2014_Web.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2015

FERREIRA, D. F. **Sisvar**: a computer statistical analysis system. 2010. Disponível em <<http://www.dex.ufla.br/~danielff/softwares.htm>>. Acesso em: 19 jan. 2015

FRAVET, P.R.; SOARES, R.A.; LANA, R.M.; LANA, A.M.; KORNDÖRFER, G. Efeito de doses de torta de filtro e modo de aplicação sobre a produtividade e qualidade tecnológica da soqueira de cana-de-açúcar. **Ciência e agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 3, p. 618-624, 2010.

FURLANI NETO, V.L.; RIPOLI, T.C.; VILLA NOVA, N.A. Biomassa de cana-de-açúcar: energia contida no palhico remanescente de colheita mecânica. **STAB - Açúcar, Alcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 15, n. 4, p. 24-27, 1997.

GROVER, P.D. **Thermochemical Characterisation of Biomass Residues for Gasification**. Delhi: Indian Institute of Technology, 1989. 1v.

HASSUANI, S.J.; LEAL, M.R.L.V.; MACEDO, I.C. **Biomass power generation**: sugar cane bagasse and trash. Piracicaba: PNUD, Centro de Tecnologia Canavieira. 2005. 216p. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0001/1594.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2015.

HUANG, C.; HAN, L.; YANG, Z.; LIU, X. Ultimate analysis and heating value prediction of Straw by near infrared spectroscopy, **Waste Management**, Amsterdam, v. 29, p. 1793-1797, 2009.

HUGOT, E. **Handbook of Cane Sugar Engineering**. 3rd .ed. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1986. 1186p.

INNOCENTE, A.F. **Cogeração a partir da biomassa residual de cana-de-açúcar - Estudo de caso**. 2011. 124p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2011.

JENKINS, B.M.; BAXTER, L.L., MILES Jr., T.R.; MILES, T.R. Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 54, p. 17-46, 1998.

JENKINS, B.M.; EBELING, J.M. Thermochemical properties of biomass fuels: an analysis of 62 kinds of biomass for heat value. **California Agriculture**, June 1985. p. 14-16.

JORAPUR, R.; RAJVANSHI, A.K. Sugarcane leaf-bagasse gasifiers for industrial heating applications. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 13, p. 141-146, 1997.

LEE, Y.; PARK, J.; RYU, C.; GANG, K.S.; YANG, W.; PARK, Y.; JUNG, J.; HYUN, S. Comparison of biochar properties from biomass residues produced by slow pyrolysis at 500 °C. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 148, p. 196-201, 2013.

LIMA, T.M. **Estudo energético do bagaço de diferentes variedades de cana-de-açúcar**. 2011. 74p. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São José do Rio Preto, 2011.

LONG, H; LI, X; WANG, H E JIA, J. Biomass resources and their bioenergy potential estimation: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 26, p. 344-352, 2013.

LOPES SILVA, D.A.; DELAI, I.; DELGADO MONTES, M.L., OMETTO, A.R. Life cycle assessment of the sugarcane bagasse electricity generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v.32, p. 532-547, 2014.

MBOHWA, C.; FUKUDA, S. Electricity from bagasse in Zimbabwe. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 25, p. 197-207, 2003.

MENDIBURU, F. de. **R package ‘agricolae’**: Statistical Procedures for Agricultural Research. 2014. Disponível em <<http://CRAN.R-project.org/package=agricolae>>. Acesso em: 17 jan. 2015

MESCHEDE, D.K.; VELINI, E.D.; CARBONARI, C.A.; MORAES, C.P. Teores de lignina e celulose em plantas de cana-de-açúcar em função da aplicação de maturadores. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 121-127, 2012.

MUNIR, S.; DAOOD, S.S.; NIMMO, W; CUNLIFFE, A.M.; GIBBS, B.M. Thermal analysis and devolatilization kinetics of cotton stalk, sugar cane bagasse and shea meal under nitrogen and air atmospheres. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 100, p. 1413-1418, 2009.

NHUCHHEN, D.R.; ABDUL SALAM, P. Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: A new approach. **Fuel**, Amsterdam, v. 99, p. 55-63, 2012.

OGATA, B.H. **Caracterização das frações celulose, hemicelulose e lignina de diferentes genótipos de cana-de-açúcar e potencial de uso em biorrefinarias**. 2013. 108p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

OMETTO, A.R.; HAUSCHILD, M.Z.; ROMA, W.N. Lifecycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Brazil. **International Journal of Life Cycle Assessment**, Berlin, v. 14, p. 236-247, 2009.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S.A.; GHOSAL, G.K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, Amsterdam, v. 84, p. 487-494, 2005.

PIPPO, W.A.; LUENGO, C.A.; ALONSO AMADOR, L.; MORALES ALBERTERIS; GARZONE, P.; CORNACCHIA, G. Energy Recovery from Sugarcane-Trash in the Light of 2nd Generation Biofuels. Part 1: Current Situation and Environmental Aspects. **Waste Biomass Valor**, Amsterdam, v. 2, p. 1-16, 2011.

PROTÁSIO, T.P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G.H.; COUTO, A.; TRUGILHO, P.F.; GUIMARÃES JÚNIOR, M. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 66, p. 113-122, 2011.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, 2014. Disponível em <<http://www.R-project.org>>. Acesso em: 15 jan. 2015.

RIPOLI, T.C.C. **Utilização do material remanescente da colheita da cana-de- açúcar (*Saccharum spp.*): equacionamento dos balanços energético e econômico**. 1991. 150p. Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

RIPOLI, T.C.; MOLINA JUNIOR, W.F.; RÍPOLI, M.L.C. Energy potential of sugar cane biomass in Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.57, n. 4, p. 677-681, 2000.

RIPOLI, T.C.; MOLINA JUNIOR, W.F.; STUPIELLO, J.P.; NOGUEIRA, M.C.; SACCOMANO, J.B. Potencial energético de resíduos de colheita de cana verde. **STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 10, n. 1, p. 23-26, 1991.

SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysis of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, London, v. 52, n. 4, p. 591-611, 1965.

SILVA, G.M. **Pré-tratamento do bagaço de cana de açúcar com amônia aquosa para a produção de etanol**. 2011. 104p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

SILVA, M.B.; MORAIS, A.S. Avaliação energética do bagaço de cana em diferentes níveis de umidade e graus de compactação. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 28., 2008, Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2008_TN_STP_077_543_11289.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2014.

SUÁREZ, J.A.; LUENGO, C.A.; FELFLI, F.F.; BEZZON, G.; BEATÓN, P.A. Thermochemical properties of Cuban biomass. **Energy Sources**, Amsterdam, v. 22, p. 851-857, 2000.

TELMO, C.; LOUSADA, J. Heating values of wood pellets from different species. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v.35, n. 7, p. 2634-2639, 2011.

VELÁZQUEZ, M.B. **Aprovechamiento de los residuos forestales para uso energético**. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2006. 158p.

VENABLES, W.N.; RIPLEY, B.D. **Modern Applied Statistics with S**. 4th ed. New York: Springer, 2002. 504p.

YIN, C-Y. Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses. **Fuel**, Amsterdam, v. 90, p. 1128-1132, 2011.