



LARYSSA FERREIRA VIANA

**POTENCIAL ENERGÉTICO DO BAGAÇO E
PALHIÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR,
CV. SP80-1842, EM ÁREA DE ALAMBIQUE
ARTESANAL**

LAVRAS-MG

2011

LARYSSA FERREIRA VIANA

**POTENCIAL ENERGÉTICO DO BAGAÇO E PALHIÇO DE CANA-DE-
AÇÚCAR, CV. SP80-1842, EM ÁREA DE ALAMBIQUE ARTESANAL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. Luiz Antônio de Bastos Andrade

Coorientador

Dr. Paulo Fernando Trugilho

LAVRAS-MG

2011

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Viana, Laryssa Ferreira.

Potencial energético do bagaço e palhiço de cana-de-açúcar,
cv. SP80-1842, em área de alambique artesanal / Laryssa
Ferreira Viana.– Lavras : UFLA, 2011.

102 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2011.

Orientador: Luiz Antônio de Bastos Andrade.

Bibliografia.

1. Biomassa. 2. Bagaço. 3. Energia. 4. Resíduos. I. Universidade
Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 662.88

LARYSSA FERREIRA VIANA

**POTENCIAL ENERGÉTICO DO BAGAÇO E PALHIÇO DE CANA-DE-
AÇÚCAR, CV. SP80-1842, EM ÁREA DE ALAMBIQUE ARTESANAL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 04 de fevereiro de 2011.

Dr. Moisés de Sousa Reis EPAMIG

Dr. Júlio César Garcia IAC

Dr. Ivan Antônio dos Anjos IAC

Dr. Luiz Antônio de Bastos Andrade

Orientador

Dr. Paulo Fernando Trugilho

Coorientador

LAVRAS-MG

2011

AGRADECIMENTOS

A Deus, por mais esta etapa vencida.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Agricultura, pela oportunidade concedida.

Ao professor Luiz Antônio de Bastos Andrade, pela força, orientação, ensinamento, compreensão e pelo estímulo em buscar sempre mais conhecimento.

Ao professor Paulo Fernando Trugilho, pelos ensinamentos e amigável convivência.

Aos pesquisadores Ivan Antônio dos Anjos, Júlio César Garcia e Moizes de Sousa Reis, pela disponibilidade em participarem da banca de defesa e pelas contribuições apresentadas.

A todos os colegas e amigos do Curso de Fitotecnia, pela enriquecedora convivência e auxílio nos trabalhos.

Aos funcionários de campo e aos funcionários do Departamento de Agricultura e do Departamento de Ciências Florestais, pela atenção e amizade. Agradecimento especial ao alambique João Mendes- “JM”, no município de Perdões, que nos cedeu com presteza o local para realização dos trabalhos. Homenagem póstuma ao Sr. João Mendes, o meu eterno reconhecimento e agradecimento.

Agradeço aos meus pais e familiares, pelo apoio constante em todos os momentos de minha vida.

Enfim, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho foi conduzido com o objetivo de avaliar o potencial energético do bagaço e palhiço de cana, produzidos por um alambique artesanal, típico de pequenos produtores de cachaça de Minas Gerais, ao longo da safra de cana, junho a outubro, ciclo da cana soca, colhida sem a queima prévia do canavial. Foi utilizada a variedade SP80-1842 que apresenta boa produtividade agrícola em cana planta e soca. O experimento foi instalado em área do alambique João Mendes - "JM", no município de Perdões, Minas Gerais no ano agrícola de 2008/2009. Os tratamentos foram avaliados utilizando-se o delineamento experimental de blocos casualizados, com 5 tratamentos, correspondendo a cinco épocas de corte (junho, julho, agosto, setembro e outubro), com cinco repetições, totalizando 25 parcelas, sendo os dados tomados nas três linhas centrais. Os caracteres avaliados foram: rendimento de cana integral, rendimento de colmos, rendimento de palhiço, rendimento de bagaço, rendimento de bagaço + palhiço, brix (%) caldo, rendimento de matéria seca do palhiço e do bagaço, poder calorífico do bagaço e do palhiço e análise elementar do material. Foi realizada análise de variância com o auxílio do uso do sistema computacional Sisvar®. O rendimento de bagaço foi maior em setembro, provavelmente devido ao pico da época de seca na região. Os valores obtidos para brix foram maiores em agosto/setembro/outubro devido a maior maturação da cana-de-açúcar. Foi constatado que o poder calorífico superior e rendimento em calorias do bagaço e palhiço foi maior em setembro/outubro do que nos meses de junho/julho/agosto, provavelmente devido ao menor teor de umidade e maior rendimento em matéria seca nos meses de setembro/outubro. Para a umidade em base seca há uma maior variação presente no bagaço e, em geral, quanto menor a umidade, maior é o poder calorífico. O Poder Calorífico Inferior, o Poder Calorífico Útil e o Rendimento em calorias do bagaço e palhiço aumentaram com o avançar da safra de cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Biomassa. Cana-de-açúcar. Bagaço. Energia. Resíduos.

ABSTRACT

The present work was conducted with the objective of evaluate the energetic potential of the sugar-cane bagasse and chaff, produced by an artisan distillery, caracteristical to small cachaça producers in Minas Gerais, during harvest season of the sugar cane, from June to October, cicle of the ratoon, harvested without prior burning of the crop. It was utilized the variety SP80-1842 which presents a good agricultural productivity in plant-cane and ratoon. The experiment was held in the area of distillery João Mendes – “JM”, in Perdões, Minas Gerais in the agricultural year of 2008/2009. The treatments were evaluated utilizing the experimental design consisted of randomized blocks, with 5 treatments, corresponding to 5 cutting times (June, July, August, September and October), with 5 repetitions, totalizing 25 parcels, being the data taken in the three central lines. The evaluated characters were: the yield of the whole cane, yield of the culm, yield of the chaff, yield of the bagasse, yield of the bagasse + chaff, brix (%) juice, yield of the dry matter of the chaff and of the bagasse and elementar analysis of the material. It was made variance analysis with the aid of the use of computer system Sisvar®. The yield of the bagasse was higher in September, probably this is due to peak of drought time in the region. The values obtained for the brix were higher in August/September/October due to the a greater maturation of the sugar-cane. It was verified that the superior calorific power and yield in calories of the bagasse and chaff was higher in the months of September/October than in the months of June/July/August, probably this is due to less moisture contents and higher yield in dry matter in September/October. For the moisture in dry base there is a bigger variation present in the bagasse and, in general, the lower the moisture the higher the calorific power is. The Inferior Calorific Power, The Useful Calorific Power and the Yield in calories of the bagasse and chaff increased with the progress of the harvest season of the sugar cane.

Keywords: Biomass. Sugarcane. Bagasse. Energy. Residues.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Rendimento de colmos ($t.ha^{-1}$) em função das épocas de colheita.....	55
Gráfico 2	Rendimento de cana integral ($t.ha^{-1}$) em função das épocas de colheita.....	56
Gráfico 3	Rendimento de palhiço ($t.ha^{-1}$) em função das épocas de colheita.....	57
Gráfico 4	Rendimento de bagaço ($t.ha^{-1}$) em função das épocas de colheita.....	58
Gráfico 5	Rendimento de palhiço+bagaço ($t.ha^{-1}$) em função das épocas de colheita.....	58
Gráfico 6	Teor de brix (%) em função das épocas de colheita.....	61
Gráfico 7	Poder calorífico superior do palhiço ($cal.g^{-1}$) em função das épocas de colheita.....	63
Gráfico 8	Poder calorífico superior do bagaço ($cal.g^{-1}$) em função das épocas de colheita.....	63
Gráfico 9	Poder calorífico inferior do bagaço ($Kcal. kg^{-1}$) em função das épocas de colheita.....	66
Gráfico 10	Poder calorífico útil do bagaço ($Kcal. kg^{-1}$) em função das épocas de colheita.....	66
Gráfico 11	Poder calorífico inferior do palhiço ($Kcal. kg^{-1}$) em função das épocas de colheita.....	67
Gráfico 12	Poder calorífico útil do palhiço ($Kcal. kg^{-1}$) em função das épocas de colheita.....	67
Gráfico 13	Rendimento em calorias do palhiço ($Mcal.ha^{-1}$).....	69
Gráfico 14	Rendimento em calorias do bagaço ($Mcal.ha^{-1}$).....	69
Gráfico 15	Rendimento em calorias do palhiço + bagaço ($Mcal.ha^{-1}$).....	70
Gráfico 16	Teor de nitrogênio (%) do palhiço em função das épocas de colheita.....	73
Gráfico 17	Teor de nitrogênio (%) do bagaço em função das épocas de colheita.....	73
Gráfico 18	Teor de Carbono (%) em função das épocas de colheita.....	74
Gráfico 19	Teor de hidrogênio (%) do palhiço em função das épocas de colheita.....	74

Gráfico 20	Teor de hidrogênio (%) do bagaço em função das épocas de colheita.....	75
Gráfico 21	Teor de enxofre (%) em função das épocas de colheita.....	75
Gráfico 22	Teor de oxigênio (%) em função das épocas de colheita.....	76
Gráfico 23	Teores de umidade em base seca do palhiço (%) em função das épocas de colheita.....	78
Gráfico 24	Teores de umidade em base seca do bagaço (%) em função das épocas de colheita.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Poderes caloríficos superiores (PCS, Kcal.kg-1), de diferentes biomassas vegetais, obtidos por diversos autores. (2) Andrade (1961), (3) Arola (1976), (5) Atchison (1977), (4) Brito (1986) e (1) Sumner et al. (1983).....	37
Tabela 2	Características químicas do solo da área experimental, nas camadas de 0 a 20 cm e 20 a 40 cm.....	45
Tabela 3	Resumos das análises de variância para rendimento de colmos (t.ha-1), cana integral (t.ha-1) e palhiço (t.ha-1) em função das épocas de colheita.....	54
Tabela 4	Resumos das análises de variância para rendimento de bagaço (t.ha-1) e palhiço + bagaço (t.ha-1) em função das épocas de colheita.....	54
Tabela 5	Resumo da análise de variância Brix (%) caldo em função das épocas de colheita.....	60
Tabela 6	Resumos da análise de variância para Poder Calorífico Superior (PCS) do palhiço (PCS palhiço) em cal.g-1 e Poder Calorífico Superior do bagaço (PCS bagaço) em cal.g-1 em função das épocas de colheita.....	62
Tabela 7	Resumos da análise de variância para Poder Calorífico Inferior do bagaço (Kcal.Kg-1), Poder Calorífico Útil do bagaço (Kcal.Kg-1) em função das épocas de colheita.....	64
Tabela 8	Resumos da análise de variância para Poder Calorífico Inferior do palhiço (Kcal.Kg-1), Poder Calorífico Útil do palhiço (Kcal.Kg-1) em função das épocas de colheita.....	64
Tabela 9	Resumos da análise de variância para rendimento em calorias do palhiço (Calor. palhiço) em Mcal.ha-1, rendimento em calorias do bagaço (Calor. bagaço) em Mcal.ha-1 e rendimento em calorias do palhiço mais bagaço (Calor. palhiço + bagaço) em Mcal.ha-1 em função das épocas de colheita.....	68
Tabela 10	Resumos da análise de variância para teores de nutrientes no Palhiço: Nitrogênio (%), Carbono (%), Hidrogênio (%), Enxofre (%) e Oxigênio (%) em função das épocas de colheita.....	71

Tabela 11	Resumos da análise de variância para teores de nutrientes no Bagaço: Nitrogênio (%), Carbono (%), Hidrogênio (%), Enxofre (%) e Oxigênio (%) em função das épocas de colheita.....	71
Tabela 12	Valores de referência para a análise elementar.....	72
Tabela 13	Resumos das análises de variância para teores de Umidade em Base Seca do palhiço em % e Umidade em Base Seca do bagaço em % em função das épocas de colheita.....	78
Tabela 14	Simulação energética do bagaço.....	82
Tabela 15	Simulação energética do palhiço.....	82
Tabela 16	Simulação energética do palhiço + bagaço.....	83

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	O desenvolvimento sustentável e a biomassa para geração de energia	14
2.2	A cana-de-açúcar como fonte de biomassa	19
2.3	Cana-energia: potencial e obtenção	25
2.4	Potencial de resíduos de cana-de-açúcar como fonte de energia	29
2.5	Poder calorífico e a cogeração térmica e elétrica na indústria de cana-de-açúcar	36
2.6	Cogeração de energia elétrica em alambiques	41
3	MATERIAL E MÉTODOS	45
3.1	Caracterização da área experimental	45
3.2	Delineamento experimental, tratamentos e parcelas	45
3.3	Caracterização da variedade utilizada	46
3.4	Instalação e condução do experimento	46
3.5	Características estudadas	47
3.5.1	Rendimento de cana integral	47
3.5.2	Rendimento de colmos (TCH)	47
3.5.3	Rendimento de palhiço	47
3.5.4	Rendimento de bagaço	47
3.5.5	Rendimento de bagaço + palhiço	48
3.5.6	Brix (%) caldo	48
3.5.7	Rendimento de matéria seca do palhiço e do bagaço	48
3.5.8	Poder calorífico do bagaço e do palhiço	48
3.5.9	Análise elementar do material	52
3.6	Análises estatísticas	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1	Rendimento de colmos, cana integral, bagaço e palhiço	54
4.2	Teor de Brix (%) caldo	60
4.3	Poder calorífico	62
4.4	Rendimento em calorias do bagaço e do palhiço	68
4.5	Análise elementar dos resíduos	71
4.6	Teores de umidade do material em base seca	77
5	CONCLUSÕES	84
	REFERÊNCIAS	85

1 INTRODUÇÃO

A extrema dependência da sociedade moderna em relação ao petróleo como principal fonte de energia da atualidade, associada às incertezas de ordem político-militar, tem levado inúmeros países a buscar novas fontes alternativas de energia, principalmente as renováveis.

Muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas, nesse sentido, cujo interesse comum é o de associar a busca pela produtividade energética e garantir a sustentabilidade, reduzindo ao máximo os impactos ao meio ambiente. Tanto no mercado internacional como no Brasil, a biomassa tem sido considerada como uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e diminuição da utilização dos combustíveis fósseis (COPERSUCAR, 2001).

No Brasil, a cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) apresenta-se como uma excelente produtora de biomassa, podendo ressaltar que, na matriz energética brasileira em 2007, contribuiu com cerca de 20% do total (BRASIL, 2008).

A parte aérea da cana-de-açúcar é constituída por colmos, que representa de 80 a 85% da biomassa total, o restante se constituindo de folhas + palmito (palhiço).

Como é sabido, dos colmos se extrai o caldo para produção de açúcar, álcool, aguardente, rapadura e outros produtos. No entanto, quantidade considerável de bagaço é produzida, o qual mesmo que seja utilizado na produção de vapor, em substituição da lenha, ainda sobra grande quantidade de um ano para o outro. Ressalta-se que em muitas unidades produtoras de açúcar e álcool já utilizam o bagaço na co-geração de energia elétrica. Também existem estudos para a produção de álcool a partir da celulose (BALBO; PADOVANI NETO, 1987; CAMPOS, 1987).

Além do bagaço, também o palhiço (folhas + ponteiros) pode ser usado na co-geração de energia, como já tem sido feito por algumas usinas e destilarias.

A ideia do aproveitamento da cana-de-açúcar como planta energética oferece uma oportunidade ímpar para o Brasil aumentar ainda mais a sua competitividade em matéria de energia renovável de biomassa, com benefícios incomensuráveis à sociedade brasileira, além do valor estratégico.

É interessante ressaltar que esta energia pode ser gerada não apenas nas grandes usinas e destilarias, mas também nas pequenas unidades produtoras, como, por exemplo, os alambiques artesanais, podendo torná-los auto-suficientes do ponto de vista energético. Entretanto, faltam estudos que envolvam a determinação do poder calorífico nestas pequenas unidades produtoras.

O autor do presente trabalho teve por objetivo, através das pesquisas, avaliar o potencial energético do bagaço e palhiço de cana, variedade SP80-1842, produzidos por um alambique artesanal, típico de pequenos produtores de cachaça de Minas Gerais, ao longo da safra de cana, junho a outubro, ciclo da cana soca, colhida sem a queima prévia do canavial.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O desenvolvimento sustentável e a biomassa para geração de energia

Criado pelas Nações Unidas, no início da década de 70, devido a uma série de preocupações com os problemas ambientais decorrentes dos processos de crescimento, o desenvolvimento sustentável é tido como aquele capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações (BEZERRA; BURSZTYN, 2000; BRUSEKE, 2003; CAMARGO, 2002; CAVALCANTI, 2003).

A partir de meados da década de 80, surgiram algumas dificuldades também no setor energético brasileiro, que desde então entrou em uma fase de reestruturação e que provocou algumas alterações em vários e diferentes setores (PRIETO, 2003).

Tolmasquim (2000) já destacava como principais causas desta conturbada fase, o aumento do consumo de energia e a escassez das chuvas, que deixaram de abastecer os reservatórios das principais hidrelétricas brasileiras, evidenciando, assim, a falta e a insuficiência de investimentos no setor energético brasileiro, o que incentivou o país a buscar novas e diferentes alternativas de produção de energia.

Um dos métodos mais utilizados neste setor, principalmente pelos países que não possuem recursos hídricos nem outras fontes renováveis, é o emprego de combustíveis fósseis (MENEGUELLO; CASTRO, 2007), prática que vem intensificando a concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera e aumentando os problemas relacionados ao efeito estufa.

Para um maior controle dessas emissões, foi criada a Convenção Quadro das Nações Unidas para Mudanças Climáticas- *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC) na qual seus membros se reúnem

para discussões sobre o tema nas Conferências das Partes (*Conference of Parties-COP*) (ROCHA; MELLO, 2004). O último autor afirma que, dentre todas as que mais se destacou foi a que ocorreu em Kyoto, no Japão, em 1997.

Nesta reunião foi criado o Protocolo de Kyoto, que determinou a redução dos Gases do Efeito Estufa (GEE) nos países industrializados como medida contra o aquecimento global do Planeta (ROCHA; MELLO, 2004). Neste protocolo está descrito, em seu artigo 12, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) que apresenta uma proposta para que cada tonelada de CO₂ retirada ou deixada de ser emitida na atmosfera, em projetos instalados para países em desenvolvimento, possa ser negociada no mercado internacional com uma Redução Certificada de Emissões (RCE) ou um crédito de carbono (OLIVEIRA, 2007; OLIVEIRA et al., 2007).

Sendo assim, o mundo tem buscado novas e diferentes alternativas, à procura de fontes mais eficientes e menos impactantes, procurando priorizar as mais limpas. Como resultado, as que mais têm se destacado são as fontes ditas como renováveis, que já se destacavam em sua crescente utilização no mundo como insumo energético (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS - CGEE, 2001; CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA - IEE, 2001).

As inovações que permitiram o uso do álcool como combustível, do bagaço em maior escala e da palha como fontes de energia, são reconhecidas como contribuições importantes para a redução dos GEEs, por substituírem combustíveis derivados do petróleo. A geração de energia elétrica, com baixas emissões atmosféricas, a partir do excedente de bagaço, é considerada atividade passível de obter créditos de carbono através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

Como uma fonte de energia primária, a biomassa é tida como uma das principais responsáveis pela energia consumida nos países em desenvolvimento.

Segundo Rosillo-Calle, Bajay e Rothman (2005) esta fonte renovável possui escala de produção de energia suficiente para desempenhar um papel expressivo no desenvolvimento de programas de energias renováveis e na criação de uma sociedade ecologicamente mais consciente.

No caso do Brasil, dadas as condições climáticas favoráveis, a disponibilidade de terras e a experiência acumulada ao longo do tempo, a biomassa deve desempenhar um papel fundamental na busca de uma diversidade de fontes de energia sustentáveis no país. A substituição de combustíveis fósseis por combustíveis oriundos da biomassa, por meio do uso de tecnologias de conversão de energia eficientes e aceitáveis do ponto de vista ambiental, é uma alternativa importante que contribui, simultaneamente, para a redução da poluição da atmosfera e da pressão sobre os recursos não renováveis do país. Naturalmente, a pressão dos ambientalistas pode ser vista como um fator importante em prol do consumo de combustíveis oriundos da biomassa.

A Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2005) define a biomassa como todo recurso renovável constituído principalmente de substâncias de origem orgânica (de origem vegetal ou animal). A biomassa tem sido usada de forma crescente no mundo como insumo energético, muito mais para usos finais como energia térmica, mas já com destaque como geradora de energia elétrica, e de forma também crescente como origem de combustíveis líquidos (BARROS, 2007), como exemplo temos o etanol.

Nos países em desenvolvimento, a produção de energia elétrica a partir da biomassa, tem sido bastante defendida (BARROS, 2007). Alguns programas nacionais começaram a ser desenvolvidos visando o incremento da eficiência de sistemas, o que não tem sido diferente no Brasil, onde há vários anos tem sido crescente a aplicação de tecnologias para a utilização da biomassa como fonte geradora de energia, gerando empregos e com muito pouco recurso financeiro

(FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - FIESP, 2001).

Lora e Teixeira (2001) apresentam algumas vantagens do uso da biomassa como combustível, quando comparados com a utilização de combustíveis fósseis. Como vantagens os autores apresentam o fato de ser uma fonte de energia renovável, possuir baixo custo de aquisição e o de suas emissões líquidas de CO₂ serem baixas. Da mesma forma, afirma que as emissões de óxidos de nitrogênio, óxidos de enxofre e fuligem são muito menores que as emissões provocadas no uso de óleo combustível e carvão mineral. Como desvantagens, apontam alguns fatores principais tais como menor poder calorífico; maior possibilidade de geração de material particulado para a atmosfera, o que significa maior custo de investimento para a caldeira e os equipamentos para remoção de material particulado e dificuldades no estoque e armazenamento.

Em termos de alternativas de fontes de biomassa, os países desenvolvidos do hemisfério Norte têm buscado o aproveitamento de resíduos agrícolas e urbanos. O mais apropriado e econômico energeticamente seriam os cultivos agrícolas especialmente dedicados a produzir energia.

Para produzir biomassa em atendimento à necessidade energética da humanidade sem competir com a produção de alimentos, deve-se priorizar a produção de plantas fibrosas em vez de amiláceas e oleaginosas (STICKLEN, 2008). Plantas fibrosas trazem diversas vantagens e atendem bem aos requisitos julgados importantes para serem eleitas como produtoras de biomassa. A partir dos trabalhos de Coombs (1984), Hill et al. (2006), Rubin (2008) e Sticklen (2008), podem ser enumerados os seguintes requisitos: plantas de alta eficiência energética, isto é, de alta capacidade de transformação da energia solar em biomassa sem requerer muita água, nutrientes e outros *inputs* (plantas C4); crescimento perene e dossel de longa duração para permitir colheita durante a

maior parte do ano; possibilidade de aplicação de tecnologia agrícola de produção em grande escala; ser de fácil e eficiente transformação em formas utilizáveis de energia; e exploração sustentável econômica e ambientalmente.

Surgem, então, dois tipos de cultivo para os trópicos: as florestas artificiais, especialmente de eucalipto, e as gramíneas (poaceae) como a cana-de-açúcar. São justamente duas plantas que se desenvolvem bem nos trópicos e subtropicais, de alta eficiência fotossintética, por coincidência plantas que possuem o processo fotossintético C4, processo este de maior eficiência na fixação de C em condições de temperatura mais elevada daquelas regiões (EL-BASSAM, 1998). Outra gramínea também de alta produtividade é o capim-elefante, mas, o destaque é a cana-de-açúcar, mesmo porque, além de maior potencial de produtividade (EL-BASSAM, 1998; WOODARD; PRINE, 1993), oferece maior oportunidade de melhoramento genético e, conseqüentemente, maior ganho futuro de eficiência.

A utilização da fibra da biomassa como matéria-prima para fins energéticos pode ser feita segundo quatro plataformas básicas: combustão direta para produção de energia térmica (vapor) e elétrica (co-geração); hidrólise química ou enzimática da fibra (celulose e hemiceluloses) para obtenção de açúcares fermentáveis e produção de combustíveis líquidos; gaseificação para produção de gás de síntese (monóxido de carbono e hidrogênio) ou geração de biogás; e pirólise para produção de bio-óleo ou carvão/coque.

Em se tratando de biomassa, a inovação tecnológica deverá ocorrer não apenas nos processos de conversão, mas principalmente, na área agrícola. Nesta merecem destaque, o desenvolvimento de novas variedades de plantas, melhorias nas práticas agrícolas e nas técnicas de colheita, onde a mecanização é uma tendência; na adubação, no controle de pragas e doenças e na redução e mitigação dos impactos ambientais.

Em resumo, a biomassa tem um enorme potencial para auxiliar na redução das emissões de gases de efeito estufa, no aumento da segurança energética de cada país e no aumento da oferta de empregos e renda no meio rural. A transição da cultura de biomassa/ alimento para biomassa/ alimento + energia, para ser bem sucedida, vai requerer muita criatividade e investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento, seja para reduzir os custos das matérias-primas e dos processos de transformação, seja para reduzir e mitigar os impactos sócio-ambientais do aumento de áreas cultivadas, de forma a garantir um desenvolvimento sustentável.

Atualmente a utilização de biomassa para produção de energia, tanto elétrica como em forma de vapor, em caldeiras ou fornos já é uma realidade no Brasil e tem sido bastante expressiva quanto ao crescimento e desenvolvimento do setor (GRAUER; KAWANO, 2001). Diversas fontes renováveis de biomassa são conhecidas, tais como a lenha, carvão vegetal, babaçu, óleos vegetais, sisal, biogás, casca de arroz e resíduos vegetais, como é o caso do bagaço e palhiço de cana-de-açúcar.

2.2 A cana-de-açúcar como fonte de biomassa

O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2009) afirma que, no Brasil, existem 423 usinas sucroalcooleiras em funcionamento, sendo 16 usinas unicamente produtoras de açúcar, 159 de álcool e 248 mistas (produção de açúcar e álcool). Cada tonelada de cana (colmos) produz 140 kg (massa seca) de bagaço, dos quais 90% são utilizados para produzir energia térmica e elétrica na usina. Adicionalmente, contém 150 kg de açúcares (usado na produção de açúcar, etanol e, agora, plásticos) e 140 kg (massa seca) de palha, que é perdida por meio de queimadas no campo.

O Estado de São Paulo produziu, na safra 2008-2009, cerca de 20 bilhões de litros de etanol (consumo interno mais exportações). Nessa mesma safra, foi o responsável por aproximadamente 61% da produção total brasileira de etanol, sendo também o maior produtor de energia elétrica cogenerada a partir do bagaço e da palha da cana-de-açúcar (UNIÃO DAS INDÚSTRIAS DE CANA-DE-AÇÚCAR - ÚNICA, 2009).

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB (2009), a safra 2009/10 de cana-de-açúcar foi de 612 milhões de toneladas. Segundo Corrêa Neto (2009), as expectativas apontam para um aumento da capacidade de produção e processamento de cana-de-açúcar, chegando a aproximadamente 715 milhões de toneladas por ano, em 2015. Um grande trabalho tem sido realizado no Brasil na busca de tecnologia para a colheita e transporte da palha, assim como para a avaliação da sua disponibilidade real. A legislação que restringe gradualmente a queima pré-colheita deverá atuar positivamente para que este resíduo seja incorporado ao sistema de geração de energia (MACEDO, 2001).

Introduzida no Brasil pelos portugueses no início do século XVI, a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), principal matéria-prima do setor, tem sido utilizada para geração de energia. O elevado potencial de geração de energia a partir de sua biomassa tem provocado crescentes buscas por opções diferenciadas do completo aproveitamento dessa matéria-prima.

A agroindústria da cana-de-açúcar foi milenarmente explorada para a produção de açúcar (sacarose). Em 1975, o Brasil abriu caminho para uma nova exploração, a produção de etanol combustível em larga escala (CARMO, 1977; HAMMOND, 1977; NATALE NETTO, 2007; NEMIR, 1983; VIDAL; VASCONCELLOS, 1998; XAVIER, 2007). Porém, além do etanol e da energia térmica e elétrica que se obtém da cana-de-açúcar, centenas de outros produtos e subprodutos podem ainda ser desenvolvidos a partir dessa matéria-prima

(INSTITUTO CUBANO DE INVESTIGACIONES DE LOS DERIVADOS DE LA CAÑA DE AZÚCAR - ICIDCA, 1999).

Desde o seu início, o Proálcool brasileiro foi objeto de observação e análise internacional pela sua ousadia, propriedade e originalidade (COOMBS, 1984; HAMMOND, 1977; NEMIR, 1983). Hammond (1977) observava que o Proálcool tinha possibilidade de tornar o Brasil não só líder mundial em fontes renováveis de energia como também o primeiro país em estágio de desenvolvimento a encontrar o seu próprio caminho de independência energética.

Efetivamente, tudo isso se confirmou e, hoje, o etanol já é um importante componente da matriz energética nacional, contribuindo para uma economia substancial de divisas, para a diminuição da poluição ambiental e a mitigação do efeito estufa.

Do seu processo industrial obtém-se principalmente o açúcar, o álcool combustível (etanol- anidro e hidratado), aguardente, rapadura, melado, açúcar mascavo, produtos farmoquímicos. Além destes produtos são gerados subprodutos como a vinhaça ou vinhoto, a torta de filtro, o bagaço e, com a colheita de cana crua, é gerado grande quantidade de palhiço (folhas + palmito), que até então é deixado no campo como sistema de cobertura do solo proporcionando grandes vantagens ao sistema solo-água-planta. No entanto, seja nas grandes indústrias como nos alambiques, a queima do bagaço, para produção de energia (vapor) se faz notória. Porém, mais recentemente, nas indústrias este resíduo tem sido utilizado também como produtor de energia térmica e elétrica em sistemas de cogeração instalados na maioria das sucroalcooleiras distribuídas pelo Brasil e através da utilização também do palhiço estão com potencialidade em estudo para produção do etanol celulósico, mais conhecido como etanol de segunda geração (DIAS et al., 2009).

Ribeiro e Morelli (2009) mostram que processos de reutilização e reaproveitamento de resíduos como estes economizam recursos naturais e reduzem os impactos ambientais ao serem utilizados em seu processo produtivo, quando comparados aos processos que utilizam matérias-primas virgens.

Como uma das mais importantes culturas agrícolas brasileiras, a cana apresenta um ciclo produtivo médio de seis a sete anos, com possibilidade de seis cortes e um rendimento médio de 75 toneladas por hectare, podendo alcançar uma média de até 120 toneladas por hectare (SCARPINELLA et al., 2009). Segundo Jank (2007), cada tonelada colhida e processada nas usinas pode gerar até 82 litros de álcool combustível ou 138 quilos de açúcar e de acordo com Andreolli (2008) cada tonelada de cana gera aproximadamente 250 kg de bagaço úmido (50% b.u.) (ÚNICA, 2009) e, produz ainda, em média, 204 kg de palha e pontas.

O Estado de São Paulo produziu, na safra 2008-2009, cerca de 20 bilhões de litros de etanol (consumo interno mais exportações). Nessa mesma safra, foi o responsável por aproximadamente 61% da produção total brasileira de etanol, sendo também o maior produtor de energia elétrica cogenerada a partir do bagaço e da palha da cana-de-açúcar (ÚNICA, 2009).

Apesar de a agroindústria sucroalcooleira ter sido tradicionalmente alvo de críticas, hoje já cresce a percepção da sociedade sobre o seu valor para o país. Nos últimos anos, o setor tem crescido em ritmo superior a muitos outros, com perspectiva de seguir assim ainda por muitos anos.

A produção de etanol celulósico está recebendo grande investimento tecnológico nos países ricos, como EUA, Canadá e União Europeia, pois sua eficiência energética será ainda maior se comparada com a atual tecnologia de transformação da sacarose (JOHNSON, 2007; RUBIN, 2008; SCHMER et al., 2008; STICKLEN, 2007).

Macedo (1998) apresentou balanços da geração de energia, na forma de sacarose, etanol e eletricidade, por uma usina de açúcar operando convencionalmente ou de forma atualizada (maquinários de última geração e com alto rendimento, já disponíveis no mercado), levando-se em consideração dois panoramas de matéria-prima: com variedades atualmente cultivadas de cana-de-açúcar ou com variedades de cana-energia.

Segundo este autor, foram utilizados nestes cálculos valores médios de produtividade agrícola e industrial. Assim, considerando que a biomassa total de um canavial seja de 110 t, têm-se 85 toneladas de colmos industrializáveis, 15 toneladas de palhada (25% de umidade) que ficam no campo, conforme o processo usual. Tem-se, então, 12,8 t de sacarose (ATR-açúcar total recuperável) extraídas dos colmos e que resultarão em 6 t de açúcar; e o restante da sacarose, uma vez fermentado, resultará em 3.500 litros de etanol. O subproduto bagaço (23,8 t, 50% de umidade) será queimado e gerará 6,1 MWh, dos quais uma parte (62 t de vapor ou 5,18 MWh para usinas atuais e 36 t de vapor ou 3 MWh para usinas atualizadas) será utilizada pela própria usina para alimentar o processo todo e o restante será um excedente de energia elétrica de 0,92 MWh (usinas convencionais) ou 3,1 MWh (usinas atualizadas).

O balanço final se resume a 6 t de sacarose, 3.500 litros de etanol e 3,1 MWh de eletricidade excedente no caso de usinas atualizadas. Se a cana-energia for a matéria-prima a ser utilizada, ter-se-ia, pela sua maior produtividade (137 t de colmos industrializáveis e 24 t de palhada) e pela utilização de 60% da palhada, considerando-se um ATR igual à das variedades atuais, um balanço final das mesmas 6 t de sacarose, 3.500 litros de etanol e um excedente de eletricidade vindo da queima do bagaço (9,8 MWh) de 9,6 MWh ou 11,8 MWh, nos casos de usinas atualizadas, com um ganho de energia elétrica de aproximadamente quatro vezes em relação à utilização das variedades atuais.

Além disso, a biomassa da cana-energia poderá ser utilizada, como já descrito, como fonte de energia térmica em termelétricas ou mesmo transformadas termoquimicamente em carvão vegetal, com liberação de biogás e bio-óleos, todos de grande valor econômico e especialmente ambiental. Entretanto, devido às características físicas de umidade e granulação do bagaço, sua principal aplicação atual se restringe a processos de combustão direta em caldeiras para geração de calor, vapor e energia elétrica (co-geração). Outras características do bagaço de cana, como composição ligno-celulósica homogênea (celulose, hemiceluloses e lignina), processamento (triturado e lavado) e disponibilidade (abundância e estocagem), habilitam essa biomassa como uma das melhores matérias-primas para a utilização nos futuros processos de hidrólise enzimática ou química.

Devido a essas características, o bagaço também pode ser aproveitado em processos mais sofisticados, como gaseificação, desde que ele seja transformado em briquetes ou *pellets*, para o aumento de densidade e sua adequada aplicação e utilização em gaseificadores. O gás gerado a partir da gaseificação poderá ser usado na alimentação de motores em processos de combustão direta ou como gás de síntese em processos termoquímicos ou fermentativos.

A cana-energia, em sua forma *in natura* e desidratada, também poderá ser utilizada diretamente em processos de combustão e gaseificação, desde que o corte dos colmos seja feito no tamanho de *pellets* ou diretamente com os colmos inteiros em processos de pirólise para produção de bio-óleo ou carvão/coque.

Os seculares engenhos de açúcar, que apenas no último século se transformaram em agroindústrias de açúcar e, mais recentemente no Brasil, também de álcool, deverão evoluir para complexas biorrefinarias a produzirem alimento, energia elétrica, combustíveis líquidos e toda uma cadeia de subprodutos substitutos daqueles provenientes do petróleo, além de

substâncias químicas diversas e fármacos. Mais recentemente vem sendo desenvolvida a tecnologia para se produzir outros hidrocarbonetos que não simplesmente etanol (LAKSHMANAN et al., 2005; RUBIN, 2008; STICKLEN, 2008), como a fabricação de poli-3-hidroxitirato (PHB), o plástico biodegradável, que também já estão se tornando realidade.

2.3 Cana-energia: potencial e obtenção

Ao longo deste último século, houve grande esforço dos programas de melhoramento genético convencional e da pesquisa agrônômica para o aumento da produtividade de cana, de açúcar e álcool para se chegar ao atual nível. Porém, segundo Moore (2005), a produtividade agroindustrial chegou a um patamar difícil de ser suplantado se consideradas as atuais condições de manejo agrônômico. Portanto, de acordo com Jackson (2005), ocorre um limite difícil de ser suplantado na partição do assimilado entre acúmulo de sacarose e crescimento.

Por essa razão, muito esforço tem sido feito para se aprofundar no conhecimento da síntese, do transporte e do acúmulo de sacarose (LINGLE, 2004; MOORE, 2005; RAE et al., 2005; ZHU; KOMOR; MOORE, 1997) e de genes que regulam esse processo, com o intuito de, por meio da transgenia, se conseguir romper essa barreira (LAKSMANAN et al., 2005; MING et al., 2006; MOORE, 2005; SINGELS; DONALDSON; SMITH, 2005; WATT et al., 2005; ZHU; ALBERT; MOORE, 2000).

O melhoramento genético da cana-de-açúcar está, portanto, num novo divisor de águas neste início de século: enquanto durante 100 anos se buscou maior produtividade de açúcar, agora o novo modelo de cana deverá ser direcionado para alta produtividade de fibra. A vantagem de se produzir mais fibra em detrimento do açúcar é que as plantas serão mais rústicas, o que traz

uma série de vantagens econômicas e ambientais: as plantas serão menos exigentes em solo, clima, água e nutrientes e mais resistentes a pragas e doenças, daí resultando maior eficiência energética no seu cultivo, ou seja, maior unidade de energia produzida por energia gasta, se considerada toda a cadeia (*output/input*). Este é um parâmetro essencial e finalista que determinará as opções energéticas a serem consideradas, se o objetivo final for a preservação ambiental e a sustentabilidade (HILL et al., 2006; JOHNSON et al., 2007).

A ideia do aproveitamento da cana-de-açúcar como planta energética ao invés de apenas como fonte de sacarose iniciou-se ao final da década de 70 do século passado, nos EUA, em razão da crise do petróleo e do prenúncio de mais problemas à frente (ALEXANDER, 1985, 1988; BISCHOFF et al., 2008). Demonstrou-se, àquela época, que, além da utilização de etanol combustível, como estava fazendo o Brasil, devia se olhar a cana-de-açúcar como grande planta produtora de biomassa, pois até então apenas o colmo era o alvo e, deste, apenas a sacarose (ALEXANDER, 1985). Uma vez que a fibra passasse a ser o composto carbônico mais importante, haveria possibilidade de se incrementar a produtividade em maior grau do que com a cana tradicional, ainda que à custa de diminuição no teor de sacarose (ALEXANDER, 1985; GIAMALVA; CLARKE; STEIN, 1984).

Esse novo tipo de cana foi cunhado como cana-energia (*energy cane*) na Louisiana e em Porto Rico, onde ocorreram os primeiros trabalhos de melhoramento dirigidos para esse fim (GIAMALVA; CLARKE; STEIN, 1984; SAMUELS et al., 1984). Àquela época, Alexander (1985) demonstrou que, com uma renúncia de 25 a 35% na sacarose, ter-se-ia aumento no total de biomassa de até mais de 100%, se a colheita fosse de cana integral. Em outro resultado, Samuels et al. (1984) demonstraram que, embora a produção de sólidos solúveis (Brix) fosse 37% menor, a produção de massa seca (Brix + fibra) era 13% maior, devido à maior produção de fibra, resultando em produtividade final de massa

seca por hectare 20% maior. Esses programas foram descontinuados e, agora, com o renovado interesse em biocombustíveis e em biomassa, a cana-energia retoma interesse nos EUA (BISCHOFF et al., 2008).

Há muita diversidade genética viável para produção de biomassa no germoplasma comumente utilizado para criação de novos híbridos de cana-de-açúcar. Esses híbridos compartilham basicamente genes das espécies *S. officinarum* e *S. spontaneum*, sendo complexos aneuploides com conformação $2n + n$, com fixação total dos cromossomos de *S. officinarum* e $\frac{1}{2}$ dos de *S. spontaneum*, havendo ainda cromossomos conjugados (GRIVET; ARRUDA, 2001; HONT et al., 2008).

Devido a essa complexidade gênica, são frequentes numa progênie híbrida formas mais próximas de *S. spontaneum*, plantas pequenas, de colmos finos e com baixo brix e baixa pureza sacarina, como também plantas de alta capacidade produtiva, mais rústicas do que aquelas selecionadas como cultivares, mas usualmente descartadas por terem teor de sacarose abaixo do limite pré-estabelecido pelo padrão atual, ou seja, menor que 12%. Se essas plantas fossem selecionadas, já dariam um ganho de produtividade total, sólidos solúveis mais fibra, de até 20% em relação ao principal híbrido comercial, se considerados apenas os colmos industrializáveis, ou de mais de 30% de energia calorífica por área, se aproveitados também as folhas e os palmitos (MATSUOKA; ARIZONO, 1987).

Portanto, nas populações usuais de melhoramento genético, seria possível selecionar plantas do primeiro estágio de cana-energia, ou seja, plantas de maior produtividade de biomassa. Com essas plantas, na agroindústria sucroalcooleira atual, com uma destilaria de álcool anexa e ainda uma unidade de co-geração de eletricidade, poder-se-ia ter retorno econômico final maior do que o propiciado por uma variedade de alto teor de sacarose.

Em síntese, constituem-se características e qualidades do uso da cana-energia: produz energia renovável, o que contribui para mitigar o efeito estufa; apresenta alta conversão do Carbono atmosférico em Carbono orgânico, ou seja, alta produção de biomassa; poderá ser um dos principais cultivos na mudança de paradigma da civilização do petróleo para a civilização de energia multifacetada, compreendendo fontes múltiplas de energias renováveis; tem alta densidade de energia, ou seja, energética e economicamente é matéria-prima mais eficiente do que aquela de plantas alimentícias; tem elevada resistência a estresses bióticos e abióticos, de forma que é possível produzir com menor *input* (menos fertilizantes, pesticidas e energia), além de ser cultivada em terras de menor valor agrônômico, i.e., menos férteis, de menor disponibilidade de água, de temperaturas mais extremas (tanto baixas como altas) e mais salinas; oferece menor competição com a produção de alimentos por consequência dos fatores citados; tem poder de controle da erosão maior do que plantas herbáceas, fixa mais carbono no solo, devido ao seu sistema radicular fasciculado.

Somando-se a isso a sua característica de semiperenidade, oferece grande capacidade de proteção aos solos, em razão dos fatores já citados; seu cultivo, manejo, colheita e transporte são procedimentos já dominados; é possível desenvolver cultivares de alta produtividade para cada região geográfica por processo de melhoramento.

É importante enfatizar a característica, porque existem casos de plantas dedicadas à produção de energia que constituem ameaça ambiental, pela possibilidade de se tornarem plantas daninhas de alto poder invasivo (DITOMASO; BARNEY; FOX, 2007).

Observa-se que a cana-energia apresenta grande potencial energético não aproveitado totalmente e que deve ser meta prioritária de políticas energéticas e ambientais do governo brasileiro.

2.4 Potencial de resíduos de cana-de-açúcar como fonte de energia

A utilização de resíduos na indústria sucroalcooleira é uma necessidade não só do ponto de vista ambiental, mas também uma forma de evitar desperdício de um material que pode vir a gerar lucros. Os resíduos do processamento da cana-de-açúcar para a produção de açúcar e álcool, que hoje em dia já são gerados em quantidade expressiva, com variedades e manejos melhores, devem aumentar consideravelmente nos próximos anos, com a expansão das lavouras e o desenvolvimento de novas unidades agroindustriais. Estes resíduos podem ser usados como matéria-prima para a produção de novos produtos.

Na utilização dos resíduos vegetais para a geração de energia, é importante o conhecimento de algumas propriedades destes por meio da análise elementar, da análise química imediata e do poder calorífico. Pela análise elementar são determinados os teores de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre e cinzas, dos quais os elementos de maior contribuição para o poder calorífico são o carbono e o hidrogênio. A análise química imediata fornece os teores materiais voláteis, cinzas e, por diferença, o carbono fixo (VALE; GENTIL, 2008).

O poder calorífico é uma propriedade importante na avaliação de um combustível sólido e consiste na quantidade de calor liberadas na combustão completa de uma unidade de massa do material combustível, expressa em cal.g^{-1} ou Kcal.kg^{-1} . O poder calorífico é chamado superior (PCS) quando a água proveniente da queima está presente em estado líquido (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1984). A partir do PCS, desconta-se a energia gasta para evaporar o hidrogênio de constituição do combustível, na forma de água, e obtém-se o poder calorífico inferior (NASCIMENTO; DUTRA; NUMAZAWA, 2006).

Segundo Vale e Gentil (2008), o modelo energético brasileiro, inicialmente sustentado pela lenha, modificou-se ao longo das últimas décadas, atingindo atualmente 41,06% da oferta interna bruta de energia representada pelos combustíveis renováveis (biomassa e eletricidade). A participação dos resíduos no balanço energético nacional ainda é pequena, mas é significativo o crescimento ao longo dos últimos anos.

A produção de etanol atualmente utiliza a sacarose como matéria-prima, o que corresponde a usar aproximadamente um terço da energia contida na cana.

O bagaço é queimado com baixa eficiência energética para a geração de vapor e energia elétrica, e a palha é deixada sobre o solo no processo de colheita. Com o uso crescente de colhedoras mecânicas e com a eliminação gradativa da queima da palha (SÃO PAULO, 2002), espera-se que a cana possa ser aproveitada integralmente.

Devido às extensas áreas de produção, a geração de resíduos na indústria canavieira é por si só impactante, pelos volumes gerados. Entretanto, resíduos como bagaço, torta de filtro e vinhaça têm alto valor agregado e constituem-se em matéria-prima para outras atividades agrícolas e industriais. Todos os resíduos da cadeia produtiva da cana são reutilizados no próprio processo produtivo, o que faz do setor canavieiro um exemplo a ser seguido no quesito gerenciamento ambiental.

Também é muito relevante a importância do “subproduto” bagaço na geração de energia. O setor é praticamente independente do ponto de vista energético. Toda a energia necessária para o funcionamento da agroindústria vem da geração de vapor na queima do bagaço pelas caldeiras. E ainda sobra um excedente representado por 3.400 MW que pode ser comercializado para o fornecimento de energia elétrica nas cidades. A produção de energia elétrica, através do bagaço, com baixas emissões atmosféricas, permite a obtenção de

créditos de carbono, por meio do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), instrumento contido no artigo 12 do protocolo de Kyoto.

Segundo Corrêa Neto e Ramon (2002), as usinas sucroalcooleiras são auto-suficientes em 98% de suas necessidades energéticas, utilizando como combustível o bagaço da cana-de-açúcar. No entanto, a opção histórica do setor foi por tecnologias de baixa eficiência porque o objetivo primordial era maximizar a queima do bagaço devido à dificuldade de armazenamento e a pouca relevância do mercado de bagaço *in natura*. Neste sentido, existe um imenso potencial de produção de excedentes de eletricidade a serem exportados para rede com a adoção de tecnologias de produção mais eficientes.

Estuda-se ainda a retirada da palhada ou de parte dela, para a queima nas caldeiras e aumento de produção de energia, podendo liberar parte do bagaço para outros usos, como a produção de álcool. Futuramente, com o desenvolvimento da tecnologia de produção do etanol de segunda geração (a partir de materiais celulósicos), a palha e o bagaço terão ainda maior importância na produção de energia. Essas tecnologias representarão grande avanço, uma vez que a retirada parcial da palhada do campo não afetará significativamente os benefícios que esta promove ao solo, e o aporte energético que a palhada poderá representar, em termos de co-geração de energia elétrica, representará uma participação maior do setor na composição da matriz energética, com ganhos ambientais.

O estudo da viabilidade de aproveitamento do palhiço para a geração de energia pode ser feito com base no custo e no balanço de energia, ou seja, a energia gerada por essa biomassa menos a energia consumida no processo.

Conforme Sartori (2001) e Sartori et al. (2001), na tentativa de minimizar o impacto ambiental e as influências causadas na produtividade e, conseqüentemente, no lucro das empresas sucroalcooleiras, pesquisadores têm persistido na escolha da variedade que derive palhiços com maior poder

calorífico e com baixo custo de coleta, sem perder as características de produção. Somente assim seria viável o aproveitamento desse resíduo para cogeração de energia.

Com o aproveitamento do palhiço, além do potencial energético dessa biomassa, têm-se como vantagens as questões ambientais, a manutenção de empregos e a projeção de vida limitada para os recursos energéticos de fontes naturais (EID; CHAN; PINTO, 1998). Uma das grandes dificuldades ainda encontrada para o aproveitamento desse resíduo, porém, está na parte econômica. Além do fator custo, a viabilidade desse aproveitamento está ligada também ao balanço de energia, pois segundo Ripoli (2002a, 2002b), o processo envolve o uso de quatro tipos de máquinas, as quais consomem energia em forma de combustíveis derivados do petróleo.

Segundo Ripoli e Ripoli (2001) o palhiço fornece, em média, 13.551 MJ.t^{-1} , sendo que estimaram para o Brasil que este material, se fosse recolhido e levado até as usinas e destilarias, poderia gerar energia suficiente para abastecer 9,85 milhões de pessoas de consumo de baixa renda, por ano, enquanto que o bagaço, que já é amplamente utilizado para produção energética, poderia atender 5,55 milhões de pessoas.

Castro e Dantas (2008a) enunciam que a potência instalada para a geração de bioeletricidade no setor sucroalcooleiro no início de 2008 era de aproximadamente 3.900 MW para auto-suprimento e apenas 900 MW exportados. Isto em uma conjuntura onde a tecnologia de extra-condensação capaz de gerar 80 kWh de energia elétrica excedente a ser comercializada está disponível e o setor sucroalcooleiro passa por um ciclo expansivo sustentável. Por sua vez, o progressivo fim das queimadas irá disponibilizar uma quantidade adicional de biomassa a ser utilizada como combustível oriundo da palha. Neste sentido, torna-se nítido o quanto a potência instalada atual está aquém da potencial geração de bioeletricidade.

Além das vantagens inerentes a uma fonte de energia renovável gerada de forma eficiente, a inserção da bioeletricidade sucroalcooleira no sistema hidrelétrico brasileiro possui a importante função de mitigar o risco hidrológico porque o período de safra, entre maio e novembro, é coincidente com o período seco na região Sudeste, onde se encontra localizados os maiores reservatórios brasileiros (CASTRO; DANTAS, 2008b).

A viabilidade técnica e econômica de geração de eletricidade, a partir de resíduos de colheita de cana crua, foi estudada por Cock, Briceño e Torres (2000), na Colômbia. Os autores concluíram que, se os custos de recolhimento no campo e no transporte para o local de geração de eletricidade fossem reduzidos para menos de US\$8,00 por tonelada de resíduo, com umidade de 35%, a geração de eletricidade seria um excelente investimento. Os autores citaram que a maioria das variedades de cana-de-açúcar cultivadas na Colômbia produz mais de 30% de resíduos, com poder calorífico da ordem de 10.000 KJ. kg⁻¹ com umidade de 35%.

No Brasil, um trabalho pioneiro sobre o assunto foi desenvolvido por Ripoli e Molina Júnior (1991), que estimaram que, de 1 hectare de canavial, poder-se-ia obter em torno de 67.080 Mcal, em equivalentes energéticos, assim distribuídos: 20,09% na forma de álcool, 40,03% no aproveitamento do bagaço como combustível para fornalhas de caldeiras de usinas e destilarias, e os restantes 39,88%, estariam contidos no material remanescente da colheita (ponteiros, folhas verdes, palhas, colmos e suas frações não colhidos), principalmente, a mecanizada.

Para Freitas (2001), nos dias atuais, no Brasil, o bagaço de cana-de-açúcar é a biomassa mais promissora para geração de energia elétrica. As mais recentes tecnologias agrícolas e industriais do setor sucroalcooleiro têm oferecido grandes quantidades desse material que poderiam fornecer energia elétrica, via usinas e destilarias, interligadas aos principais sistemas elétricos,

atendendo aos centros de consumo dos Estados das regiões Sul e Sudeste, principalmente.

Segundo a ANEEL (2002), entre outras razões que justificam a busca de fontes mais competitivas de geração de energia elétrica, está a necessidade de redução das emissões de dióxido de carbono. Sob esta ótica, a biomassa apresenta-se técnica e economicamente competitiva, e sua utilização promove a geração local e descentralizada de empregos, reduzindo o problema do êxodo rural e a dependência externa de energia, em função da sua disponibilidade local.

No Brasil, a biomassa representa cerca de 20% da oferta primária de energia. A extensão do território nacional, em grande parte localizada em regiões tropicais e chuvosas, apresenta condições das mais adequadas para a produção e o uso energético da biomassa em larga escala. Especificamente no Estado de São Paulo, a produção de biomassa energética, por meio da cultura canavieira, é significativa, sendo comparável à produção de energia hidráulica.

No Estado de São Paulo, o setor gera para consumo próprio entre 1.200 e 1.500 MW, 40 usinas produzem excedentes de 158 MW e a luz que vem da cana já ajuda a iluminar diversas cidades. O potencial de geração de energia da agroindústria canavieira está em torno de 12 mil MW (ÚNICA, 2003).

De acordo com Castro (2001), uma tonelada de cana produz cerca de 240 kg de bagaço e tem potencial para gerar 70 kWh, dos quais 30 são utilizados na produção de açúcar e álcool. Se cerca das 130 usinas e destilarias do Estado de São Paulo gerassem 40 kWh de energia elétrica excedente por tonelada de cana, a produção seria equivalente à de duas turbinas da Usina Hidrelétrica de Itaipu, ou seja, 1,5 GW.

Segundo Kitayama (2007), a utilização de 75% do bagaço disponível e 50% da palha disponível na safra 2012/13, na qual se estima uma produção de cana de 696 milhões de toneladas, permite projetar uma potência instalada para exportação de 19.284 MW em um horizonte de cinco anos, equivalendo a uma

energia assegurada de 9.642 MWmed a ser inserida na rede, o que equivale à energia firme ofertada pela usina de Itaipu.

Considerando um rendimento médio de 75 t.ha⁻¹ de cana para o Brasil, é provável que o rendimento correspondente de cana crua, ou seja, com a manutenção do palhico no campo, essa produtividade possa alcançar 105 t.ha⁻¹. Cerca de 30 t.ha⁻¹ da biomassa é formada por resíduos de cana com um teor de umidade médio de aproximadamente 50%. O bagaço, também com um teor de umidade de aproximadamente 50%, representa outras 30 t.ha⁻¹.

Numa estimativa conservadora de que apenas 50% das plantações sejam apropriadas para os sistemas de colheita mecanizada e que somente 50% dos resíduos dessas plantações sejam recuperáveis por problemas com o cultivo e pelas perdas nos vários estágios do processo, cerca de 40 milhões de toneladas poderiam ser utilizadas para a geração de energia e outras finalidades.

Os resíduos da cana, palha e bagaço combinados têm um valor calorífico bruto de aproximadamente 17 GJ/t de matéria seca. Portanto, o teor energético dos resíduos recuperáveis seria aproximadamente 57 mil GWh de eletricidade, supondo que a eficiência global da tecnologia de conversão seja de 30% (BAUEN et al., 1998).

Para se ter uma ideia da relevância do potencial da bioeletricidade, projeções do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), órgão responsável pela coordenação e controle de operação da geração e transmissão de energia elétrica, indicam que cada 1.000 megawatts médios (MWmed) de bioeletricidade inseridos na matriz elétrica entre maio e novembro representam economia de quase 4% da capacidade dos reservatórios das regiões Sudeste e Centro-Oeste.

Ora, um país como o Brasil que, por um lado, importa 20% de suas necessidades de petróleo e não vem conseguindo ampliar, satisfatoriamente, seu parque hidrelétrico e, por outro lado, apresenta um potencial bastante grande em

relação a biomassa vegetal, não pode se dar ao luxo de se desprezar o caminho que leve ao aproveitamento racional desse potencial. O binômio “energia de biomassa-controle ambiental” deve ser meta prioritária de políticas energéticas e ambientais do governo brasileiro.

Dessa forma, a utilização dos resíduos da cana-de-açúcar como fonte de energia pode transformar a agroindústria sucroalcooleira em verdadeira usina de biomassa. Neste contexto, a utilização de fontes alternativas de energia, em particular os resíduos da cana-de-açúcar, aparece como uma oportunidade de particular importância para colaborar na oferta de energia para o país.

2.5 Poder calorífico e a cogeração térmica e elétrica na indústria de cana-de-açúcar

No estudo de biomassas vegetais como matéria-prima para produção de energia elétrica, é necessário caracterizar os seus poderes caloríficos que é a medida da quantidade de energia que o material combustível libera quando queimado totalmente, dado normalmente em cal.g^{-1} ou Kcal.kg^{-1} para os combustíveis sólidos e líquidos e em Kcal.m^{-3} para os combustíveis gasosos.

A medida do poder calorífico é de extrema importância na avaliação energética de qualquer combustível. Este pode ser determinado como Poder Calorífico Superior (PCS), Inferior (PCI) e Útil (PCU), dependendo da forma como é obtido.

A norma NBR8633 (ABNT, 1984) define Poder Calorífico Superior (PCS) como sendo o número de unidades de calor liberado, pela combustão de uma unidade de massa de uma substância, em bomba calorimétrica, em atmosfera de oxigênio, a volume constante e sob condições específicas, de modo que toda água proveniente da combustão esteja no estado líquido.

Poder Calorífico Inferior é o poder calorífico obtido sem levar em consideração o calor latente do vapor d água. A água gerada é perdida sob a forma de vapor pelo sistema e, assim, leva uma parte da energia liberada pelo material (calor latente do vapor d água). Portanto, é um valor menor que o do poder calorífico superior.

Oliveira (1982) definiu Poder Calorífico Inferior (PCI) como sendo o calor liberado pelo combustível menos o calor de vaporização da água.

Para Brito e Barrichello (1982), a diferença entre o PCS e o PCI ocorre em função de se considerar ou não o calor liberado pela condensação de água de constituição da biomassa. Recomendam que, na prática, o PCI deve ser o preferido; porém, no processo de determinação, regra geral, utiliza-se de bomba calorimétrica, que fornece o PCS. Para contornar a situação; lança-se mão da relação entre PCS e PCI, a qual é regida pela quantidade de hidrogênio contida no combustível, tendo-se, então, descontado o calor de vaporização da água formada no processo.

Diversos autores determinaram o Poder Calorífico Superior de inúmeras biomassas, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 Poderes caloríficos superiores (PCS em Kcal. kg⁻¹), de diferentes biomassas vegetais, obtidos por diversos autores. (2) Andrade (1961), (3) Arola (1976), (5) Atchison (1977), (4) Brito (1986) e (1) Sumner et al. (1983)

Biomassas	PCS	Biomassas	PCS
Painço (1)	4.178	Casca de pecan (1)	4.345
Colmo de sorgo (1)	4.273	Laranja (fruto) (1)	4.464
Folhas de sorgo (1)	4.631	Pecan (fruto) (1)	4.536
Capim-napier (1)	4.369	“Grape fruit” (1)	4.464
Gramma-bermuda (1)	4.584	Cone de <i>Pinus</i> spp.(1)	4.870
<i>Pinus</i> spp. (1)	4.249	Palha de <i>Pinus</i> spp. (1)	5.348
Pêssego (fruto) (1)	4.608	<i>Pinus strobus</i> (2)	5.285
<i>Eucalyptus saligna</i> (3)	4.670	<i>Pinus ponderosa</i> (2)	5.000
<i>Eucalyptus robusta</i> (3)	4.774	<i>Eucalyptus tereticornis</i> (4)	8.248
Madeira dura (5)	4.555 a 4.665	Madeira mole (5)	4.665 a 5.550
Palha de cereal (5)	4.445	Bagaço de cana (5)	4.445 a 4.665

Ripoli et al. (1990) e Ripoli, Mialhe e Brito (1990), estudando três variedades de cana-de-açúcar, concluíram que o palhiço varia entre 17 e 31% em peso úmido, em relação à quantidade de colmos industrializáveis e que seu poder calorífico útil é da ordem de 3.600 Kcal. kg⁻¹.

Molina Júnior et al. (1995), estudando métodos de recolhimento de resíduos de colheita manual de cana-de-açúcar, variedade SP70-6163, no município de Piracicaba, determinaram Índice de Palhiço de 0,34 e poderes caloríficos superior de 4.538,8 Kcal. kg⁻¹, Inferior de 4.200,2 Kcal. kg⁻¹ e útil de 2.341,4 Kcal. kg⁻¹.

A cultura canavieira, segundo relatos de vários autores (AGUILLAR et al., 1989; BETANCOURT, 1976; COPERSUCAR, 2001) pode gerar, além dos colmos industrializáveis, uma quantidade de palhiço da ordem de 15 a 30% em peso da parte aérea das plantas, dependendo das condições de campo (variedade, idade, número de corte e condições edafoclimáticas). O poder calorífico deste material é equivalente ao da madeira e superior ao do próprio bagaço da cana, por volta de 1.896 Kcal.kg⁻¹, o que o torna não mais um material descartável, mas um importante produto para agregação de valor para o setor sucroalcooleiro (RIPOLI, 1991).

O sistema de cogeração é o principal responsável pelo suprimento de energia térmica e eletromecânica nas usinas de cana-de-açúcar espalhadas pelo mundo. Como descrito em Costa e Balestieri (1998) a cogeração é um processo no qual uma fonte de energia primária alimenta uma máquina ou aparelho térmico que, pela reação de combustão, transforma a energia química do combustível em mecânica de eixo, que é convertida em energia elétrica por meio de geradores elétricos.

Os primeiros sistemas de cogeração passaram a ser instalados ao redor do mundo na primeira década do século XX (GOMAZAKO; OLIVEIRA, 2007). Segundo estes autores, diante da necessidade de independência energética, a

geração de energia elétrica passou a ser prática adotada pela agroindústria sucroalcooleira. Tal prática iniciou-se pela queima do bagaço.

No Brasil, a cogeração é uma prática tradicional há alguns anos. O que tem mudado é a eficiência com que os resíduos vêm sendo utilizados (RAMOS et al., 2003). Inicialmente, a cogeração chegou a ser muito utilizada pelas indústrias, época em que foram adaptados modelos tecnológicos com emprego preferencial de energia proveniente de combustíveis fósseis como o carvão mineral, o gás natural e o petróleo (SCHIRMER, 2006).

Este autor explica ainda que, a partir daí algumas usinas e destilarias passaram por uma fase de transição, acompanhadas por uma redução no consumo de energia térmica nos processos. Contudo, juntamente com a necessidade de reduzir emissões de CO₂, um novo modelo no setor elétrico voltou a estimular a produção de energia elétrica local que fosse mais eficiente e com custos reduzidos que beneficiasse não só as usinas de grande, mas também as de pequeno e médio porte.

Dados da ANEEL (2005), também apresentados por Souza e Azevedo (2006) apontam que cada tonelada de cana processada requer em média aproximadamente 12 MWh de energia elétrica, o que é facilmente gerado nos sistemas convencionais de cogeração instalados nessas usinas.

De acordo com Souza (2003), utilizando-se das tecnologias disponíveis de cogeração a partir do bagaço para produção de excedentes de energia por parte das usinas paulistas, seria capaz de suprir o déficit de toda região sudeste devido o racionamento durante a crise de 2001 e 2002. Com isso, o autor explica que, as empresas passaram a focar a cogeração também como mais uma opção de lucros, junto com o açúcar e o álcool.

Em um estudo feito pelo Instituto Euvaldo Lodi - IEL (2008), em parceria com a Confederação Nacional da Indústria (CNI) e a Itaipu Binacional, apresentou que a biomassa da cana tem condições de adicionar ao sistema

elétrico brasileiro até 2020 aproximadamente 15 mil megawatts (MW) de eletricidade, o que seria equivalente a incorporar uma nova Itaipu ao parque gerador nacional. Tais dados mostram que o setor poderá vir a contribuir para suprir a crescente demanda por energia no País.

Atualmente, quase todas as usinas e destilarias brasileiras possuem sistemas de geração de vapor, que operam em cogeração queimando o bagaço, e algumas delas já vêm adicionando a palha, devido ao seu elevado potencial energético (DANTAS; MAUAD; OMETTO, 2009). O bagaço ainda é utilizado em quantidade muito superior que a palha, pois a maior parte da palha fica no campo e mais da metade é aproveitada como adubo.

Mas, pela lei estadual nº11. 241 de 2002 do Estado de São Paulo, até 2021 será proibida a queima da palha na área mecanizável, e até 2031 na área não mecanizável (SÃO PAULO, 2002). Mas, o governo do Estado assinou um Protocolo Agroambiental se comprometendo em sanar essa queima até 2014 na área mecanizável e até 2017 na área onde não é possível o trabalho com máquinas (ASSINATURA..., 2008). Com isso, sobrá muita palha e a tendência é que a disponibilidade e utilização deste insumo para geração de energia aumentem ao longo dos próximos anos.

Uma t de cana produz 250 Kg de bagaço e 204 de palha e pontas, 1 t de cana (bagaço + palha) gera 199,9 kWh para exportação, Poder Calorífico Inferior (PCI) da palha=1,7 PCI do bagaço, Fator de capacidade=0,5 (Koblitz), utilizando caldeira de 65 bar (ÚNICA, 2009). Considera-se, em 2008/09, a utilização de 75% do bagaço disponível e 5% da palha disponível e, a partir de 2015/16, a utilização de 75% do bagaço disponível e 70% da palha disponível. Até 2010 foi considerada a energia comercializada nos Leilões de Energia no Ambiente de Contratação Regulado, em 2011 foi considerado um incremento de 1600 MW, e a partir de 2012 incrementos de 2.000 MW por ano.

À medida que a colheita mecânica de cana crua for implementada, a quantidade disponível de palhiço irá aumentar e, portanto, poderia ser usado com a finalidade de produção de energia elétrica, uma vez que seu poder calorífico igual a $12,75 \text{ MJ.Kg}^{-1}$ com 15% de umidade, é superior ao do bagaço em $7,5 \text{ MJ.Kg}^{-1}$ com 50% de umidade (MACEDO; LEAL; SILVA, 2004).

Estima-se que haja um potencial para a safra de 2010/2011 de 4.407 MW, aproveitando bagaço e palhiço, contra a média atual de 2.715 MW, aproveitando-se somente o bagaço (ASSOCIAÇÃO DA INDÚSTRIA DE COGERAÇÃO DE ENERGIA - COGEN, 2008).

O potencial de geração de energia a partir da cana considerando a sobra total de bagaço (cana crua e queimada) e a palha da cana cortada sem queimar, seria de 1.715 MWh em 2002, chegando a 17.148 MWh em 2021, durante toda a safra. Considerando uma safra de 180 dias e uma eficiência de moagem de 85%, poderiam ser gerados em 2002, um total de 262.335 MWh, podendo atingir 2,62 milhões de MWh em 2021.

A bioeletricidade sucroenergética é fundamental para atingir esse propósito, como demonstra o perfil da matriz energética brasileira. Em 2008, a biomassa como um todo, incorporando bagaço de cana e palha, representava menos de 5% da matriz, enquanto o mercado teria condições de absorver o equivalente aos 12% da matriz em 2020, considerando-se apenas o potencial do setor sucroenergético.

2.6 Cogeração de energia elétrica em alambiques

Na atualidade, com uma produção oficial estimada em 1,5 bilhões de litros por ano, a cachaça é a segunda bebida mais consumida no Brasil. São Paulo é o principal estado produtor, prevalecendo a cachaça industrial

(empresarial) e Minas Gerais, o segundo produtor, com o predomínio da cachaça artesanal (ANDRADE; CARDOSO, 2008).

Em Minas Gerais, o agronegócio cachaça tem significativa importância econômica e social. De acordo com o Serviço de Apoio às Micro e Pequenas Empresas - SEBRAE (2001), são 8466 produtores, a maior parte concentrada nas regiões mais carentes como Norte de Minas e Vale do Jequitinhonha. A cadeia produtiva da cachaça gera, só na produção, 115.000 empregos diretos e cerca de 46.000 empregos indiretos.

Esse forte apelo social e econômico do setor vem recebendo grande atenção por parte dos setores públicos e privados mineiros, visando ancorar o fortalecimento do meio rural e aproveitar as potencialidades do mercado consumidor da bebida. Como exemplo destaca-se a Lei Estadual nº 13.949 (INSTITUTO MINEIRO DE AGROPECUÁRIA - IMA, 2001), que estabeleceu a Cachaça de Minas como produto exclusivamente mineiro, a Instrução Normativa nº 56, que regulamentou as normas relativas aos requisitos e procedimentos para registro de estabelecimento produtores de cachaça organizados em cooperativas legalmente constituídas, a criação de entidades para a organização do setor, como a Associação Mineira dos Produtores de Cachaça (AMPAQ) e a elaboração de estudos visando o desenvolvimento da produção.

Na produção de cachaça artesanal em Minas Gerais, a cana-de-açúcar não é queimada antes da colheita, o que resulta em uma grande quantidade de restos culturais, representados por pontas de cana e folhas laterais (ANDRADE; CARDOSO, 2008). Estes restos culturais (palhiço), juntamente com o bagaço resultante da moagem de colmos da cana-de-açúcar ou parte dele que sobra do processo de queima nas caldeiras para produção de vapor, podem se constituir em biomassa promissora para geração de energia elétrica. Entretanto, faltam estudos que envolvam a determinação do poder calorífico do bagaço e palhiço

em pequenas unidades produtoras, como é o caso dos alambiques existentes em Minas Gerais.

Os resíduos da produção de cachaça, dentre os quais se destacam o vinhoto e o bagaço, também têm sido objeto de estudos para entidades ligadas à agricultura mineira que buscam meios para aliar o aumento na qualidade do produto com preservação ambiental, o que resultaria em grandes benefícios para o produtor. Deste modo, outra importante forma de integração é a utilização das sobras não poluentes da produção de cachaça, como o bagaço, a ponta e o caldo da cana, na alimentação de bovinos e suínos.

Assim, como a safra da cachaça concentra-se no período em que a seca é mais acentuada, a ponta da cana e o bagaço podem ser utilizados na alimentação do gado como uma forma de substituir a falta de pasto. Em relação aos suínos, vários estudos têm demonstrado que a cana e o caldo-de-cana podem ser utilizados como fonte de energia, substituindo parcialmente o seu principal alimento, o milho. Outra forma de integração suíno/cachaça é a utilização do bagaço picado como cama para os porcos, a qual pode ser posteriormente utilizada como matéria orgânica para as plantações (BARCELOS; REZENDE, 2002).

A utilização do bagaço como fonte para geração de energia, pode ser uma alternativa econômica, ecológica e tecnológica para os pequenos produtores, pois economizam na aquisição de lenha e evitam problemas ambientais.

A expectativa é de que este aproveitamento de resíduos nos alambiques, possa transformá-los numa espécie de mini termoeletricas, à semelhança da geração de energia elétrica que já acontece em grande escala na agroindústria sucro-alcooleira.

Mas, para isto, fazem-se necessários estudos que, num primeiro momento, determinem o poder calorífico do bagaço e palhiço em pequenos alambiques, ao longo da safra de cana-de-açúcar.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi instalado em área do alambique João Mendes - "JM", no município de Perdões, Minas Gerais, região Campos das Vertentes, situado nas coordenadas geográficas de latitude de 21° 05' 20", longitude de 45° 05' 50" e altitude de 826 m.

O clima da região é do tipo Cwa, caracterizado por temperatura média do mês mais quente de 22,1 °C e a do mês mais frio de 15,8 °C. A temperatura média anual é de 19,3 °C e a precipitação pluvial total anual é de 1529,7 mm (BRASIL, 1992).

O solo no qual foi instalado o experimento caracteriza-se como Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, textura média, cujas características químicas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 Características químicas do solo da área experimental, nas camadas de 0 a 20 cm e 20 a 40 cm. Local: Perdões - MG. Data: Junho de 2008

Camada	pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	MO	Zn	Fe	Mn
Cm		mg.dm ⁻³		-----cmol _c .dm ⁻³ -----				dag.kg ⁻¹	mg.dm ⁻³		
0 a 20	5,2	0,9	23	1,0	0,4	0,2	3,2	2,0	0,2	45,6	2,7
20 a 40	5,5	0,6	17	1,1	0,6	0,2	3,2	1,9	0,8	43,5	3,0

P e K extrator Mehlich 1; Ca, Mg e Al: extrator KCl 1 N; H + Al extraídos com acetato de cálcio 1N, pH 7,0.

3.2 Delineamento experimental, tratamentos e parcelas

Utilizou-se o delineamento experimental de blocos casualizados, com 5 tratamentos, correspondendo à cinco épocas de corte (junho, julho, agosto, setembro e outubro), com cinco repetições, totalizando 25 parcelas.

As parcelas foram constituídas por cinco linhas de cana-de-açúcar, de 15,0 m de comprimento, espaçadas de 1,40 m entre si, sendo a área total de 105,0 m². Considerou-se como área útil as três linhas centrais, totalizando uma área de 63,0 m².

3.3 Caracterização da variedade utilizada

A variedade utilizada foi a SP80-1842, que apresenta boa produtividade agrícola em cana planta e soca, sendo caracterizada pelo rápido crescimento vegetativo, boa brotação da soqueira, alto teor de sacarose, não sendo comum a ocorrência de isoporização, resistente a carvão e ferrugem e susceptível à escaldadura e broca da cana-de-açúcar (COPERSUCAR, 2001).

3.4 Instalação e condução do experimento

O experimento foi instalado em junho de 2008, demarcando-se as parcelas em área de cana soca, imediatamente após o primeiro corte, realizado de forma manual, sem a queima prévia do canavial.

A adubação da soqueira foi feita com base na análise de solo, conforme recomendação da Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais - CFSEMG (1999), aplicando-se 400 kg.ha⁻¹ da fórmula 20-05-20 em cobertura, entre as linhas de cana-de-açúcar.

A fim de se combater formigas, utilizou-se inseticida líquido, aplicado via termonebulizador. Já para o controle de plantas daninhas, foram realizadas capinas manuais, mantendo-se a cana no limpo nos primeiros cem dias pós-corte.

As colheitas foram feitas de acordo com as épocas pré-estabelecidas, junho a outubro de 2009, de forma manual, sem a queima prévia.

3.5 Características estudadas

3.5.1 Rendimento de cana integral

O rendimento de massa verde total (colmos + ponteiros + folhas laterais), em cada época de corte, foi realizado na área útil da parcela por meio de pesagens realizadas em balança tipo dinamômetro, com capacidade para 120 kg, de acordo com metodologia preconizada por Mariotti e Lascano (1969 citados por ARIZONO et al., 1998). Posteriormente, realizou-se a transformação para toneladas de cana integral por hectare.

3.5.2 Rendimento de colmos (TCH)

O rendimento de colmos, despontados e despalhados, em cada época de corte, foi obtido a partir da determinação da massa total de colmos (kg) por área útil de parcela e sua posterior transformação para $t.ha^{-1}$ (TCH), de acordo com Arizono et al. (1998).

3.5.3 Rendimento de palhiço

O rendimento de palhiço (pontas e folhas laterais) foi obtido pela diferença entre o rendimento de cana integral e o rendimento de colmos por hectare.

3.5.4 Rendimento de bagaço

Para a determinação desta característica, 15 colmos despontados e despalhados foram pesados e posteriormente esmagados, pesando-se o bagaço

obtido. Calculou-se o rendimento (%) de bagaço, que foi multiplicado pelo rendimento de colmos por hectare, obtendo-se o rendimento de bagaço por hectare.

3.5.5 Rendimento de bagaço + palhiço

Esta característica foi determinada somando-se o rendimento de bagaço e o de palhiço por hectare.

3.5.6 Brix (%) caldo

O caldo obtido da moagem de colmos foi homogeneizado e dele foram retiradas amostras para determinação do brix (porcentagem de sólidos solúveis), através do refratômetro de campo.

3.5.7 Rendimento de matéria seca do palhiço e do bagaço

Amostras do palhiço e do bagaço foram pesadas e colocadas em estufa, aos 70 °C, até obter-se estabilidade de massa. Calculou-se, assim, a porcentagem de matéria seca que foi, então, multiplicada pela massa do palhiço e bagaço por hectare, obtendo-se o rendimento da matéria seca do palhiço e bagaço por hectare.

3.5.8 Poder calorífico do bagaço e do palhiço

Amostras do bagaço e do palhiço, obtidas após cada colheita, foram moídas, secas e peneiradas em peneira ABNT 70, segundo norma NBR 8633,

sendo levadas em estufa de (105 ± 2) °C até a estabilização da massa (ABNT, 1984). Após esse procedimento, as amostras foram novamente pesadas.

A análise do Poder Calorífico Superior foi realizada em um calorímetro da marca Parr[®], conforme a Norma 8633 da ABNT (1984). Foi então determinado o Poder Calorífico Superior (PCS) de cada amostra, pela combustão de uma unidade de massa em bomba calorimétrica, em atmosfera de oxigênio, a volume constante e sob condições específicas.

Com base nos dados obtidos, foi calculado o poder calorífico superior do bagaço e do palhiço por hectare de cana-de-açúcar. Para isto, dividiu-se a massa seca pela massa úmida do bagaço e do palhiço, calculando-se a porcentagem de matéria-seca e, multiplicando-se pelos seus respectivos rendimentos de bagaço e palhiço por hectare encontrou-se a massa de bagaço e palhiço seco em toneladas por hectare.

A fórmula utilizada para calcular o PCS foi a equação (1):

$$PCS = \frac{W \times (\Delta t) - C_1 - C_2}{m} \quad (1)$$

PCS= Poder Calorífico Superior (cal/g)

W= constante do calorímetro= 2479,76

Δt = diferencial de temperatura

C₁= correção para queima do fio de níquel-cromo

C₂= correção para a formação do ácido nítrico (titulação com carbonato de sódio).

m= massa (g)

As determinações de PCI foram em duplicatas por amostra.

Obtido o Poder Calorífico Superior (PCS) das amostras, aplicou-se o método de Doat (1977) para a obtenção do Poder Calorífico Inferior (PCI), que

leva em conta a quantidade de hidrogênio contida no material, calor absorvido para vaporização da água nele contido e da proporção da água formada na combustão conforme a equação (2):

$$PCI = \frac{PCS - 600(U + 9H)}{1 + U} \quad (2)$$

PCI= Poder Calorífico Inferior (cal.g⁻¹)

PCS= Poder Calorífico Superior (cal. g⁻¹)

U= Teor de umidade do material (%)

H= Teor de hidrogênio (%)

600 (cal) = valor médio de energia absorvida por grama de água, para se atingir a temperatura de evaporação.

9= múltiplo do peso de hidrogênio, contido no material, que fornece o peso da água formada durante a combustão.

O Poder Calorífico Líquido (PCL) é calculado por meio de equações aproximadas que proporcionam o cálculo do poder calorífico em função da umidade, como em base seca (BRITO; BARRICHELO, 1982; DOAT, 1977) conforme a equação (3):

$$PCL = \{ [PCI - (6 \times W)] / (100 + W) \} \times 100 \quad (3)$$

PCL=Poder Calorífico Inferior à Umidade W (Poder Calorífico Líquido)
(Kcal/ha)

PCI= Poder Calorífico Inferior (cal.g⁻¹)

W= Umidade na base seca (%)

6= fator de conversão referente à energia para evaporação da água de formação

Assim, quando o objetivo da utilização da biomassa é a produção de eletricidade, por cogeração, é fundamental saber qual o poder calorífico útil (PCL) da matéria-prima, pois ele leva em conta o seu teor de umidade com que será queimado.

Para aplicação da fórmula foram calculados os teores de umidade do material em base seca conforme a equação (4):

$$U_{bs} = \frac{MU - MS}{MS} \times 100 \quad (4)$$

Em que:

U_{bs} = Umidade Base Seca em (%);

MU = Massa Úmida em (g);

MS = Massa Seca em (g).

Foi calculado o Poder Calorífico Inferior em relação à umidade do material em base seca. Mediante os dados obtidos, foram calculados o poder calorífico inferior do bagaço e do palhiço por hectare de cana-de-açúcar.

Para isto, dividiu-se a massa seca pela massa úmida do bagaço e do palhiço calculando-se a porcentagem de matéria-seca e multiplicando-se pelos seus respectivos rendimentos de bagaço e palhiço por hectare encontra-se a massa de bagaço e palhiço seco em toneladas por hectare.

Concomitantemente, calculou-se o rendimento em calorías do bagaço + palhiço em $Kcal.ha^{-1}$. Para os cálculos de rendimento em calorías do palhiço e bagaço foi considerado o Poder Calorífico Inferior em relação à umidade em base seca.

3.5.9 Análise elementar do material

Foi avaliada a composição química elementar das amostras, utilizando-se o equipamento Vario Micro Cube, determinando-se os teores de nitrogênio, carbono, hidrogênio, enxofre e, por diferença, oxigênio na matéria seca. Inicialmente, utilizando uma balança com sensibilidade de 0,00001 g, foi pesado aproximadamente 2 mg de resíduo em um porta-amostra de estanho. Em seguida, o conjunto (resíduo + porta amostra) foi depositado no carrossel do equipamento da marca Elementar[®], ilustrado na Figura 1. A análise foi realizada em uma amostra por vez.

Os gases necessários para a operação foram o hélio, que é o gás de arraste, e o oxigênio, gás de ignição. A temperatura do tubo de combustão, localizado no interior do equipamento, no momento da queda da amostra do carrossel, foi de 1.150 °C. Após a combustão, os gases foram transportados por arraste para o tubo de redução e dele seguiram para a coluna de detecção. Os elementos foram determinados por meio de um detector de termcondutividade, em que cada elemento faz sua interação e obteve seu pico específico. Entretanto, os cálculos dessa integração foram realizados através de programa computacional, obtendo-se os valores dos elementos em porcentagem.



Figura 1 Analisador Elementar, (A) Carrossel - Vista superior; (B) Aparelho

3.6 Análises estatísticas

As análises foram feitas com o auxílio do uso do sistema computacional Sisvar® (FERREIRA, 2006) aplicando o Teste F. As comparações múltiplas foram realizadas pelo teste de Tukey, no nível de 5% de probabilidade, conforme Gomes (1990).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Rendimento de colmos, cana integral, bagaço e palhiço

Os resumos das análises de variância para rendimentos de colmos, cana integral, palhiço, bagaço e palhiço+bagaço em função das épocas de colheita, estão apresentados nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 Resumos das análises de variância para rendimento de colmos-TCH ($t\cdot ha^{-1}$), cana integral ($t\cdot ha^{-1}$) e palhiço ($t\cdot ha^{-1}$) em função das épocas de colheita. UFLA, Lavras - MG, 2011

FV	GL	Quadrado Médio		
		TCH ($t\cdot ha^{-1}$)	Cana Integral ($t\cdot ha^{-1}$)	Palhiço ($t\cdot ha^{-1}$)
Bloco	4	451,9902	449,0588	21,5907
Época	4	48,4615ns	151,3061ns	33,1267ns
Resíduo	16	81,9758	102,0653	20,4469
Média	-	73,73	105,06	31,33
CVe (%)	-	12,28	9,62	14,43

FV = fonte de variação, GL = graus de liberdade, ns = não significativo a 5% de probabilidade.

Tabela 4 Resumos das análises de variância para rendimento de bagaço ($t\cdot ha^{-1}$) e palhiço + bagaço ($t\cdot ha^{-1}$) em função das épocas de colheita. UFLA, Lavras - MG, 2011

FV	GL	Quadrado Médio	
		Bagaço ($t\cdot ha^{-1}$)	Palhiço+Bagaço ($t\cdot ha^{-1}$)
Bloco	4	28,0103	36,6954
Época	4	122,9063*	97,2153*
Resíduo	16	27,6614	32,4265
Média	-	33,00	64,33
CVe (%)	-	15,94	8,85

FV = fonte de variação, GL = graus de liberdade, * = significativo aos 5% de probabilidade, ns = não significativo aos 5% de probabilidade.

Verifica-se pelas Tabelas 3 e 4, que ocorreram efeitos significativos entre as épocas de colheita para rendimento de bagaço e para rendimento de palhiço + bagaço. Os valores médios obtidos para rendimento de colmos estão compatíveis com os rendimentos obtidos para cana soca na região em estudo (ANDRADE, 2006; GARCIA, 2005) e são apresentados no Gráfico 1.

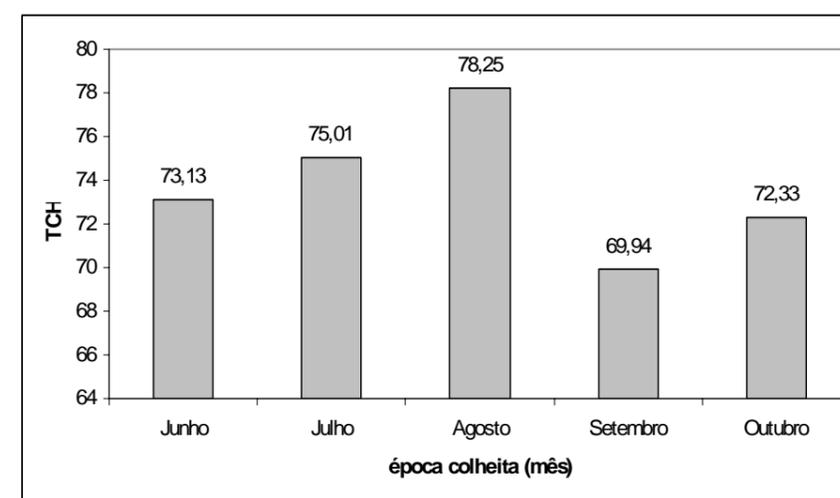


Gráfico 1 Rendimento de colmos (t.ha⁻¹) em função das épocas de colheita, UFLA, 2011

Bassinello (1984), estudando o comportamento de algumas cultivares de cana-de-açúcar, também não constatou diferença significativa de rendimentos de colmos de uma mesma cultivar quando colhidas em quatro diferentes épocas, dentro de uma mesma safra.

Da mesma forma, Maule, Mazza e Martha Júnior (2001) estudaram o comportamento de nove cultivares de cana-de-açúcar e não constataram diferença de rendimentos agrícolas de uma mesma cultivar, quando colhida em três diferentes épocas, dentro de uma mesma safra.

Fernandes (2005), estudando o comportamento de cinco variedades de cana-planta, sob irrigação por aspersão, para a produção de cachaça artesanal na região de Salinas, Norte de Minas, encontrou rendimentos médios de colmos de 242 TCH, para a cultivar RB76-5418; 198 TCH, para a cultivar RB72-454; 188 TCH, para a cultivar SP80-1842; 176 TCH, para a cultivar SP79-1011 e 145 TCH, para a cultivar JAVA.

Nos gráficos 2, 3, 4 e 5 foram apresentados os rendimentos de cana integral, palhiço, bagaço e palhico + bagaço, em função das épocas de colheita.

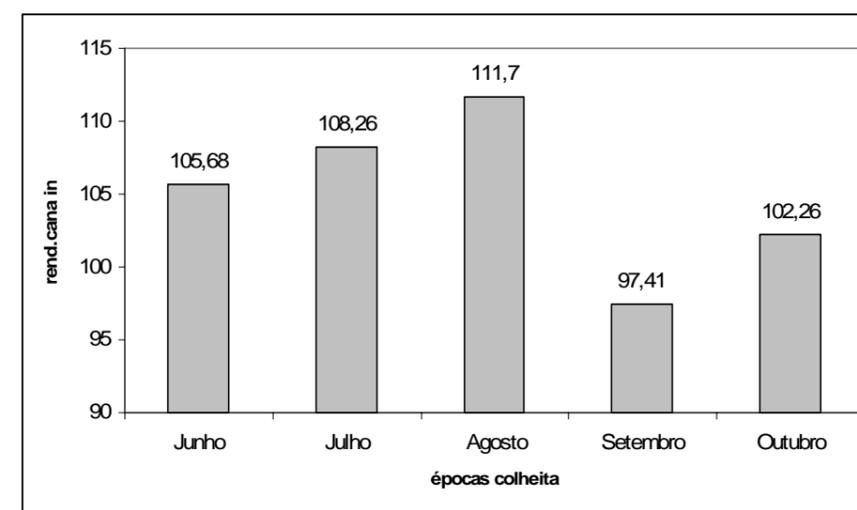


Gráfico 2 Rendimento de cana integral (t.ha⁻¹) em função das épocas de colheita, UFLA, 2011

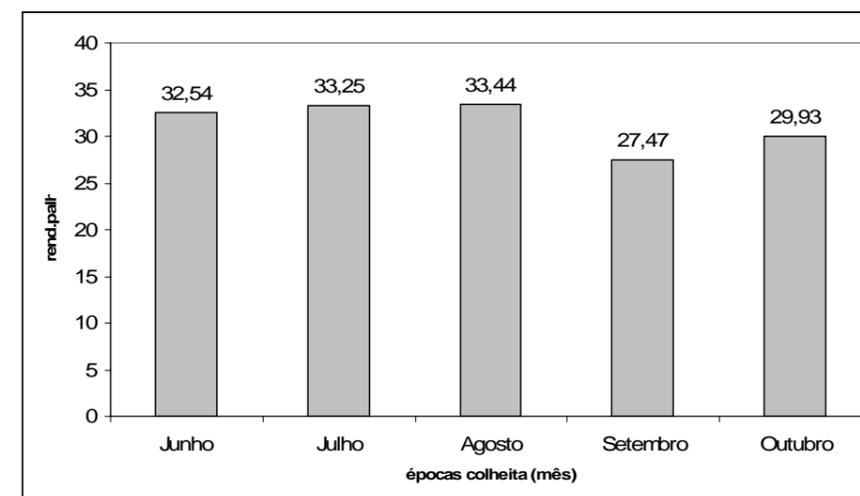


Gráfico 3 Rendimento de palhiço (t.ha⁻¹) em função das épocas de colheita, UFLA, 2011

Observa-se, pelos Gráficos 1,2 e 3 e 4, que as épocas de colheita não influenciaram os rendimentos de colmos, cana integral e palhiço.

Apesar de não ter diferenças significativas para rendimento de colmos, nota-se que na colheita realizada em agosto, a cultivar obteve, em média, maior rendimento, alcançando 78,25 t.ha⁻¹. Anjos (2001) encontrou resultados semelhantes, na mesma região, para produção de aguardente artesanal.

Considerando-se a média de todas as épocas, o rendimento de colmos representou cerca de 70% e o do palhiço 30 % de massa verde total, estando de acordo com Andrade (2006).

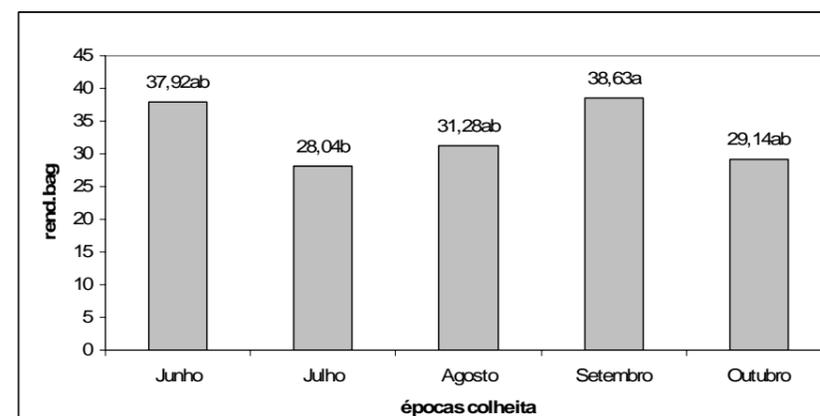


Gráfico 4 Rendimento de bagaç (t.ha⁻¹) em função das épocas de colheita, UFLA, 2011

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste Tukey aos 5%.

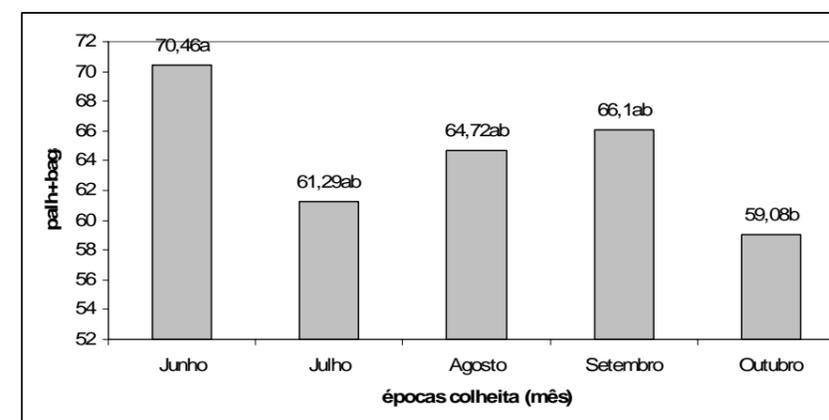


Gráfico 5 Rendimento de palh+bagaç (t.ha⁻¹) em função das épocas de colheita, UFLA, 2011

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste Tukey aos 5%.

A quantidade de palhiço produzida por área e o poder calorífico da cana foram avaliados ainda por diversos autores. Ripoli et al. (1990), utilizando resultados de vários autores brasileiros, projetaram uma estimativa do potencial disponível em um hectare de cana-de-açúcar, sem queima prévia, considerando uma produtividade agrícola de colmos de 70 t ha^{-1} e industrial de 75 Lt^{-1} de etanol.

Os autores afirmaram ainda, que, para o aproveitamento do palhiço como fonte energética, algumas dificuldades devem ser enfrentadas, tais como, em valores médios: sua baixa massa específica *in natura* (25 kg m^{-3}); o seu teor de terra (3 a 7%), e seu relativo e elevado grau de umidade sob a condição de canavial recém-colhido (ponteiros= $76,9\%$; folhas verdes= $65,7\%$, palhas= $7,6\%$).

Como pode ser verificado (figuras 5 e 6), ocorreram diferenças significativas entre as épocas de colheita para rendimento de bagaço e palhiço + bagaço.

O rendimento de bagaço foi maior em setembro ($38,63 \text{ t.ha}^{-1}$) do que em julho ($28,04 \text{ t.ha}^{-1}$). Provavelmente este fato está sendo influenciado pela época de seca na região (setembro), quando a cana já perdeu maior quantidade de água, a massa verde total foi menor, contribuindo para um aumento no rendimento de bagaço.

O mês de Setembro foi o período de maior déficit hídrico acumulado na região, ocorre maior concentração de sacarose na cana, e conseqüentemente, a planta perde umidade, diminuindo a massa verde.

Quanto ao rendimento de palhiço + bagaço, o rendimento obtido em junho ($70,46 \text{ t.ha}^{-1}$) foi maior do que o de outubro ($59,08 \text{ t.ha}^{-1}$), provavelmente porque a cana de açúcar encontrava-se com maior teor de umidade, proporcionando uma maior massa verde.

Entre as inúmeras medidas de manejo, que podem permitir ganhos reais de produtividade da lavoura, a época de colheita tem merecido atenção especial.

Rezende Sobrinho (2000) afirma que o aumento da produtividade, no setor sucroalcooleiro, é conseguido com a introdução de novas variedades de cana-de-açúcar e com manejo correto da cultura, buscando a época de colheita em que a produtividade agroindustrial se encontra maximizada.

4.2 Teor de Brix (%) caldo

O resumo da análise de variância para a característica Brix (%) caldo, em função das épocas de colheita é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 Resumo da análise de variância Brix (%) caldo em função das épocas de colheita. UFLA, Lavras - MG, 2011

FV	GL	Quadrado Médio
Bloco	4	2,7663
Época	4	13,3821**
Resíduo	16	0,6788
Média	-	19,69
CVe (%)	-	4,18

FV = fonte de variação, GL = graus de liberdade, ** significativo no nível de 1% de probabilidade.

Verifica-se, pela Tabela 5, que ocorreram efeitos significativos de época de colheita nesta característica tecnológica da cana-de-açúcar. Os valores médios obtidos estão mostrados no Gráfico 6.

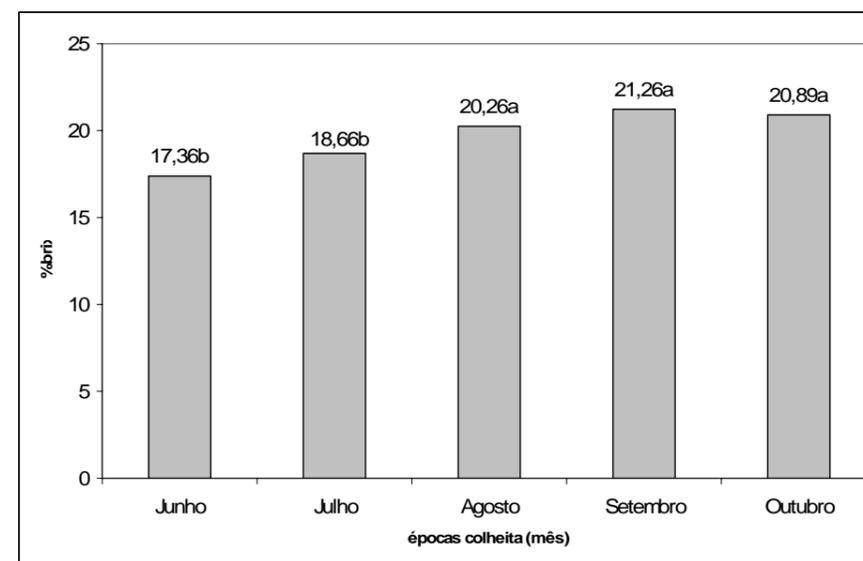


Gráfico 6 Teor de Brix (%) em função das épocas de colheita, UFLA, 2011

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste Tukey aos 5%.

Observa-se, pelo Gráfico 6, que os valores obtidos em junho e julho (início de safra) foram menores do que aqueles obtidos em agosto/setembro/outubro. Isto era esperado porque, à medida que o período de seca se estende, ocorre uma maior maturação da cana-de-açúcar, com maiores valores de Brix (ANDRADE, 2006).

Na mesma região em estudo, Anjos et al. (2007) também encontraram maiores valores para Brix em agosto/setembro do que em julho.

Portanto, a época de colheita afetou o brix, ou seja, a colheita feita em setembro proporcionou maiores valores que as realizadas em Junho e Julho, provavelmente pelas condições ambientais estressantes, como temperaturas mais baixas e ausência de chuva, que antecederam a colheita em setembro e favoreceram a qualidade tecnológica dos colmos.

Levando-se em conta que, com base nos teores de Brix do caldo, a cana-de-açúcar é considerada madura quando os teores são maiores ou iguais aos 18% (ANDRADE, 2006), em junho a cana ainda não se encontrava madura, enquanto que nos demais meses (julho, agosto, setembro, outubro) ela encontrava-se apta para o corte em termos de maturação.

Como não houve diferença estatística nos meses de agosto a outubro, deve-se atentar para que a colheita da cana seja realizada dentro desse período, considerando-se como referência o teor de brix.

4.3 Poder Calorífico

Os resumos das análises de variância para Poder Calorífico Superior do palhiço e bagaço, em função das épocas de colheita, são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 Resumos da análise de variância para Poder Calorífico Superior (PCS) do palhiço (PCS palhiço) em cal.g⁻¹ e Poder Calorífico Superior do bagaço (PCS bagaço) em cal.g⁻¹ em função das épocas de colheita

FV	GL	Quadrado Médio	
		PCS palhiço (cal.g ⁻¹)	PCS bagaço (cal.g ⁻¹)
Bloco	4	195.994,6	70.116,6
Época	4	1.403.547,7**	819.505,7**
Resíduo	16	130.195,6	137.345,6
Média	-	3976,74	3985,38
CVe (%)	-	9,07	9,30

FV = fonte de variação, GL = graus de liberdade, ** significativo no nível de 1% de probabilidade.

Verifica-se pela Tabela 6, que ocorreram efeitos significativos das épocas de colheita para o Poder Calorífico Superior. O palhiço da cana apresentou valores de poder calorífico semelhante aos do bagaço, o que era

esperado, uma vez que ambos contêm teores de lignina próximos. Os valores médios obtidos são apresentados nos Gráficos 7 e 8.

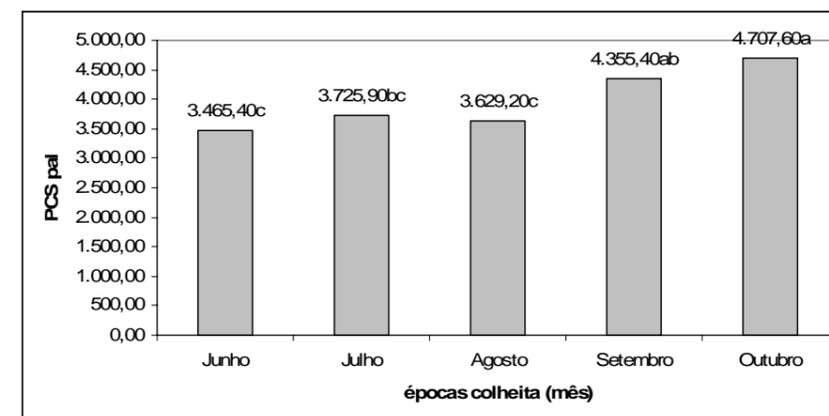


Gráfico 7 Poder Calorífico Superior do Palhiço (cal.g⁻¹) em função das épocas de colheita, UFLA, 2011

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste Tukey aos 5%.

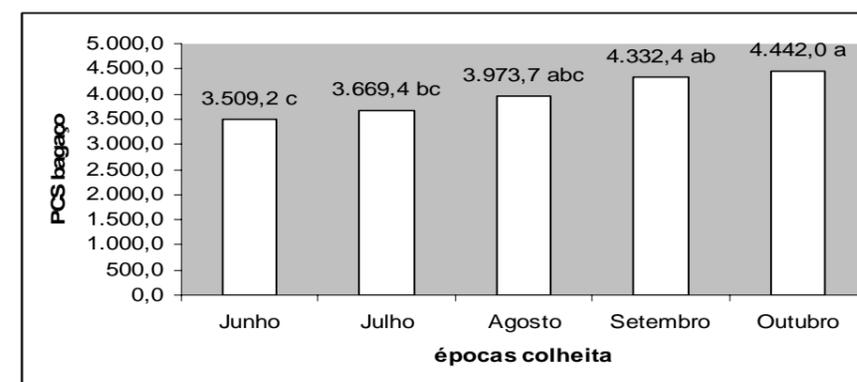


Gráfico 8 Poder calorífico superior do bagaço (cal.g⁻¹) em função das épocas de colheita, UFLA, 2011

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste Tukey aos 5%.

Os resumos da análise de variância para Poder Calorífico Inferior e para Poder Calorífico Útil do palhico e bagaco em base seca, avaliados em funcao das epocas de colheita sao apresentados nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7 Resumos da análise de variância para Poder Calorífico Inferior do bagaco (Kcal. kg⁻¹), Poder Calorífico Útil do bagaco (Kcal. kg⁻¹) em funcao das epocas de colheita

FV	GL	Quadrado Médio	
		PCI bagaco (kcal.kg ⁻¹)	PCL bagaco (kcal.kg ⁻¹)
Bloco	4	71167,577986	381164,039566
Época	4	822309,094406 **	2606119,313776ns
Resíduo	16	140186,188083	1024592,141541
Média	-	3653,71	1706,1052000
CVe (%)	-	10,25	59,33

FV = fonte de variacao, GL = graus de liberdade, ** = significativo a 1% de probabilidade, ns = não significativo aos 5% de probabilidade.

Tabela 8 Resumos da análise de variância para Poder Calorífico Inferior do palhico (Kcal.kg⁻¹), Poder Calorífico Útil do palhico (Kcal.kg⁻¹) em funcao das epocas de colheita

FV	GL	Quadrado Médio	
		PCI palhico (kcal.kg ⁻¹)	PCL palhico (kcal.kg ⁻¹)
Bloco	4	187715,428424	58623,166236
Época	4	1378974,169884**	1258848,571346*
Resíduo	16	133073,390049	286422,508976
Média	-	3637,2256000	1382,0068000
CVe (%)	-	10,03	38,73

FV = fonte de variacao, GL = graus de liberdade, ** = significativo em 1% de probabilidade, ns = não significativo aos 5% de probabilidade, * = significativo aos 5% de probabilidade.

Verifica-se, pela tabela 7, que ocorreram diferenças significativas para Poder Calorífico Inferior do bagaço, em função das épocas de colheita. O poder calorífico inferior está dentro do esperado para materiais lignocelulósicos. O Poder Calorífico Útil do bagaço apresenta uma tendência superior em relação ao Poder calorífico Útil do palhiço.

Pela Tabela 8, verifica-se que ocorreram diferenças significativas para Poder Calorífico Inferior e para Poder Calorífico Útil do palhiço, em função das épocas de colheita.

Leite e Pinto (1983) afirmaram que uma tonelada de cana-de-açúcar esmagada fornece 250 kg de bagaço com 50% de umidade. Nesse grau de umidade, seu poder calorífico inferior (PCI) é de 1.790 Kcal. kg⁻¹. Na umidade de 20%, o PCI é de 3.244 Kcal. kg⁻¹. Comentam também que em 20% de umidade, três toneladas de bagaço de cana poderiam substituir uma tonelada de óleo combustível.

Stupiello (1987) informa que, em média, uma tonelada de cana esmagada produz 280 kg de bagaço com 50% de umidade. Nesse grau de umidade seu poder calorífico inferior (PCI) é de 1.790 Kcal. kg⁻¹. Na umidade de 20% o PCI é de 3244 Kcal. kg⁻¹.

A Copersucar (1998) mostrou que cada tonelada de cana esmagada resulta, em média, em 260 kg de bagaço com 50% de umidade.

Molina Júnior et al. (1995) estudando métodos de recolhimento de resíduos de colheita manual de cana-de-açúcar, variedade SP 70-6163 no município de Piracicaba, SP, determinaram Índice de Palhiço de 0,34 e poderes caloríficos superior de 4.538,8 Kcal. kg⁻¹, inferior de 4.200,2 Kcal. kg⁻¹ e útil de 2.341,4 Kcal. kg⁻¹.

Para o canavial estudado, com produtividade agrícola determinada de $79,52 \text{ t.ha}^{-1}$, sua energia potencial bruta foi estimada em: álcool ($23.921 \text{ Mcal.ha}^{-1}$); bagaço ($35.591 \text{ Mcal.ha}^{-1}$) e palhiço ($62.679 \text{ Mcal.ha}^{-1}$).

Os valores médios obtidos são apresentados nos Gráficos 9, 10, 11 e 12.

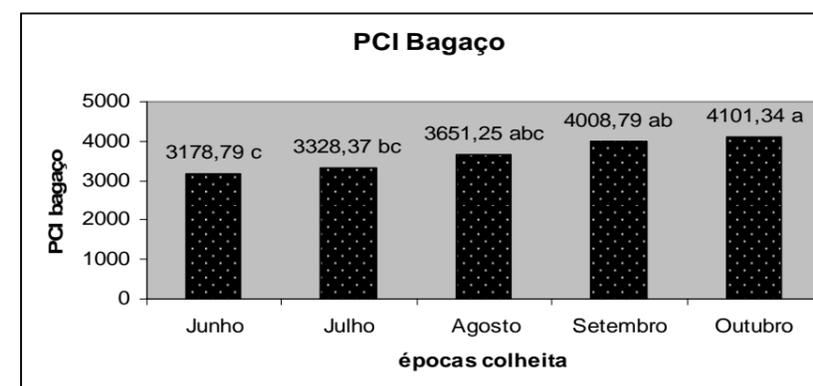


Gráfico 9 Poder calorífico inferior do bagaço (kcal. kg^{-1}) em função das épocas de colheita, UFLA, 2011

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste Tukey aos 5%

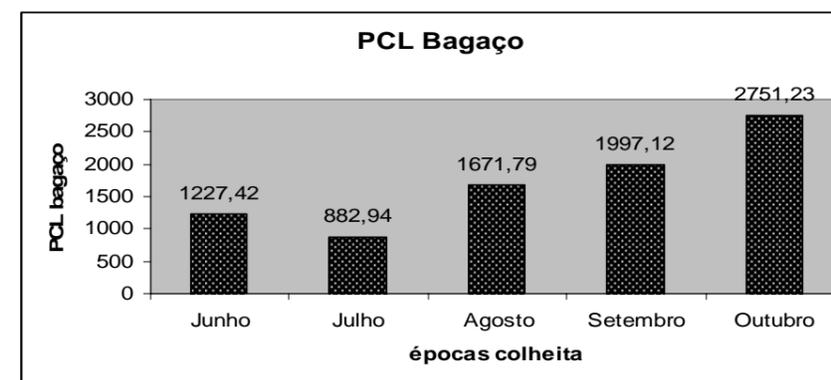


Gráfico 10 Poder calorífico útil do bagaço (Kcal. kg^{-1}) em função das épocas de colheita, UFLA, 2011

Verifica-se pelos Gráficos 9 e 10 que, no geral, o Poder Calorífico Inferior e o Poder Calorífico Útil do bagaço aumentou do início para o final da safra, sendo maior nos meses de setembro e outubro.

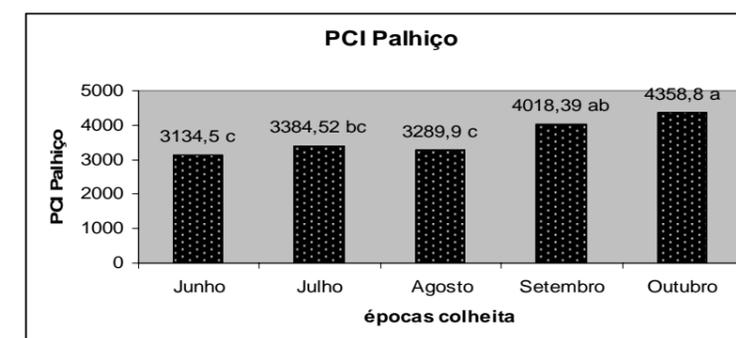


Gráfico 11 Poder calorífico inferior do palhão (kcal. kg⁻¹) em função das épocas de colheita, UFLA, 2011

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste Tukey aos 5%.

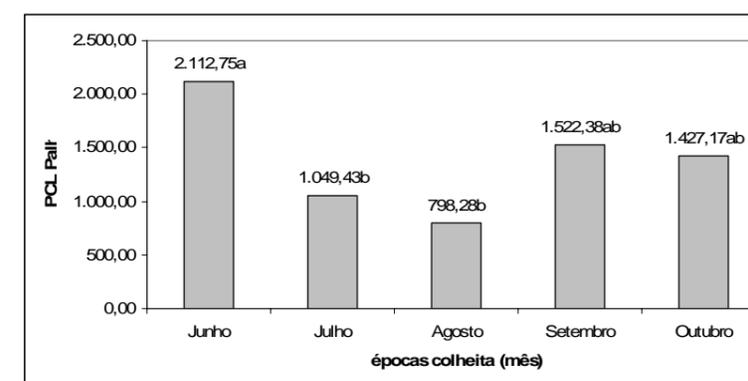


Gráfico 12 Poder calorífico útil do palhão (kcal. kg⁻¹) em função das épocas de colheita, UFLA, 2011

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste Tukey aos 5%.

Verifica-se, pelos Gráficos 11 e 12, que, no geral, o Poder Calorífico Inferior e o Poder Calorífico Útil do palhiço aumentou com o avançar da safra, sendo maior em setembro/outubro do que nos meses de junho/julho/agosto.

4.4 Rendimento em calorias do bagaço e do palhiço

Os resumos da análise de variância para rendimento em calorias do palhiço e bagaço em função das épocas de colheita são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 Resumos da análise de variância para rendimento em calorias do palhiço (Calor. palhiço) em Mcal.ha⁻¹, rendimento em calorias do bagaço (Calor. bagaço) em Mcal.ha⁻¹ e rendimento em calorias do palhiço mais bagaço (Calor. palhiço + bagaço) em Mcal.ha⁻¹ em função das épocas de colheita

FV	GL	Quadrado Médio		
		Calor.Palhiço (Mcal.ha ⁻¹)	Calor.Bagaço (Mcal.ha ⁻¹)	Calor.Pal.+Bag (Mcal.ha ⁻¹)
Bloco	4	233691304,01	144632199,69	634236758,02
Época	4	292717124,78ns	1,76734031**	3,12684030**
Resíduo	16	87805014,99	205485475,70	213986996,04
Média	-	34588,71	43867,23	78455,94
CVe (%)	-	27,09	32,68	18,65

FV = fonte de variação, GL = graus de liberdade, ** significativo ao nível de 1% de probabilidade, ns = não significativo aos 5% de probabilidade.

Verifica-se pela Tabela 9, que ocorreram diferenças significativas para rendimento em calorias do bagaço e do palhiço+bagaço em função das épocas de colheita.

Os valores médios obtidos são apresentados nos Gráficos 13,14 e 15.

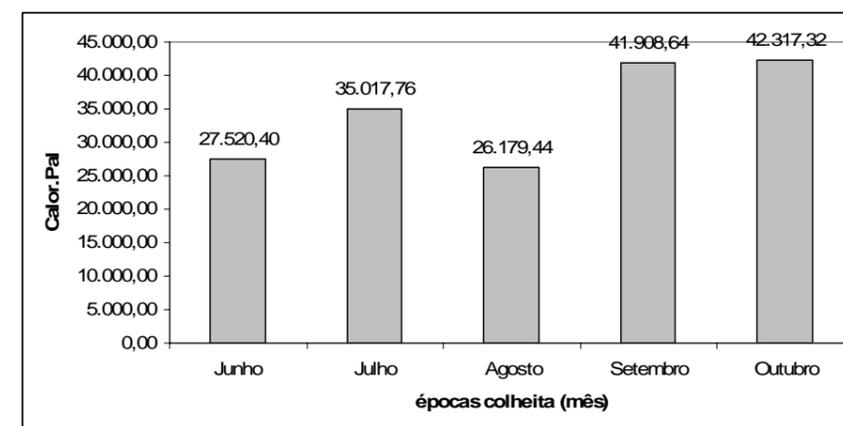


Gráfico 13 Rendimento em calorias do palhço (Mcal. ha⁻¹) em função das épocas de colheita, UFLA, 2011

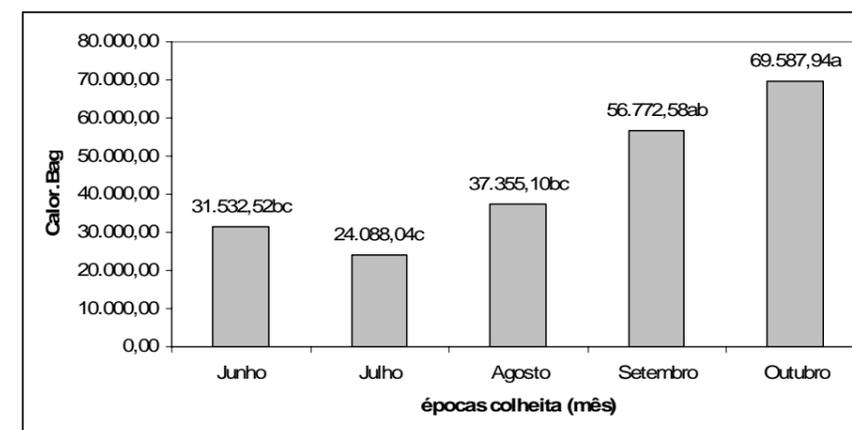


Gráfico 14 Rendimento em calorias do bagaço (Mcal. ha⁻¹) em função das épocas de colheita, UFLA, 2011

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste Tukey aos 5%.

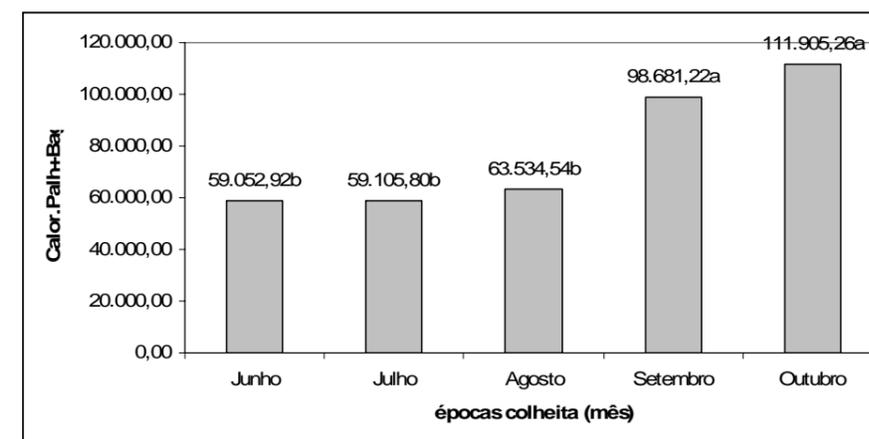


Gráfico 15 Rendimento em calorias do palhiço+bagaço (Mcal. ha⁻¹) em função das épocas de colheita, UFLA, 2011

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste Tukey aos 5%.

Como pode ser observado nos Gráficos 13, 14 e 15, de uma maneira geral, o rendimento em calorias do palhiço, bagaço e palhiço+bagaço foi maior em setembro/outubro do que nos meses de junho/julho/agosto. Provavelmente isto se deve ao fato de que em setembro/outubro a cana-de-açúcar encontrava-se com menor teor de umidade e maior rendimento em matéria seca.

Em ensaio de enfardamento de resíduos de cana-de-açúcar, Molina Júnior (1991) recolheu, em média, 9,50 t ha⁻¹ (matéria seca) e 12,55 t ha⁻¹ (matéria úmida) de resíduos de colheita mecanizada, enquanto Abramo Filho et al. (1993) estudaram os resíduos da colheita mecanizada de cana crua e encontraram 21,3 t ha⁻¹ de palhiço com umidade de 22,34%, 6,92% de terra junto à palha, 90% de matéria orgânica e 6,8% de cinzas.

Ripoli et al. (1991) estimaram que, de um canavial com 60 t ha⁻¹ de matéria-prima, seria possível obter 67.080 Mcal de energia.

O valor de referência para poder calorífico do resíduo bagaço é citado ser 4139,00 Kcal/kg estando em conformidade com Jenkins (1990).

4.5 Análise elementar dos resíduos

Os resumos das análises de variância para teores de nutrientes no palhiço e bagaço, em função das épocas de colheita são apresentados nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 Resumos da análise de variância para teores de nutrientes no Palhiço: Nitrogênio (%), Carbono (%), Hidrogênio (%), Enxofre (%) e Oxigênio (%) em função das épocas de colheita

FV	GL	Quadrado Médio				
		Palhiço				
		Nitrogênio (%)	Carbono (%)	Hidrogênio (%)	Enxofre (%)	Oxigênio (%)
Bloco	4	0,0095	1,4581	0,0997	0,0060	1,8816
Época	4	0,0218ns	1,1980ns	0,073ns	0,0043ns	1,6829ns
Resíduo	16	0,0074	1,1258	0,0606	0,0028	1,5624
Média		0,40	44,02	6,28	0,12	49,15
CVe (%)		21,20	2,41	3,92	42,62	2,54

FV = fonte de variação, GL = graus de liberdade, * e ** significativo no nível de 5% e 1% de probabilidade, ns= não significativo aos 5% de probabilidade.

Tabela 11 Resumos da análise de variância para teores de nutrientes no Bagaço: Nitrogênio (%), Carbono (%), Hidrogênio (%), Enxofre (%) e Oxigênio (%) em função das épocas de colheita

FV	GL	Quadrado Médio				
		Bagaço				
		Nitrogênio (%)	Carbono (%)	Hidrogênio (%)	Enxofre (%)	Oxigênio (%)
Bloco	4	0,0244	1,5587	0,0165	0,0020	1,7522
Época	4	0,0128ns	1,9891ns	0,1364*	0,003ns	3,4894ns
Resíduo	16	0,0081	1,5916	0,0313	0,0029	1,8500
Média		0,43	43,29	6,14	0,11	50,01
CVe (%)		20,90	2,91	2,88	46,21	2,72

FV = fonte de variação, GL = graus de liberdade, * e ** significativo no nível de 5% e 1% de probabilidade, ns= não significativo aos 5% de probabilidade.

Foi observado efeito significativo apenas para o teor de Hidrogênio do bagaço, portanto aplicando-se o teste de Tukey não foram detectadas diferenças para os demais nutrientes (Tabelas 10 e 11).

Hugot (1964 citado por RIPOLI, 1991), afirmou que o bagaço seco de cana-de-açúcar apresenta a seguinte composição elementar (em %): Carbono=44,0 a 49,0; Hidrogênio=6,0 a 7,4; Oxigênio=41,8 a 48,0 e cinzas=1,0 a 2,5. Em trabalhos posteriores, Fehr (1986) e Oliveira (1982) apresentaram valores semelhantes. Porém, Paturau (1969) afirmou que a composição química do bagaço de cana-de-açúcar varia com a variedade, com o grau de maturação da cultura, com o sistema de colheita adotado e com a eficiência industrial no processamento da matéria-prima.

Os valores de referência para a análise elementar dos resíduos de cana-de-açúcar são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 Valores de referência para a análise elementar

Material	Análise elementar (%)				Referência
	C	H	N	O	
Bagaço	46,70	5,90	0,90	46,50	Seye, Cortez e Gómez (2003)
Palhiço	43,42	5,71	1,23	49,64	

O bagaço e palha da cana apresentaram percentagens de elementos semelhantes ao encontrado por Seye, Cortez e Gómez (2003).

Quanto maior for a relação C/H melhor para produção de energia, pois, segundo Warhurst et al. (1997), o aumento na relação C/H indica um aumento no grau de aromaticidade do material.

Os valores médios obtidos para teores de nutrientes são apresentados nos Gráficos 16, 17, 18, 19, 20, 21 e 22.

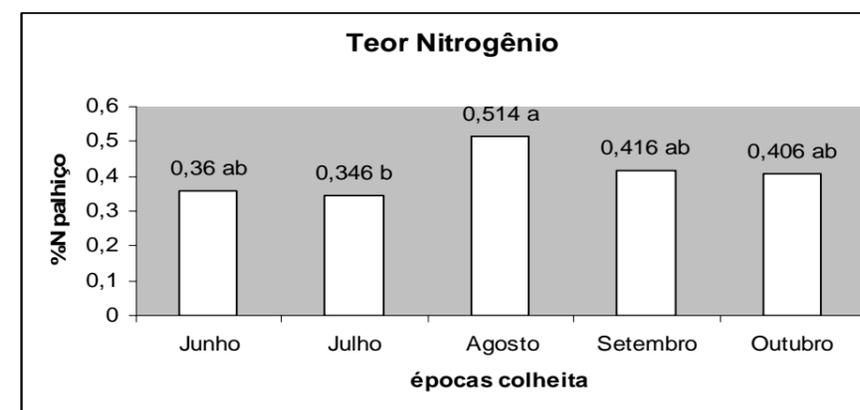


Gráfico 16 Teor de nitrogênio (%) do palheiro em função das épocas de colheita, UFLA, 2011

Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo Teste de Tukey aos 5%.

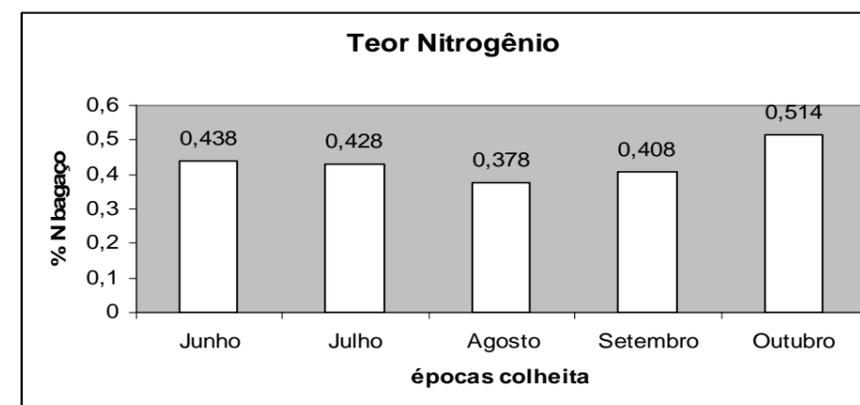


Gráfico 17 Teor de nitrogênio (%) do bagaço em função das épocas de colheita, UFLA, 2011

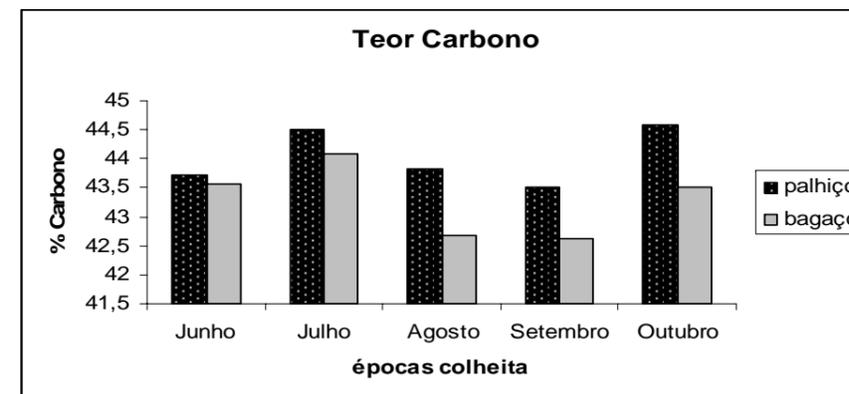


Gráfico 18 Teor de carbono (%) em função das épocas de colheita, UFLA, 2011

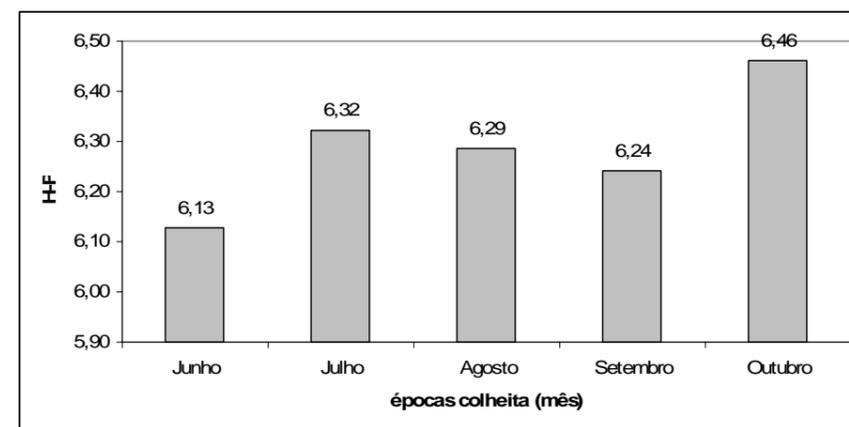


Gráfico 19 Teor de hidrogênio (%) do palhiço em função das épocas de colheita, UFLA, 2011

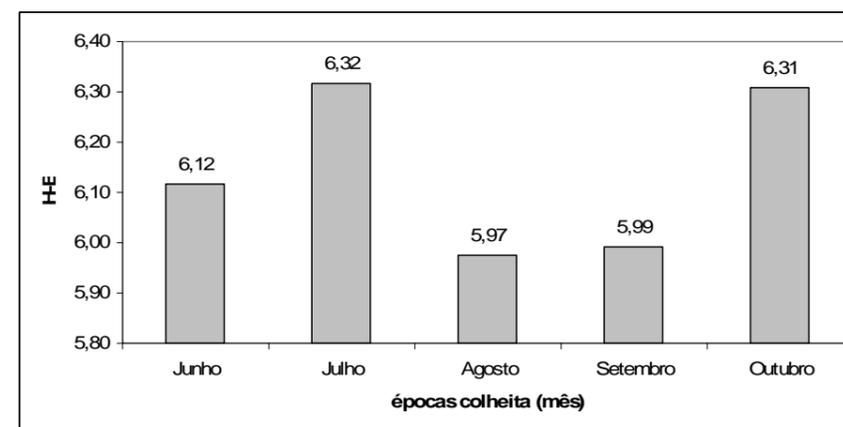


Gráfico 20 Teor de hidrogênio (%) do bagaço em função das épocas de colheita, UFLA, 2011

O teste não foi rigoroso para detectar diferenças quanto ao teor de hidrogênio do bagaço.

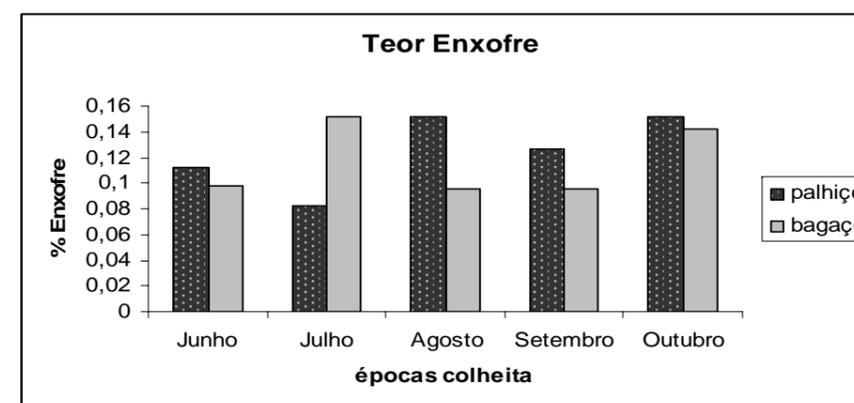


Gráfico 21 Teor de enxofre (%) em função das épocas de colheita, UFLA, 2011

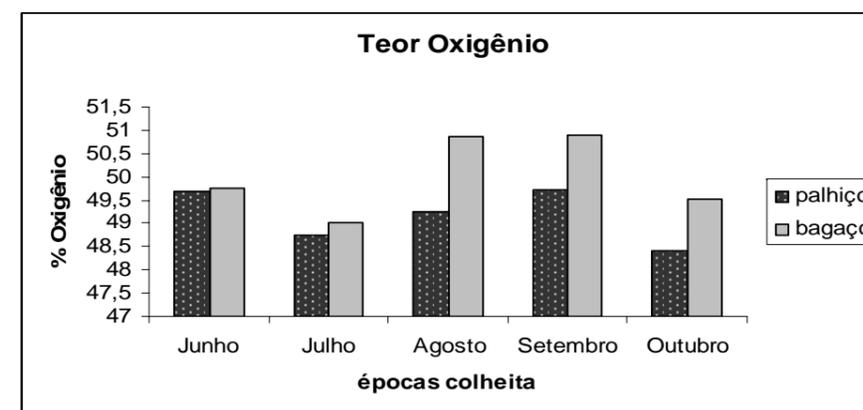


Gráfico 22 Teor de oxigênio (%) em função das épocas de colheita, UFLA, 2011

Observou-se diferença significativa apenas para o teor de Nitrogênio do palhiço de cana-de-açúcar, quando em agosto (0,514) o teor foi maior do que em julho (0,346). Os demais nutrientes não foram afetados significativamente pelas épocas de colheita, ou seja, não existe diferença na composição dos materiais em função das colheitas com exceção do Hidrogênio do bagaço que apresentou diferença significativa.

Observando-se os resultados apresentados na Figura 22 verifica-se que o teor de enxofre para os resíduos avaliados foi baixo, variando de 0,082% a 0,152% para o palhiço e de 0,096% a 0,152% para o bagaço. A presença de enxofre em combustíveis é indesejável, devido a problemas de corrosão e liberação de SO₂ (gás) após combustão.

Na análise elementar, o teor de carbono variou de 42% a 44%, o que é esperado para materiais lignocelulósicos.

Estudando as variedades de cana-de-açúcar SP70-1143 e NA56-79, Ripoli (1991) determinou o poder calorífico superior e as percentagens de hidrogênio elementar das frações colmos, ponteiros, folhas verdes e palhas,

tendo como média os valores de 4.041,84 Kcal kg⁻¹ e 6,34%, respectivamente. O autor concluiu que uma tonelada de material remanescente de colheita substituiria 1,08 t de bagaço em termos de poder calorífico, se considerado como combustível para fornalhas de caldeiras, sugerindo futuros estudos de balanço térmico em caldeiras de usinas e destilarias, e sobre as implicações (nas fornalhas e grelhas) decorrentes da terra contida no palhiço.

Analisando os resultados encontrados para as análises dos resíduos, verifica-se, na maioria dos casos, diferença destes comparados aos encontrados na literatura. Segundo Brum (2007), deve-se levar em conta que a constituição química desses materiais depende de vários fatores, como constituição do solo, clima, época da colheita, infecções e pragas, método de plantio, entre outros, fazendo com que mesmo plantas de mesma espécie apresentem composições diferentes. Podem ocorrer também diferenças na forma de amostrar o material e na própria metodologia de realização da análise. Além disso, trata-se de resíduo, material que é resultado de um processo e que pode ter sido contaminado ou armazenado em locais inadequados.

4.6 Teores de umidade do material em base seca

Os resumos da análise de variância para os teores de umidade do palhiço e bagaço em base seca em função das épocas de colheita são apresentados na Tabela 13.

Foi verificado diferenças significativas para umidade em base seca do bagaço em função das épocas de colheita avaliadas.

A Copersucar (1998) mostra que cada tonelada de cana esmagada resulta, em média, em 260 kg de bagaço com 50% de umidade.

Tabela 13 Resumos das análises de variância para teores de Umidade em Base Seca do palhiço em % e Umidade em Base Seca do bagaço em % em função das épocas de colheita

FV	GL	Quadrado Médio	
		Umidade palhiço (%)	Umidade bagaço (%)
Bloco	4	2761,1038	538,0483
Época	4	3058,6383	8685,5082**
Resíduo	16	1314,9206	1111,0702
Média	-	153,71	133,03
CVe (%)	-	23,59	25,05

FV = fonte de variação, GL = graus de liberdade, * e ** significativo no nível de 5% e 1% de probabilidade.

Ripoli et al. (1990), estudando três variedades de cana-de-açúcar, concluíram que o palhiço varia de 17 a 31% em peso úmido, em relação à quantidade de colmos industrializáveis contidos no canavial e que seu poder calorífico útil é da ordem de 3.600 Kcal kg⁻¹.

Os valores médios obtidos para estas características são apresentados nos Gráfico 23 e 24.

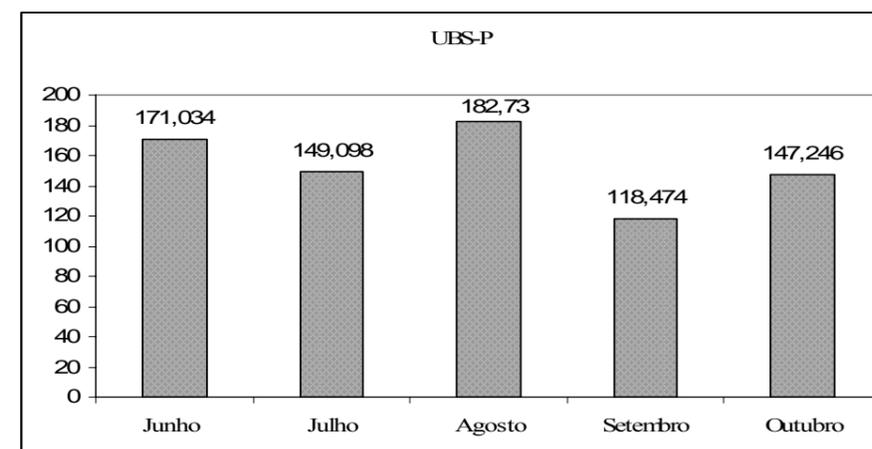


Gráfico 23 Teores de umidade em base seca do palhiço (%) em função das épocas de colheita, UFLA, 2011

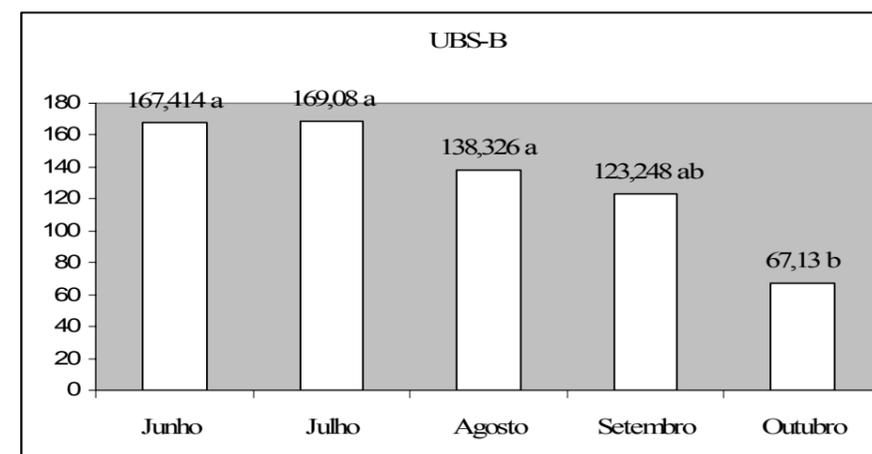


Gráfico 24 Teores de umidade em base seca do bagaço (%) em função das épocas de colheita, UFLA, 2011

Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo Teste de Tukey aos 5%.

Para umidade em base seca do bagaço ocorreram diferenças significativas entre os meses, apresentando maiores valores para os meses de Junho, Julho e Agosto. Para o bagaço, a umidade em base seca foi menor em outubro do que nas demais épocas de colheita. Concluindo, há uma maior variação na umidade presente no bagaço e quanto menor é a umidade, maior será o valor calórico.

Relatando experiência da Usina Central Romana, na República Dominicana, com o recolhimento e utilização de material remanescente de colheita de cana-de-açúcar como fonte de energia para geração de eletricidade, Lopez (1987) comenta que, no momento da colheita, a parte constituída pelos ponteiros e folhas representa 30% da massa da parte aérea, variando, no entanto, com a variedade e com as condições de cultivo, podendo representar em alguns casos, apenas 15%. A umidade desse material pode diminuir em períodos

menores que uma semana, para 30% com dias ensolarados, sendo frequente encontrar-se umidade inferior a 20%. Apresenta ainda, o poder calorífico do resíduo de colheita, com base na massa seca, como sendo da ordem de 4.180 Kcal. kg⁻¹ e com 30% de umidade, de 2.850 Kcal. ha⁻¹.

4.7 Cenários de energia

Rodrigues (1983) já enfatizava que a utilização de biomassa, tais como a madeira, carvão vegetal, alcatrão, resíduos vegetais, biogás e álcool, como alternativas para derivados de petróleo, apresenta a vantagem de, para ser produzido, necessitar maiores contingentes de mão-de-obra e de menor capital, se comparado com o uso do petróleo, o qual exige elevado capital e pouca exigência em mão-de-obra. Afirma que, com a utilização de biomassa aumenta-se a oferta de trabalho no campo, abrem-se novas fronteiras agrícolas, invertem-se as correntes migratórias e pode-se, efetivamente, levar o país a sua total independência energética. Tal colocação trata de uma visão mais ampla do que aquela que apenas se preocupa com questões ambientais e de reservas de combustíveis fósseis, que vem fazendo parte da maioria das discussões atuais que envolvem energia, ambiente e qualidade de vida.

A empresa Bagatex (1984), estimou o potencial energético dos resíduos de colheita de canaviais brasileiros, sem queima prévia, concluindo que, as queimadas, desperdiçam aproximadamente 87,72. 10¹²Kcal/ano de energia, o que equivale ao abastecimento do país por 63 dias com petróleo e uma economia de divisas da ordem de US\$1,464 bilhões.

No caso da biomassa, que inclui geração eólica, o destaque fica pelo aumento da geração a bagaço de cana. De acordo com os dados preliminares obtidos para o Balanço Energético, o setor sucroalcooleiro gerou 14,1 TWh em 2009, sendo 5,9 TWh destinados ao mercado e 8,2 TWh destinados ao consumo

próprio. Em 2008, a geração do setor ficou em 12 TWh, com 4,4 TWh destinados ao mercado.

A contabilização das diferentes formas de energia, com as suas diferentes unidades comerciais, e sua consolidação em um Balanço Energético se viabiliza através da utilização de fatores de conversão, que levam em consideração o conteúdo energético de cada fonte, tendo como referência a capacidade de liberação de calor, em calorias, de cada combustível, quando da sua combustão completa (conceito de poder calorífico).

Quando se quer a contabilização de energia em tep (tonelada equivalente de petróleo), calculam-se os fatores de conversão pela relação entre o poder calorífico de cada fonte e o poder calorífico do petróleo adotado como referência. Os quantitativos em unidades comerciais são convertidos em tep quando multiplicados por estes fatores.

A adoção de um petróleo de referência significa, na prática de elaboração do balanço energético, o valor para o poder calorífico inferior do petróleo, e, conseqüentemente, o valor da tep (tonelada equivalente de petróleo) como referência para todas as fontes de energia, possibilitando a consolidação das fontes.

O critério utilizado para a conversão da Energia Elétrica e Geração Hidráulica para contabilização em tep é a base teórica do primeiro princípio da termodinâmica, onde $1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal}$.

O petróleo de referência adotado tem 10.000 kcal/kg e são adotados os poderes caloríficos inferiores para as demais fontes de energia.

Estes critérios são aderentes com os critérios internacionais, especialmente com os da Agência Internacional de Energia - IEA, Conselho Mundial de Energia - WEC, Organização Latino Americana de Energia – OLAE e o Departamento de Energia dos Estados Unidos - DOE.

De posse dos cálculos efetuados, foram feitas simulações a partir do Poder Calorífico Útil (Kcal. kg^{-1}) e do Rendimento (t.ha^{-1}) do bagaço, palhiço e bagaço + palhiço. Foram calculados a Energia por hectare (Kcal. ha^{-1}), foram feitas as transformações da energia calorífica para energia elétrica (kWh.ha^{-1}), foram feitos cálculos de quantas casas poderiam ser iluminadas considerando um consumo de 200 kWh/mês. Considerando uma área total com cana-de-açúcar de 7,9 milhões de hectares calcula-se o quanto de energia poderiam ser produzidas.

As tabelas seguintes apresentam simulações da quantidade de energia obtida por ha.

Os cálculos estão apresentados abaixo:

Tabela 14 Simulação energética do bagaço

Bagaço						
	Kcal. kg^{-1}	t.ha^{-1}	Kcal.ha^{-1}	kWh.ha^{-1}		
Colheita	PCL	Massa/ha	Energia/ha	Energia elétrica	Nº casas	Energia produzida
Junho	1227,42	37,92	46543766,4	21648,2	9	171.150.669,2
Julho	882,94	28,04	24757637,6	11515,1	5	91.038.380,6
Agosto	1671,79	31,28	52293591,2	24322,6	10	192.294.475,6
Setembro	1997,12	38,63	77148745,6	35883,1	15	283.691.788,6
Outubro	2751,23	29,14	80170842,2	37288,7	15	294.804.462,2

Tabela 15 Simulação energética do palhiço

Palhiço						
	Kcal. kg^{-1}	t.ha^{-1}	Kcal.ha^{-1}	kWh.ha^{-1}		
Colheita	PCL	Massa/ha	Energia/ha	Energia elétrica	Nº casas	Energia produzida
Junho	2112,7	31,95	67500765	31395,7	13	248.214.404,2
Julho	1049,44	33,25	34893880	16229,7	7	128.312.008,2
Agosto	798,28	33,45	26702466	12419,7	5	98.190.148,2
Setembro	1522,38	27,47	41819778,6	19451,1	8	153.780.396,6
Outubro	1427,18	29,93	42715497,4	19867,6	8	157.073.245,6

Tabela 16 Simulação energética do palhiço + bagaço

<i>Bagaço + Palhiço</i>						
Colheita	Kcal. kg ⁻¹ PCL	t.ha ⁻¹ Massa/ ha	Kcal. ha ⁻¹ Energia/ha	kWh. ha ⁻¹ Energia elétrica	Nº casas	Energia produzida
Junho	3340,12	70,46	235344855,2	109462,7	45	865.412.106,2
Julho	1932,38	61,29	118435570,2	55086,3	23	435.512.287,8
Agosto	2470,07	64,72	159862930,4	74354,8	31	587.849.048,8
Setembro	3519,5	66,1	232638950	108204,1	45	855.461.614,6
Outubro	4178,41	59,08	246860462,8	114818,8	48	907.757.432,8

Base de cálculos: Consumo de 200KWh/mês

Área total com cana= 7,9 milhões de hectares

Observa-se que as colheitas realizadas nos meses de Setembro e Outubro proporcionaram maiores valores para o Poder Calorífico do Bagaço e Palhiço de Cana-de-açúcar.

5 CONCLUSÕES

- a) A variedade SP80-1842 apresentou potencial para utilização energética;
- b) O Poder Calorífico Superior do Bagaço e Palhiço variou dentro do período de safra da cana-de-açúcar, sendo maior nos meses de setembro/outubro do que nos meses de junho/julho/agosto;
- c) Há maior variação na umidade presente no bagaço e, de forma geral, quanto menor é a umidade, maior será seu poder calorífico;
- d) Em geral, o Poder Calorífico Inferior, o Poder Calorífico Útil e o Rendimento em calorias do bagaço e palhiço aumentou com o avançar da safra;
- e) Colheitas realizadas em Setembro/Outubro constituem melhores épocas para se obter maiores valores do poder calorífico do bagaço e palhiço de cana-de-açúcar.

REFERÊNCIAS

ABRAMO FILHO, J. et al. Resíduo de cana crua. **Açúcar e Álcool**, São Paulo, v. 67, n. 2, p. 23-25, 1993.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília, 2002. 153 p.

_____. _____. Brasília, 2005. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 10 out. 2010.

_____. Biomassa. In: _____. **Atlas de energia elétrica**. 2. ed. Brasília, 2005. p. 77-92.

AGUILLAR, A. et al. La combustion de los residuos de la cana de azúcar: parte I, características combustibles. **Cuba Azúcar**, Habana, v. 6, n. 2, p. 27-33, 1989.

ALEXANDER, A. G. **Energy cane alternative**. Amsterdam: Elsevier, 1985. 509 p.

_____. Sugarcane as a source of biomass. In: SANSOUCY, R.; AARTS, G.; PRESTON, T. R. (Ed.). **Sugarcane as feed**. Roma: FAO, 1986. 11 p.

ANDRADE, E. N. **O eucalipto**. Jundiaí: Cia Paulista de Estrada de Ferro, 1961. 667 p.

ANDRADE, L. A. de B. Cultura da cana-de-açúcar. In: CARDOSO, M. das G. **Produção de aguardente de cana**. Lavras: UFLA, 2006. p. 26-67.

ANDRADE, L. A. de B.; CARDOSO, M. das G. Cana-de-açúcar para produção de cachaça. In: MIRANDA, L. L. D.; VASCONCELOS, A. C. M. de; LANDELL, M. G. de A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. p. 747-762.

ANDREOLLI, C. Convergência de agricultura e energia: I., produção de biomassa celulósica para biocombustíveis e eletricidade. **Economia & Energia**, Belo Horizonte, ano 11, n. 66, p. 3-13, 2008.

ANJOS, I. A. dos. **Produtividade agrícola, rendimento e qualidade da aguardente artesanal de diferentes variedades de cana-de-açúcar**. 2001. 101 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.

ANJOS, I. A. dos et al. Efeitos da adubação orgânica e da época de colheita na qualidade da matéria-prima e nos rendimentos agrícola e de açúcar mascavo artesanal de duas cultivares de cana-de-açúcar (cana-planta). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 1, p. 59-63, jan./fev. 2007.

ARIZONO, H. et al. Alternativas para avaliação de produção de cana-de-açúcar. **STAB-Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 16, n. 5, p. 20-22, maio/jun. 1998.

AROLA, R. A. **Wood fuels: how do they stack up?** Madison: Forest Products Research Society, 1976. 12 p.

ASSINATURA do protocolo agroambiental prevê o fim da queima da cana para 2014. **Revista Coplana**, Guariba, v. 9, p. 8-9, abr. 2008. Disponível em: <<http://www.coplana.com/gxpfiles/ws001/design/RevistaCoplana/2008/Abril/pag8-9.pdf>>. Acesso em: 5 dez. 2009.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

ASSOCIAÇÃO DA INDÚSTRIA DE COGERAÇÃO DE ENERGIA.

Bioeletricidade: reduzindo emissões e agregando valor ao sistema elétrico nacional. Disponível em: <<http://www.cogensp.com.br>>. Acesso em: 10 jul. 2008.

ATCHISON, J. E. Making the bagasse available for pulp, paper, board, fiber board, particle board and others industrial products at what price equivalent fuel values of bagasse and other fibrous row material as compared to fossil fuel. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGISTS, 16., 1977, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: ISSCT, 1977. p. 3129-3144.

BAGATEX. **Analysis and prospects of rational utilization of sugar cane bagasse.** Ribeirão Preto, 1984. 8 p.

BALBO, J. M.; PADOVANI NETO, A. Excedentes de energia elétrica e sobra de bagaço para diferentes concepções e sistemas de conversão e utilização de energia aplicáveis a indústria sucro-alcooleira. **STAB-Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, n. 692, p. 52-58, 1987.

BARCELOS, A. F.; REZENDE, A. V. Aproveitamento dos resíduos de destilarias de cachaça de alambique. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 23, n. 217, p. 74-77, set./out. 2002.

BARROS, E. V. B. A matriz energética mundial e a competitividade das nações-bases de uma nova geopolítica. **Engevista**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 1, p. 47-56, jun. 2007.

BASSINELLO, A. I. **Interações de genótipos x ambientes em cana-de-açúcar.** 1984. 110 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1984.

BAUEN, A. et al. Electricity from sugar-cane in Brazil. In: KOPETZ, H. et al. (Ed.). **Biomass for energy and industry.** Würzburg: Carmen, 1998. p. 341-344.

BETANCOURT, A. F. Matérias estrañas em la cosecha de la cana de azúcar. **Boletim Oficial de la Asociación de Técnicos Azucareros de Cuba**, Habana, v. 22, n. 2, p. 3-29, 1976.

BEZERRA, M. C. L.; BURSZTYN, M. **Ciência e tecnologia para o desenvolvimento sustentável**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2000. 74 p.

BISCHOFF, K. P. et al. Registration of “L79-1002” sugarcane. **Journal of Plant Registrations**, Madison, v. 2, n. 3, p. 211-217, Dec. 2008.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Agropecuária e Abastecimento. **Relação das unidades produtoras cadastradas no departamento da cana-de-açúcar e agroenergia**. Brasília, 2009. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acesso em: 18 jul. 2009.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Normais climatológicas: 1961-1990**. Brasília: SPI/EMBRAPA, 1992. 84 p.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. **Matriz energética nacional 2030**. Brasília, 2007. 29 p.

BRITO, J. O. Energia de biomassa: uma alternativa para os trópicos. In: CONGRESSO PANAMERICANO DE ENERGIA, 3., 1986, Guatemala. **Anais...** São Paulo: CONFEA; CREA, 1986. p. 1-20.

BRITO, J. O.; BARRICHELLO, L. E. G. Aspectos técnicos na utilização de madeira e carvão vegetal como combustíveis. In: SEMINÁRIO DE ABASTECIMENTO ENERGÉTICO INDUSTRIAL COM RECURSOS FLORESTAIS, 2., 1982, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Secretaria de Ciência e Tecnologia, 1982. p. 101-108.

BRUM, S. S. **Caracterização e modificação química de resíduos sólidos do beneficiamento do café para produção de novos materiais**. 2007. 138 p. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

BRUSEKE, F. J. O problema do desenvolvimento sustentável. In: CAVALCANTI, C. (Org.). **Desenvolvimento e natureza: estudos para uma sociedade sustentável**. 4. ed. São Paulo: Cortez; Recife: Fundação Joaquim Nabuco, 2003. p. 29-40.

CAMARGO, A. L. B. **As dimensões e os desafios do desenvolvimento sustentável: concepções, entraves e implicações à sociedade humana**. 2002. 197 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

CAMPOS, R. M. Valor econômico do bagaço. **Brasil Açúcar**, Rio de Janeiro, v. 55, n. 105, p. 20-24, 1987.

CARMO, A. T. O Proálcool e a economia agrocanavieira. **Brasil Açúcar**, Rio de Janeiro, v. 90, n. 3, p. 32-36, 1977.

CASTRO, M. A luz que vem da cana. **Jornal da Cana**, Ribeirão Preto, n. 91, p. 38-39, jul. 2001.

CASTRO, N. J. de; DANTAS, G. de A. **A bioeletricidade sucroalcooleira e o hiato entre oferta potencial e oferta efetiva**. Rio de Janeiro: IFE, 2008a. 9 p.

_____. **A importância da inserção da bioeletricidade na matriz brasileira e o leilão de energia de reserva**. Rio de Janeiro: IFE, 2008b. 8 p.

CAVALCANTI, C. Sustentabilidade da economia: paradigmas alternativos de realização econômica. In: _____. **Desenvolvimento e natureza: estudos para uma sociedade sustentável**. São Paulo: Cortez, 2003. p. 153-176.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil**: situação atual, oportunidades e desenvolvimento. Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <<http://www.cgee.org.br>>. Acesso em: 15 abr. 2008.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA. **Cana-de-açúcar no Brasil**. São Paulo, 2001. Disponível em: <<http://www.iee.usp.br>>. Acesso em: 2 jun. 2008.

COCK, J.; BRICEÑO, C. O.; TORRES, J. Energy from cane trash in Colômbia. **International Cane Energy News**, Bogotá, v. 5, n. 1, p. 6-8, 2000.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**: 5ª aproximação. Viçosa, MG: UFV, 1999. 322 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília, 2009. 16 p.

COOMBS, J. Sugar-cane as an energy crop. **Biotechnology and Genetic Engineering Reviews**, Newcastle Upon Tyne, v. 1, n. 1, p. 311-345, Jan. 1984.

COPERSUCAR. Projeto BRA/96/G31: disponibilidade da palha de cana-de-açúcar. **Cenbio Notícias**, Brasília, v. 4, n. 12, 1998a. Disponível em: <<http://www.cenbio.org.br/index1.htm>>. Acesso em: 5 nov. 2001.

_____. Projeto BRA/96/G31: enfardamento da palha: geração de energia por biomassa, bagaço da cana-de-açúcar e resíduos. **STAB-Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 16, n. 6, p. 44-46, 1998b.

CORRÊA NETO, V. **Potencial da cogeração e planejamento da expansão do setor elétrico**. Disponível em: <http://www.apta.sp.gov.br/cana/anexos/Positionpaper_sessao1_Vicente.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2009.

CORRÊA NETO, V.; RAMON, D. **Análise de opções tecnológicas para projetos de co-geração no setor sucroalcooleiro**. Brasília: SETAP, 2002. 116 p.

COSTA, M. H. A.; BALESTIERI, J. A. P. Viabilidade de sistemas de cogeração em indústria química. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS TÉRMICAS, 7., 1998, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ENCIT, 1998. v. 1, p. 358-363.

DANTAS, D. N.; MAUAD, F. F.; OMETTO, A. R. Potential for generation of thermal and electrical energy from biomass of sugarcane: a exergetic analysis. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED MATERIAL, 11., 2009, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: UFRJ, 2009. 1 CD-ROM.

DIAS, M. O. S. et al. Production of bioethanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse: integration to conventional bioethanol production process. **Chemical Engineering Research & Design**, Elmsford, v. 87, n. 2, p. 1206-1216, May 2009.

DITOMASO, J. M.; BARNEY, J. N.; FOX, A. M. **Biofuel feedstocks: the risk of future invasions**. Iowa: The Council for Agricultural Science and Technology, 2007. 7 p.

DOAT, J. Le pouvoir calorifique des bois tropical. **Bois et Forêts des Tropiques**, Nogent-Sur-Marne, v. 172, p. 33-55, 1977.

EID, F.; CHAN, K.; PINTO, S. S. Tecnologia e co-geração de energia na indústria sucroalcooleira paulista: uma análise da experiência e dificuldades de difusão. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 28, n. 5, p. 1-6, set./out. 1998.

EL-BASSAM, N. **Energy plant species**. London: Science, 1998. 321 p.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO.
Ampliação da oferta de energia através da biomassa. São Paulo, 2001.
Disponível em:
<http://www.fiesp.com.br/publicacoes/pdf/ambiente/relatorio_dma.pdf>. Acesso em: 1 nov. 2009.

FEHR, M. Equivalências efetivas de combustíveis industriais. **Energia**, São Paulo, v. 8, n. 41/42, p. 30-43, 1986.

FERNANDES, O. W. B. **Avaliação de variedades de cana-de-açúcar para a produção de cachaça artesanal e a interferência dos resultados no comportamento do produtor na região de Salinas-MG: uma contribuição extensionista.** 2005. 66 p. Dissertação (Mestrado em Educação Profissional Agrícola) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2005.

FERREIRA, D. F. **SISVAR - Sistema de Análise de Variância.** Lavras: UFLA, 2006. Software.

FREITAS, M. A. V. **Setor elétrico brasileiro: oportunidades em energias renováveis.** Brasília: ANEEL, 2001. 1 CD-ROM.

GARCIA, J. C. **Efeitos da adubação orgânica, associada ou não à adubação química, calagem e fosfatagem, nos rendimentos agrícolas e de aguardente teórica da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*).** Lavras: UFLA, 2005. 82 p.

GIAMALVA, M. J.; CLARKE, S. J.; STEIN, J. M. Sugarcane hybrids of biomass. **Biomass**, London, v. 6, n. 88, p. 61-68, Apr. 1984.

GOMAZAKO, M. S.; OLIVEIRA, C. J. Geração de bagaço e cogeração de energia elétrica na indústria sucroalcooleira. In: WORKSHOP INTERNACIONAL BRASIL-JAPÃO EM BIOCOMBUSTÍVEIS, MEIO AMBIENTE E BIOMASSA, 5., 2007, Campinas. **Anais...** Campinas: UNICAMP, 2007. 1 CD-ROM.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 14. ed. Piracicaba: ESALQ/USP, 1990. 451 p.

GRAUER, A.; KAWANO, M. Uso de biomassa para a produção de energia. **Boletim Informativo da Bolsa de Reciclagem**, Porto Alegre, ano 1, n. 5, nov./dez. 2001. Disponível em: <<http://www.bolsafiep.com.br>>. Acesso em: 5 ago. 2009.

GRIVET, L.; ARRUDA, P. Sugarcane genomics: depicting the complex genome of an important tropical crop. **Current Opinion in Plant Biology**, London, v. 5, n. 36, p. 122-127, Jan./June 2001.

HAMMOND, A. L. Photosynthetic solar energy: rediscovering biomass fuels. **Science**, New York, v. 197, n. 4305, p. 745-746, 1977.

HILL, J. et al. Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. **Proceedings of the National Academy of Science**, Washington, v. 103, n. 43, p. 11206-11210, 2006.

HONT, A. et al. Sugarcane: a major source of sweetness, alcohol, and bio-energy. In: MOORE, P.; MING, R. (Ed.). **Genomic of tropical crop plants**. Berlin: Springer, 2008. p. 483-513.

INSTITUTO CUBANO DE INVESTIGACIONES DE LOS DERIVADOS DE LA CAÑA DE AZÚCAR. **Manual de derivados da cana-de-açúcar**. Habana, 1999. 474 p.

INSTITUTO EUVALDO LODI. **Álcool combustível**. Brasília: IEL/NC, 2008. 163 p. (Série Indústria em Perspectiva).

INSTITUTO MINEIRO DE AGROPECUÁRIA. **Lei nº 13.949**, de 11 de julho de 2001. Dispõe sobre estabelecer o padrão de identidade e as características do processo de elaboração da “Cachaça de Minas” e dá outras providências. Belo Horizonte, 2001. Disponível em:
<<http://www.ima.mg.gov.br/certificacao/legislacao>>. Acesso em: 10 jul. 2010.

JACKSON, P. A. Breeding for improved sugar content in sugarcane. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 2/3, p. 277-290, June 2005.

JANK, M. S. **A relação do setor sucroalcooleiro com o meio ambiente**. Sertãozinho: União da Indústria de Cana-de-Açúcar, 2007. Disponível em:
<http://www.riosvivos.org.br/downloads/jank_unica.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2009.

JENKINS, B. M. Fuel properties for biomass materials. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON APPLICATION AND MANAGEMENT OF ENERGY IN AGRICULTURE: THE ROLE BIOMASS FUELS, 1., 1990, New Delhi. **Proceedings...** Ludhiana: Punjab Agricultural University, 1990. p. 21-23.

JOHNSON, J. M. F. et al. Biomass-bioenergy crops in the United States: a changing paradigm. **The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology**, Tokyo, v. 1, n. 1, p. 1-28, 2007.

KITAYAMA, O. A. **Tecnologia e operação de unidades de bioeletricidade a partir de biomassa de cana-de-açúcar**: condições operacionais. São Paulo: COGEN, 2007. 1 CD-ROM.

LAKSHMANAN, P. et al. Sugarcane biotechnology: the challenge and opportunities. **In Vitro Cellular & Development Biology-Plant**, Columbia, v. 41, n. 4, p. 345-363, July/Aug. 2005.

LEITE, W. B.; PINTO, L. A. **O valor do bagaço como combustível**: avaliação do bagaço da cana-de-açúcar. São Paulo: UNESP, 1983. 39 p. (Coleção Sopral, 4).

LINGLE, S. E. Effect of transient temperature change on sucrose metabolism in sugarcane internodes. **Journal of the American Society of Sugar Cane Technologists**, Davis, v. 24, n. 1, p. 132-141, Jan./Apr. 2004.

LOPEZ, P. A. Recolecion de barbojo como fuente energética em el Central Romana. In: GRUPO DE PAÍSES LATINOAMERICANOS Y DEL CARIBE EXPORTADORES DE AZÚCAR: USO ALTERNATIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR PARA ENERGIA Y ALIMENTO, 1., 1987, México. **Anales...** México: GEPLACEA, 1987. p. 57-62.

LORA, E. E. S.; TEIXEIRA, F. N. Energia e meio ambiente. In: MARQUES, M.; HADDAD, J.; MARTINS, A. R. S. (Org.). **Conservação da energia: eficiência energética de instalações e equipamentos**. Itajubá: UNIFEI, 2001. v. 1, p. 30-93.

LOVELOCK, J. **A vingança de Gaia**. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2006. 159 p.

MACEDO, I. C. de. **Geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil: situação atual, oportunidades e desenvolvimento**. Brasília: Secretaria Técnica do Fundo Setorial de Energia, 2001. Disponível em: <<http://www.cgee.org.br>>. Acesso em: 29 set. 2009.

_____. Greenhouse gas emissions and energy balance in bioethanol production and utilization in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 14, n. 1, p. 77-81, Jan. 1998.

MACEDO, I. C. de; LEAL, M. R. L. V.; SILVA, J. E. A. R. **Balço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil**. São Paulo: Secretaria de Meio Ambiente, 2004. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/multimedia/publicacao>>. Acesso em: 10 out. 2009.

MATSUOKA, S.; ARIZONO, H. Avaliação de variedades pela capacidade de produção de biomassa e pelo valor energético. **STAB-Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 6, n. 2, p. 39-46, 1987.

MAULE, R. F.; MAZZA, J. A.; MARTHA JÚNIOR, G. B. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 2, p. 295-301, abr./jun. 2001.

MENEGUELLO, L. A.; CASTRO, M. C. A. A. O protocolo de Kyoto e a geração de energia elétrica pela biomassa da cana-de-açúcar como mecanismo de desenvolvimento limpo: interações, Campo Grande. **Revista Internacional de Desenvolvimento Local**, Campo Grande, v. 8, n. 1, p. 33-45, mar. 2007.

MING, R. et al. Sugarcane Improvement through breeding and biotechnology. In: JANICK, J. (Ed.). **Plant breeding reviews**. New York: J. Wiley, 2006. p. 115-118.

MOLINA JÚNIOR, W. F. **Enfardamento de resíduo de colheita de cana-de-açúcar (Saccharum spp.):** avaliação dos desempenhos operacional e econômico. 1991. 101 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1991.

MOLINA JÚNIOR, W. F. et al. Energia potencial da biomassa não industrializável de canaviais para emprego como combustível. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24., 1995, Viçosa, MG. **Resumos...** Viçosa, MG: SBEA, 1995. p. 142.

MOORE, P. H. Integration of sucrose accumulation process across hierarchical scales: towards developing and understanding of the gene-to-crop continuum. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 10, p. 119-135, Jan./Feb. 2005.

NASCIMENTO, S. M.; DUTRA, R. I. J. P.; NUMAZAWA, S. Resíduos de indústria madeireira: caracterização, conseqüências sobre o meio ambiente e opções de uso. **Holos Environment**, Rio Claro, v. 6, n. 1, p. 8-21, 2006.

NATALE NETTO, J. **A saga do álcool**. Osasco: Novo Século, 2007. 343 p.

NEMIR, A. S. Alcohol fuels: the Brazilian experience and its implications for the United States. **Sugar Journal**, New Orleans, v. 45, n. 12, p. 10-13, May 1983.

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

OLIVEIRA, J. G. **Perspectivas para a cogeração com bagaço de cana-de-açúcar: potencial do mercado de carbono para o setor sucroalcooleiro paulista.** 2007. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

OLIVEIRA, M. W. de et al. Nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 30-43, jul./ago. 2007.

PATURAU, J. M. **Bagasse: by products of the sugar cane industry.** New York: Elsevier, 1969. 262 p.

PRIETO, M. G. **Alternativas de cogeração na indústria sucro-alcooleira: estudo de caso.** 2003. 280 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

RAE, A. L. et al. Sucrose accumulation in the sugarcane stem: pathways and control points for transport and compartmentation. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 14, p. 159-168, June 2005.

RAMOS, R. A. V. et al. Análise energética e exergética de uma usina sucro-alcooleira com sistema de cogeração de energia em expansão. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE GERAÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 5., 2003, São Pedro. **Anais...** São Pedro: USP, 2003. 1 CD-ROM.

REZENDE SOBRINHO, E. A. **Comportamento de variedades de cana-de-açúcar em Latossolo Roxo, na região de Ribeirão Preto, SP.** 2000. 85 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2000.

RIBEIRO, D. V.; MORELLI, M. R. **Resíduos sólidos: problema ou oportunidade?** Rio de Janeiro: Interciência, 2009. 158 p.

RIPOLI, M. L. C. **Mapeamento do palhiço enfardado de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) e do seu potencial energético.** 2002. 91 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2002a.

_____. **Utilização do material remanescente de colheita de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*): equacionamento dos balanços energético e econômico.** 1991. 150 f. Tese (Livre-Docência em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1991.

_____. Viabilidade técnico-econômica da coleta e transporte do palhiço para produção de energia elétrica: um projeto para recolhimento do palhiço. In: SEMINÁRIO E PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR, 4., 2002, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: IDEA, 2002b. 1 CD-ROM.

RIPOLI, T. C. C. et al. Equivalente energético da palhada da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 20., 1990, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 1990. p. 249-262.

_____. Potencial energético de resíduos de cosecha de la cãna verde. **STAB-Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 10, n. 1, p. 23-26, 1991.

RIPOLI, T. C. C.; MIALHE, L. G.; BRITO, J. O. Queima de canavial: o desperdício não mais admissível. **Álcool & Açúcar**, Piracicaba, v. 10, n. 54, p. 18-23, 1990.

RIPOLI, T. C. C.; MOLINA JUNIOR, W. F. Cultura canavieira: um desperdício energético. **Maquinaria Agrícola**, Porto Alegre, v. 6, n. 1, p. 2-3, 1991.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. Effects of pré-harvest burning in sugar cane (*Saccharum spp.*) in Brazil. **Rivista di Ingegneria Agraria**, Bologna, v. 32, n. 4, p. 202-210, 2001.

ROCHA, M. T.; MELLO, P. C. O efeito estufa e o mecanismo de desenvolvimento limpo. In: _____. **A questão ambiental: desenvolvimento e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Escola Nacional de Seguros, 2004. p. 1-21.

RODRIGUES, E. C. **Solução energética**. São Paulo: Unidas, 1983. 361 p.

ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. **Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira**. Campinas: UNICAMP, 2005. 448 p.

RUBIN, E. M. Genomics of cellulosic biofuels. **Nature**, London, v. 454, n. 14, p. 841-845, 2008.

SAMUELS, G. et al. The production of energy cane in Puerto Rico: the hatillo project. **Journal of the American Society of Sugar Cane Technologists**, Davis, v. 3, n. 2, p. 14-17, Sept. 1984.

SÃO PAULO. **Lei Estadual nº 11.241**, de 19 de setembro de 2002. Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas. São Paulo, 2002. Disponível em: <[http://www.sigam.ambiente.sp.gov.br/Sigam2/Repositorio/24/Documentos/Lei % 20Estadual_11241_2002.pdf](http://www.sigam.ambiente.sp.gov.br/Sigam2/Repositorio/24/Documentos/Lei%20Estadual_11241_2002.pdf)>. Acesso em: 5 set. 2010.

SARTORI, M. M. P. **Otimização da produção de energia e biomassa do resíduo de colheita em variedades de cana-de-açúcar**. 2001. 121 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

SARTORI, M. M. P. et al. Determination of the optimal quantity of crop residues for energy in sugarcane crop management using linear programming in variety selection and planting strategy. **Energy**, Amsterdam, v. 26, n. 11, p. 1031-1040, 2001.

SCARPINELLA, G. D. A. et al. A cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, seus impactos ambientais e influência na demanda e disponibilidade de água. In: SEMINÁRIO IBEROAMERICANO SOBRE PLANIFICACIÓN, PROYECTO Y OPERACIÓN DE SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE ÁGUA, 9., 2009, Valencia. **Anais...** Valencia: SEREA, 2009. 1 CD-ROM.

SCHIRMER, F. **Comparação de indicadores de eficiência energética e exergética em duas indústrias do setor sucroalcooleiro**. 2006. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2006.

SCHMER, M. R. et al. Net energy of cellulosic ethanol from switchgrass. **Proceedings of the National Academy of Science**, Washington, v. 105, n. 2, p. 464-469, Jan. 2008.

SERVIÇO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **Diagnóstico da cachaça de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2001. 259 p.

SEYE, O.; CORTEZ, L. A. B.; GÓMEZ, E. O estudo cinético da biomassa a partir de resultados termogravimétricos. **Energia no Meio Rural**, Campinas, ano 3, 2003. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC00000002200000200022 & script=sci_arttext>. Acesso em: 19 out. 2009.

SINGELS, A.; DONALDSON, R. A.; SMITH, M. A. Improving biomass production and partitioning in sugarcane: theory and practice. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 14, p. 291-303, June 2005.

SOUZA, Z. J. **Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: entraves estruturais e custos de transação: uma avaliação das formas de comercialização da energia co-gerada pelo setor sucroalcooleiro.** 2003. 112 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2003.

SOUZA, Z. J.; AZEVEDO, P. F. Energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: um estudo a partir de usinas paulistas. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 44, n. 2, p. 20-35, 2006.

STICKLEN, M. B. Feedstock crop genetic engineering for alcohol fuels. **Crop Science**, Madison, v. 47, n. 2, p. 238-248, Feb. 2007.

_____. Plant genetic engineering for biofuel production: towards affordable cellulosic ethanol. **Nature Reviews**, London, v. 9, n. 9, p. 433-443, June 2008.

STUPIELLO, P. A cana-de-açúcar como matéria-prima. In: PARANHOS, S. P. (Coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização.** Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1, p. 761-804.

SUMNER, H. R. et al. **Indirect fire biomass and bomb calorimeter determinations.** Amsterdam: ASAE, 1983. 285 p.

TOLMASQUIM, M. T. As origens da crise energética brasileira. **Ambiente e Sociedade**, Campinas, v. 6/7, p. 179-184, jan./jun. 2000.

UNIÃO DAS INDÚSTRIAS DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Estatísticas.** Disponível em: <<http://www.unica.com.br/estatisticas>>. Acesso em: 12 nov. 2003.

_____. **Setor sucroenergético: mapa da produção: produção de etanol do Brasil.** Disponível em: <<http://www.unica.com.br>>. Acesso em: 10 out. 2009.

VALE, A. T.; GENTIL, L. V. Produção e uso energético de biomassa e resíduos agroflorestais. In: _____. **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III**. Rio Branco: Suprema, 2008. p. 195-241.

VIDAL, J. W. B.; VASCONCELLOS, G. F. **O poder dos trópicos**. São Paulo: Casa Amarela, 1998. 304 p.

WARHURST, A. M. et al. Pore structure and adsorption characteristics of steam pyrolysis carbons from *Moringa oleifera*. **Carbon**, Elmsford, v. 35, n. 2, p. 1039-1045, 1997.

WATT, D. A. et al. Increasing the utility of genomics in unraveling sucrose accumulation. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 2/3, p. 149-152, June 2005.

WOODARD, K. R.; PRINE, G. M. Dry matter accumulation of elephantgrass, energycane and elephantmillet in a subtropical climate. **Crop Science**, Madison, v. 33, n. 4, p. 818-824, July/Aug. 1993.

XAVIER, M. R. **The Brazilian sugarcane ethanol experience**. Washington: Competitive Enterprise Institute, 2007. 12 p.

ZHU, Y. J.; ALBERT, H. H.; MOORE, P. H. Differential expression of soluble acid invertase genes in the shoots of high-sucrose and low-sucrose species of *Saccharum* and their hybrids. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 27, n. 3, p. 193-199, May 2000.

ZHU, Y. J.; KOMOR, E.; MOORE, P. H. Sucrose accumulation in the sugarcane stem is regulated by the difference between the activities of soluble acid invertase and sucrose phosphate synthase. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 115, n. 7, p. 609-616, May 1997.