



TOMÁS DE AQUINO FERREIRA

**ANÁLISE ENERGÉTICA DA CULTURA DO
MILHO PARA SILAGEM IRRIGADA POR PIVÔ
CENTRAL**

LAVRAS–MG

2017

TOMÁS DE AQUINO FERREIRA

**ANÁLISE ENERGÉTICA DA CULTURA DO MILHO PARA SILAGEM
IRRIGADA POR PIVÔ CENTRAL**

Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia Agrícola, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Prof. DSc. Carlos Eduardo Silva Volpato

Coorientador

Prof. DSc. Jackson Antônio Barbosa

LAVRAS – MG
2017

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Ferreira, Tomás de Aquino.

Análise energética da cultura do milho para silagem irrigada
por pivô central / Tomás de Aquino Ferreira. - 2017.

105 p. : il.

Orientador(a): Carlos Eduardo Silva Volpato.

Coorientador(a): Jackson Antônio Barbosa.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2017.

Bibliografia.

1. Balanço energético. 2. Milho. 3. Silagem. I. Volpato,
Carlos Eduardo Silva. II. Barbosa, Jackson Antônio. III. Título.

TOMÁS DE AQUINO FERREIRA

**ANÁLISE ENERGÉTICA DA CULTURA DO MILHO PARA SILAGEM
IRRIGADA POR PIVÔ CENTRAL**

Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia Agrícola, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 27 de julho de 2017.

Prof. Dr. Giovani Francisco Rabelo	UFLA
Prof. Dr. Inácio Maria Dal Fabbro	UFLA
Prof. Dr. Jacson Antônio Barbosa	UFLA
Prof. Dr. Joaquim Paulo da Silva	UFLA

Prof. DSc. Carlos Eduardo Silva Volpato
Orientador

LAVRAS – MG
2017

E antes de tudo, a Deus pela Permissão, ao Espírito Santo pela Inspiração, a Jesus, pelo Caminho, à Maria, pela Proteção.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Meu agradecimento e reverência ao Deus Pai, Filho e Espírito Santo.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Engenharia pela oportunidade de realizar este trabalho. À Coordenação de Pós-Graduação na pessoa estimada do colega Prof. Dr. Alessandro Torres Campos, pela atenção.

Ao Prof. Dr. Carlos Eduardo da Silva Volpato, pela inestimável orientação. Ao Prof. Dr. Jackson Antônio Barbosa, pela coorientação e, mais do que isso, agradeço pelo incentivo, disponibilidade, apoio e amizade.

Ao Prof. Dr. Giovanni Rabelo, pela participação na banca, pela dedicação e amizade. Ao Prof. Dr. Joaquim Paulo da Silva, pela contribuição como membro da banca. Ao Prof. Dr. Inácio Maria Dal Fabbro, por nos honrar com a sua presença, pela participação e amizade. A presença de todos enriqueceu este trabalho. À Profa. Sílvia, minha colega e filha, agradeço pelas orientações, pelo apoio irrestrito, pela "paciência" e pelo carinho constante.

Aos colegas e amigos Fábio Moreira, Pedro Castro Neto, Marcelo Carvalho, Alessandro Veloso e Antônio Marciano da Silva, agradeço pela amizade. Em especial pela ajuda dos colegas Alberto Colombo, Paulo Trugilho e Mário Guerreiro.

À Helem, secretária do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, agradeço por tamanha gentileza e atenção. E ao Lázinho e demais funcionários do CDTT-UFLA pela valiosa colaboração.

Ao médico e amigo Dr. Clóvis Figueiredo Sette Bicalho, agradeço pela competência e dignidade. E aos meus genros Bruno Cabral e Leonardo Maia pelo apoio. Finalmente, às minhas filhas Ana, Sílvia e Rute pelo apoio constante e incondicional. Sou muito grato a Deus por me permitir tê-las como filhas.

“O primeiro e essencial passo na direção de entender um assunto é achar os princípios da sua formação numérica e métodos práticos de alguma qualidade ligada ao mesmo.

Quando você pode medir o que está faltando a respeito, você conhece algo sobre o assunto, mas se não pode medir, não consegue expressar em números, seu conhecimento é incompleto e insatisfatório, e você pouco avançou para o estágio da ciência onde o problema pode estar.”

Lord Kelvin (1883), Royal Society of London

RESUMO

A crescente modernização da agricultura intensificou o consumo de fontes de energia, principalmente aquelas não renováveis, e aumentou significativamente o consumo energético de sistemas agrícolas. Buscando encontrar soluções sustentáveis, diversos trabalhos utilizam análises energéticas como ferramentas para quantificar a demanda de uma determinada cultura. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi estudar o balanço energético do milho para silagem cultivado no Centro de Desenvolvimento e Transferência de Tecnologia da Universidade Federal de Lavras (CDTT-UFLA). A cultura foi irrigada por pivô central e o impacto do sistema de irrigação no balanço energético foi avaliado para 1ª e 2ª safra do ano agrícola de 2014/2015. As etapas de cultivo do milho foram acompanhadas e as entradas de energia foram contabilizadas através da definição dos respectivos coeficientes energéticos. Para o sistema de irrigação, em particular, duas fontes de energia foram consideradas: a energia elétrica e a energia indireta dos equipamentos de irrigação. Os resultados da análise energética mostraram que a cultura teve uma entrada total de energia de 45.643,85 MJ ha⁻¹ e 47.303,60 MJ ha⁻¹ para a 1ª e 2ª safra e uma predominância significativa de energia do tipo direta (cerca de 92% da matriz). A irrigação representou 14,76% e 21,37% da matriz energética do milho, mas permitiu que o sistema alcançasse altos níveis de produtividade, resultando em uma eficiência energética de 25,1 e 28,1 para a 1ª e 2ª safra.

Palavras-chave: Balanço energético. Milho. Silagem. Pivô central.

ABSTRACT

The lately innovation inside agriculture has intensified the use of energy sources, mainly non-renewable. As a consequence, the energy consumption of agricultural systems has significantly increased. Recent research pursuing sustainable solutions reveals that several approaches make use of the energy analysis as a tool to quantify the power demand of a given culture. Within this context, the objective of this study was to analyze the energy balance of maize silage grown at the Federal University of Lavras (CDTT-UFLA). The crop was irrigated by a center-pivot and the impact of the irrigation system on the energy balance was evaluated, considering the 1st and 2nd harvest of the agricultural calendar 2014/2015. All the maize cultivation steps were monitored, whereas energy inputs were counted through the definition of the respective energy coefficients. Considering the irrigation system, two energy sources were taken: the electric energy and the indirect energy from the irrigation equipment. The results of energy analysis showed that the crop had a total energy input of 45.643,85 MJ ha⁻¹ and 47.303,60 MJ ha⁻¹, considering the 1st and 2nd harvest. A significant prevail of the direct sort of energy (about 92% of the matrix) was also observed. The irrigation method represented 14.76% and 21.37 % of the maize energy matrix; nevertheless, it allowed the system to achieve high levels of productivity, resulting in an energy efficiency of 25.1 and 28.1 for the 1st and 2nd harvest, respectively.

Keywords: Energy balance. Maize. Silage. Center-pivot.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	–	Série Histórica da Produção de Milho no Brasil Safra de 2000/01 a 2015/16.....	16
Figura 2.2	–	Série Histórica da Produtividade do Milho no Brasil Safra de 2000/01 a 2015/16.....	17
Figura 2.3	–	Consumo de Energia pelo Setor Agropecuário.....	28
Figura 2.4	–	Consumo Anual de Energia Elétrica pelo Setor Agropecuário.....	31
Figura 3.1	–	Centro de Desenvolvimento e Transferência de Tecnologia – UFLA.....	46
Figura 3.2	–	Delimitação do Sistema Estudado - Plantio de Milho sob Pivô Central.....	47
Figura 3.3	–	Máquinas Utilizadas na Dessecação Pré-Semeadura.....	50
Figura 3.4	–	Preparação do Solo – Subsolagem.....	52
Figura 3.5	–	Máquinas e Implementos Utilizados na Semeadura e Adubação.....	52
Figura 3.6	–	Pivô Central Utilizado na Irrigação.....	54
Figura 3.7	–	Colheita Simultânea.....	56
Figura 3.8	–	Colheita do Milho para Silagem.....	56
Figura 3.9	–	Processo de Compactação da Silagem de Milho.....	58
Figura 3.10	–	Pontos de Coleta das Amostras de Silagem Utilizadas para Obtenção do seu Poder Calorífico.....	68
Figura 3.11	–	Equipamento Utilizado para Obtenção do Poder Calorífico da Silagem.....	68
Figura 4.1	–	Consumo de Energia Direta por Fonte para 1ª e 2ª Safra.	74
Figura 4.2	–	Consumo de Energia Indireta por Fonte.....	78
Figura 4.3	–	Consumo de Energia Indireta dos Equipamentos de Irrigação.....	79
Figura 4.4	–	Participação das Fontes de Energia em Cada Etapa da Cultura do Milho para Silagem - 1ª Safra.....	83
Figura 4.5	–	Participação das Fontes de Energia em Cada Etapa da Cultura do Milho para Silagem - 2ª Safra.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	–	Previsão de Produção Mundial de Milho (milhões de toneladas).....	15
Tabela 2.2	–	Classificação das Entradas de Energia por Carmo et al.(1988).....	21
Tabela 2.3	–	Classificação das Entradas de Energia por Comitre (1993).....	22
Tabela 2.4	–	Classificação das Entradas de Energia por Zanini et al. (2003).....	23
Tabela 2.5	–	Coefficientes Energéticos para o Trabalho Humano Adotados na Literatura.....	27
Tabela 2.6	–	Coefficientes Energéticos para o Óleo Diesel, Lubrificantes e Graxa, de acordo com o BEN 2016.....	29
Tabela 2.7	–	Coefficientes Energéticos para Fertilizantes Utilizados na Literatura.....	34
Tabela 2.8	–	Coefficientes Energéticos para herbicidas, inseticidas e fungicidas de acordo com Pimentel (1980).....	35
Tabela 2.9	–	Coefficientes Energéticos para alguns defensivos de acordo com Fluck e Baird (1982).....	36
Tabela 2.10	–	Principais Resultados para Balanço Energético da Cultura do Milho da Literatura.....	42
Tabela 3.1	–	Datas de Implantação de cada Etapa da Cultura do Milho.	59
Tabela 3.2	–	Coefficientes Energéticos Adotados para as Entradas de Energia Direta.....	63
Tabela 3.3	–	Vida Útil de Equipamentos de Acordo com a BRASIL (2010).....	66
Tabela 3.4	–	Coefficientes Energéticos Adotados para as Entradas de Energia Indireta.....	67
Tabela 4.1	–	Entradas de Energia na Cultura do Milho para Silagem.	71
Tabela 4.2	–	Vida Útil e Peso das Máquinas e Implementos.....	77
Tabela 4.3	–	Parâmetros Utilizados no Cálculo da Energia Indireta do Sistema de Irrigação.....	79
Tabela 4.4	–	Consumo de Energia por Etapa da Cultura para 1ª 2ª Safra.	81
Tabela 4.5	–	Obtenção da Energia de Saída da Silagem do Milho para 1ª e 2ª Safra.....	86
Tabela 4.6	–	Resultados Finais da Análise Energética da Cultura do Milho para Silagem.....	88

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1	A cultura do Milho.....	15
2.2	Produção de Milho para Silagem.....	18
2.3	Análise Energética de Sistemas Agrícolas.....	19
2.3.1	Classificação das Energias.....	20
2.3.2	Índices de Eficiência Energética.....	23
2.4	Matriz Energética.....	25
2.4.1	Entradas de Energia na Forma Direta.....	25
2.4.1.1	Trabalho Humano.....	26
2.4.2.2	Energia Elétrica.....	28
2.4.2.3	Fertilizantes Químicos.....	29
2.4.2.4	Defensivos Agrícolas.....	31
2.4.2.5	Entradas de Energia na Forma Indireta.....	34
2.4.2	Máquinas e Implementos.....	35
2.4.2.1	Equipamento de Irrigação.....	35
2.4.2.2	Análise Energética da Cultura do Milho.....	37
2.5	Influência dos Sistemas de Irrigação no Balanço Energético de Sistemas Agrícolas.....	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1	Aplicação de Herbicidas Pós-Semeadura.....	46
3.1.1	Adubação de Cobertura.....	47
3.2	Irrigação.....	48
3.2.1	Colheita.....	49
3.2.2	Compactação para Ensilagem.....	50
3.2.3	Período de Implantação de cada Etapa da Cultura.....	51
3.2.4	Análise Energética.....	53
3.2.5	Entrada de Energia Direta (E_D).....	53
3.2.6	Entrada de Energia Indireta (E_I).....	54
3.2.7	Saída de Energia (E_S).....	55
3.2.8	Balanço Energético e Eficiência Energética.....	57
3.3	Período de Implantação de cada Etapa da Cultura.....	58
3.4	Análise Energética.....	59
3.4.1	Entrada de Energia Direta (E_D).....	60
3.4.2	Entrada de Energia Indireta (E_I).....	64
3.4.3	Saída de Energia (E_S).....	67
3.4.4	Balanço Energético e Eficiência Energética.....	69
4	RESULTADOS.....	70
4.1	Entradas de Energia.....	70

4.2	Energia Direta.....	73
4.3	Energia Indireta.....	76
4.3.1	Máquinas e Implementos Agrícolas.....	76
4.3.2	Equipamentos de Irrigação.....	78
4.4	Demanda Energética por Etapa de Cultivo.....	80
4.5	Poder Calorífico e Energia de Saída.....	85
4.6	Balço Energético e Eficiência Energética.....	87
5	CONCLUSÕES.....	91
	REFERÊNCIAS.....	92
	APÊNDICES.....	100

1 INTRODUÇÃO

Desde 1950 o Brasil vem passando por um processo constante de modernização no setor agropecuário, principalmente após a implantação de um setor industrial voltado para a produção de equipamentos e insumos para a agricultura. A partir de então, foi possível observar um aumento significativo no uso de máquinas agrícolas, fertilizantes e defensivos. A inclusão dessas tecnologias nos sistemas agrícolas permitiu alcançar maior rentabilidade dos produtores e ampliar significativamente a escala produtiva (TEIXEIRA, 2005).

Por outro lado, a modernização na agricultura intensificou o uso de diferentes fontes de energia, principalmente aquelas não renováveis. Ao longo dos anos, essa crescente demanda energética, não só no setor agrícola, torna cada vez mais evidente os riscos de uma futura escassez energética (HOUSHYAR et al., 2012).

Por esse motivo, diversas pesquisas no Brasil e no mundo vêm estudando o consumo energético de diferentes culturas, visando reduzir desperdícios localizados e propor soluções mais sustentáveis. Esses trabalhos fazem uso de uma importante ferramenta capaz de avaliar a sustentabilidade de uma cultura: o balanço energético.

O balanço energético visa estabelecer a relação entre a demanda e a capacidade de uma cultura em produzir energia. Para tanto, é feito um levantamento dos insumos utilizados e seus valores são convertidos em unidades energéticas. A partir desses dados é possível estabelecer o ganho líquido de energia e a eficiência desta cultura, que é dada pela razão entre a energia produzida e a energia demandada (CAMPOS et al., 2004; SÁ et al., 2013).

Devido a importância da cultura do milho para a economia nacional, existe um grande interesse na avaliação do balanço energético do milho, tanto

para grãos quanto para silagem. Diversos são os trabalhos encontrados na literatura que avaliam o seu consumo energético (SANTOS; SIMON, 2010; RIQUETTI; BENEZ; SILVA, 2012; HOUSHYAR et al., 2012; MARTINS et al., 2015; CUNHA et al., 2015; FERRO et al., 2017), entre outros. Na maioria dos trabalhos, os autores apresentam uma análise quantitativa e qualitativa da capacidade de conversão energética da cultura e avaliam o impacto de uma determinada fonte ou tipo de manejo no balanço energético da produção de milho.

Em geral, as fontes energéticas que apresentam maior consumo são os fertilizantes químicos e o óleo diesel, ambas altamente dependentes de energia de origem fóssil. Entretanto, em culturas irrigadas é importante avaliar o impacto da demanda energética dos sistemas de irrigação, principalmente em termos de energia elétrica.

O principal objetivo deste trabalho é estudar o balanço energético de uma cultura de milho para silagem irrigada por pivô central. A cultura foi implantada no Centro de Desenvolvimento e Transferência de Tecnologia da Universidade Federal de Lavras (CDTT-UFLA) e a análise energética foi feita para o ano agrícola de 2014/2015. Para tanto, contabilizaram-se as entradas energéticas para cada etapa de cultivo da 1^a e 2^a Safra dos 11 hectares de milho sob pivô central, visando determinar a eficiência energética da cultura em questão.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A cultura do Milho

A cultura do milho ocupa posição de destaque entre as atividades agropecuárias do Brasil, por ser a mais frequente nas propriedades rurais e por seu valor de produção, superado apenas pelo da soja. O milho é uma importante fonte de renda para os agricultores e é um insumo essencial para os criadores de aves, suínos, bovinos e outros animais, pois compõe parcela majoritária das rações (CRUZ et al., 2011).

O Brasil é o terceiro maior produtor de milho do mundo, perdendo apenas para a China e para os Estados Unidos, que é o maior produtor mundial do cereal. De acordo com o Brasil (2017b), a produção estimada de milho no Brasil para a safra 2016/2017 é de 83,5 milhões de toneladas, que representa um crescimento de cerca de 37% com relação à safra do ano anterior, como mostra a Tabela 2.1 (BRASIL, 2017b).

Tabela 2.1 – Previsão de Produção Mundial de Milho (milhões de toneladas).

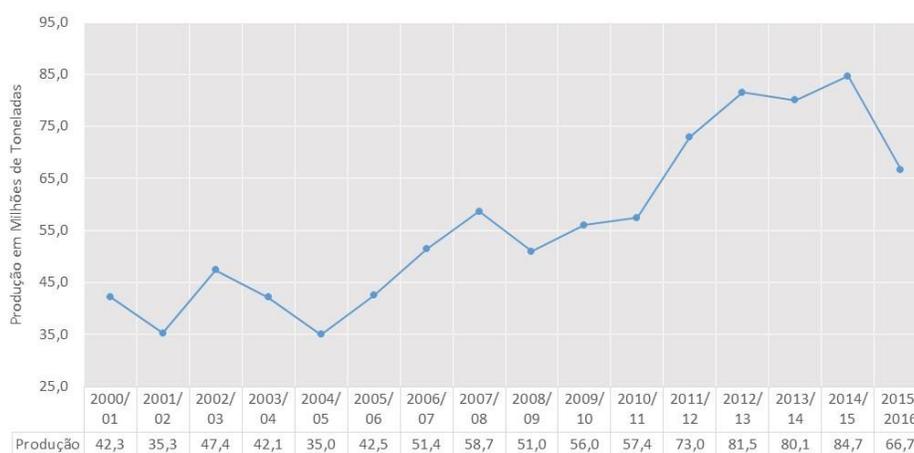
Países	Safra 15/16	Safra 16/17	Var. (%)
1º EUA	345,5	384,8	11,4%
2º China	224,6	219,6	-2,3%
3º Brasil	67,0	83,5	36,6%
Mundo	961,9	1.049,2	9,1%

Fonte: Brasil (2017b).

Nos últimos 15 anos, o Brasil, partindo de uma produção de milho de cerca de 42 milhões de toneladas, com uma produtividade média de

$3.260 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (≈ 13 milhões de hectares plantados), atingiu uma produção de mais de 84 milhões de toneladas, com uma produtividade de $5.396 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (≈ 16 milhões de hectares plantados), como pode ser visto nas Figuras 2.1 e 2.2 (BRASIL, 2017c).

Figura 2.1 – Série Histórica da Produção de Milho no Brasil Safra de 2000/01 a 2015/16.



Fonte: Brasil (2017c).

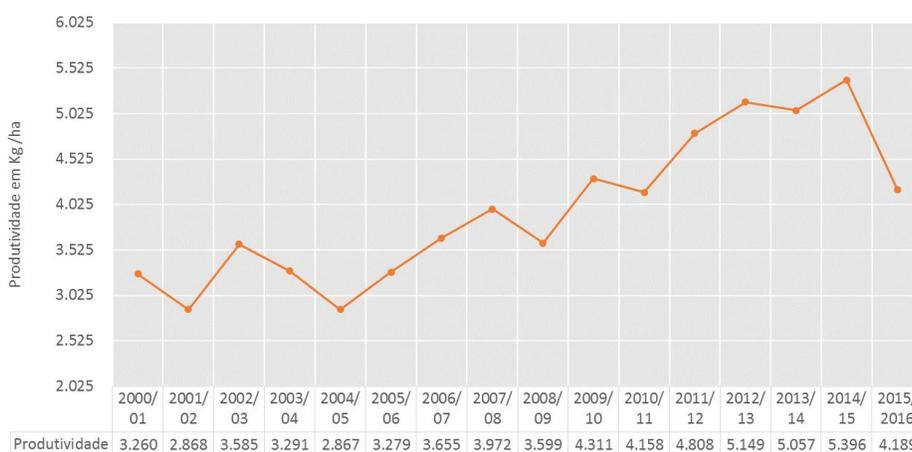
Pode-se observar, pelas Figuras 2.1 e 2.2, que a cultura do milho da safra 2015/2016 apresentou uma queda significativa de produção e produtividade de aproximadamente 21% em relação à safra do ano anterior. Entretanto, Brasil (2017c) estima uma recuperação e um novo crescimento para a safra de 2016/2017 voltando a atingir o patamar dos 83 milhões de toneladas.

De modo geral, nos últimos anos o Brasil presenciou um aumento significativo na produtividade que se deve, principalmente, ao crescimento da qualidade tecnológica da cultura do milho. Esses ganhos são resultado da evolução da condução e colheita, por meio de mudanças em práticas de manejo

e uso de máquinas e equipamentos mais eficientes e de maior precisão (PEIXOTO, 2014).

Outro fator que colaborou para o aumento da produtividade é a divisão da produção do milho em duas épocas de plantio: a safra de verão (primeira safra) e a safrinha ou segunda safra. A primeira safra é realizada tradicionalmente no período chuvoso, que varia entre final de agosto e novembro dependendo da região do país. A segunda safra é aquela plantada de janeiro a abril e geralmente é irrigada, já a safrinha é cultivada em condições de sequeiro (CRUZ et al., 2011).

Figura 2.2 – Série Histórica da Produtividade do Milho no Brasil Safra de 2000/01 a 2015/16.



Fonte: BRASIL (2017c).

A irrigação do milho não é comum para produção de grãos no Brasil. Mas, além de permitir o cultivo em épocas não tradicionais, a irrigação proporciona maiores produtividades, agregando valor ao produto. Segundo a Embrapa, a irrigação por aspersão utilizando pivô central tem sido a mais utilizada (CRUZ et al., 2011).

Tendo em vista a importância da cultura do milho na agropecuária brasileira, e o crescente aumento do uso máquinas e equipamentos agrícolas, sistemas de irrigação, defensivos e fertilizantes químicos, torna-se essencial avaliar continuamente o balanço energético desta cultura.

2.2 Produção de Milho para Silagem

A silagem é um dos principais componentes utilizados para garantir a alimentação de ruminantes nos períodos secos do ano quando as pastagens não estão disponíveis (PEREIRA, 2013; BERNARDES, 2012).

A ensilagem, por sua vez, é um processo de conservação de forragem através da fermentação em ambiente anaeróbio. A forragem, após a colheita, passa a ser substrato para desenvolvimento de diversos microrganismos que podem degradar nutrientes que seriam utilizados pelos animais. O processo de ensilagem diminui esse desenvolvimento microbiano conservando a máxima quantidade de matéria seca, nutrientes e energia da cultura para posterior alimentação dos animais (CARVALHO, 2013).

Diversas forrageiras podem ser utilizadas para silagem, tais como: milho, sorgo, aveia, entre outras. No Brasil, a silagem de milho é uma das principais forragens utilizadas na alimentação ruminantes. De acordo com Bernardes (2012), em um levantamento do uso de silagens em fazendas leiteiras no Brasil, mais de 50% dos produtores utilizam o milho para a sua produção.

De acordo com Miranda et al. (2002), vários fatores justificam o uso do milho para a produção de silagem. Dentre eles, a facilidade de cultivo, alto rendimento de matéria seca por hectare, a produção de um volumoso com alto teor de energia e fibra, o alto consumo pelos animais, a facilidade de fermentação, entre outros. A silagem de milho tem o objetivo de fornecer fibra de qualidade e energia aos animais. É caracterizada por ser um alimento com

baixo teor de proteína, alto teor energético e boa qualidade nutricional (MIRANDA; RESENDE; VALENTE, 2002).

Buscando aumentar a produtividade, as culturas de milho para silagem vêm sendo cada vez mais mecanizadas. Entretanto, o alto consumo de combustíveis derivados do petróleo e fertilizantes pode elevar os custos de produção (CAMPOS et al., 2004). Apesar disso, vários autores reforçam a importância dessa forrageira na alimentação animal, devido a sua alta produção de matéria seca e qualidade nutricional, e destacam que o seu uso possibilita a exploração de pecuárias intensivas com alta produtividade animal (CARVALHO, 2013; CAMPOS et al., 2004; RAMOS et al., 2014).

2.3 Análise Energética de Sistemas Agrícolas

Na agricultura primitiva as culturas agrícolas tinham como principal fonte de energia a radiação solar e a energia humana e animal (mão de obra). Já na agricultura moderna, outras fontes energéticas foram incorporadas às práticas agrícolas visando alcançar melhores níveis de produtividade (REHMAN, 2004). Essas fontes de energia incluem o uso de máquinas agrícolas (tratores, irrigação e colhedoras), de insumos químicos e fertilizantes (adubos e pesticidas).

Apesar de a modernização da agricultura ter gerado grandes avanços e crescentes níveis de produtividade, a intensificação do uso de outras fontes de energia, principalmente as não renováveis, aumentam significativamente o consumo energético de um agroecossistema (COMITRE, 1995).

Buscando avaliar a eficiência de um sistema agrícola, ao longo dos últimos 50 anos diversas pesquisas têm analisado agroecossistemas não somente em termos de produtividade, mas também em termos energéticos.

Hart et al. (1980) afirmaram que as análises energéticas de um sistema agrícola objetivam avaliar as relações dos componentes do sistema com o

processo de “tomar” entradas e “produzir” saídas. Os autores ressaltaram que este tipo de análise é de grande utilidade, pois pode indicar o potencial de um produto como fonte energética.

Em complemento, Melo (1986) afirmou que a análise energética permite além de estimar a energia investida na obtenção de um produto, compreender os fluxos de energia, identificar os pontos de desperdício e componentes que podem ser substituídos por outros de maior eficiência. O autor destacou a necessidade de interferir no fluxo de energia para aprimorá-lo.

De acordo com Campos (2001) o principal objetivo do balanço energético é:

"(...) traduzir em unidades ou equivalentes energéticos os fatores de produção e os consumos intermediários, possibilitando a construção de indicadores comparáveis entre si, que permitam a intervenção no sistema produtivo visando melhorar sua eficiência."

Considerando a importância crescente que os sistemas agrícolas têm no cenário nacional, particularmente a cultura do milho, é importante avaliar a eficiência energética e econômica como mais um indicativo da sustentabilidade ambiental (VELOSO, 2014).

2.3.1 Classificação das Energias

Para efetuar a análise energética de um sistema agrícola, inicialmente é preciso classificar as fontes de entrada de energia incluídas nesse sistema. Diversos autores propõem classificações para as entradas de energia de um sistema buscando agrupar as diferentes fontes de acordo com um critério preestabelecido.

Uma classificação clássica das entradas de energia, proposta pela FAO (1976), divide os recursos energéticos em renováveis e não renováveis. As

fontes de energia renováveis são aquelas originárias do processo fotossintético, energia solar, hídrica, eólica, das marés e geotérmica. Já os recursos energéticos não renováveis compreendem os combustíveis fósseis (carvão mineral, petróleo e gás natural) e os combustíveis nucleares (COMITRE, 1995).

Carmo et al. (1988) classificaram as entradas de energia como: Biológica, Fóssil e Industrial, como mostrado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Classificação das Entradas de Energia por Carmo et al.(1988).

Biológica	Energia humana e animal, resíduos de animais e da agroindústria, sementes e mudas, alimentos para animais, adubação verde e cobertura morta.
Fóssil	Produtos e subprodutos do petróleo, tidos como fontes de energia primária, incluindo adubos químicos e defensivos.
Industrial	Máquinas e equipamentos agrícolas à tração mecânica e animal e à energia elétrica.

Fonte: Do autor.

Já Ulbanere (1988), citado por Bueno (2002), dividiu as entradas de energia como diretas e indiretas. O autor considerou como entradas de energia direta aquelas relacionadas aos combustíveis e lubrificantes e como energia indireta as máquinas e implementos, sementes, corretivos, fertilizantes e defensivos.

Por outro lado, Comitre (1993) propôs uma divisão semelhante às duas anteriores. Essa classificação considera duas grandes matrizes de energia: a energia direta e indireta, para posteriormente classificar a origem da energia direta em três grupos (Biológica, Fóssil e Elétrica) e a origem da energia indireta em um grupo (Industrial), como mostrado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Classificação das Entradas de Energia por Comitre (1993).

Classificação	Origem	Fonte de Energia
Energia Direta	Biológica	Energia do trabalho humano e animal; Energia contida nas sementes.
	Fóssil	Óleo diesel; Lubrificantes e Graxas.
	Elétrica	Eletricidade.
Energia Indireta	Industrial	Máquinas e implementos; Calcário; Fertilizantes químicos; Herbicidas e Agrotóxicos.

Fonte: Do autor.

Para elaborar esta classificação, Comitre (1993) considerou como energia direta as fontes energéticas que são aplicadas no sistema agrícola na forma em que se encontram na natureza. Já a energia indireta é aquela que utiliza outras fontes energéticas (trabalho humano, matéria-prima, combustível, transporte, etc.) para atingir a forma de entrada em um sistema agrícola. Essa classificação das entradas de energia foi seguida por diversos autores, como: (BUENO, 2002; CAMPOS et al., 2009; JASPER et al., 2010; SANTOS; SIMON, 2010; FRIGO et al., 2011).

De modo geral, a maioria dos autores que trabalham com balanço energético de sistemas agrícolas classifica a energia consumida no processo produtivo como direta e indireta. Zanini et al. (2003), ao analisarem o consumo de energia na produção de silagem de milho em plantio direto, consideraram que a energia direta de origem fóssil também engloba os produtos e subprodutos do petróleo, tidos como fontes de energia primária, incluindo adubos químicos e defensivos. Desta forma, os autores dividem as fontes de entrada energia de acordo com a Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Classificação das Entradas de Energia por Zanini et al. (2003).

Classificação	Fonte de Energia
Energia Direta	- Energia dos combustíveis fósseis e derivadas do petróleo, tais como: aquelas contidas nos lubrificantes, nos adubos e nos defensivos agrícolas. - Energia do trabalho humano e animal e aquela contida nas sementes e mudas. Energia Elétrica.
Energia Indireta	Energia empregada na fabricação de maquinários, de construções e de instalações, de sistema de irrigação e de outras entradas necessárias à produção.

Fonte: Do autor.

A partir de então, diversos autores passaram a seguir esta classificação de energia, como: (ANGONESE et al., 2006; MELO et al., 2007; BIAGGIONI; BOVOLENTA, 2010; SOUZA et al., 2009; SANTOS; JÚNIOR, 2004; VELOSO, 2014; CUNHA et al., 2015; MARTINS et al., 2015), entre outros. Alguns desses autores continuam separando as entradas de energia de acordo com a sua origem (fóssil, biológica e industrial), outros apenas as classificam com direta e indireta.

Devido a sua alta aplicabilidade, as análises apresentadas neste trabalho irão classificar as entradas de energia como direta e indireta (TABELA 2.4), da mesma forma que Zanini et al. (2003) e diversos outros autores.

2.3.2 Índices de Eficiência Energética

Os índices de eficiência energética são utilizados com o objetivo de avaliar, mensurar e comparar a relação entre as entradas e saídas energéticas de sistemas de produção agrícolas.

De acordo com Melo (1986), quando se deseja avaliar a relação entre as saídas úteis do sistema, em unidades energéticas, e os insumos culturais, também em unidades energéticas, utiliza-se um índice denominado eficiência cultural. Por outro lado, para relacionar a quantidade de produto (*kg*) com a energia total que entra no sistema utiliza-se a produtividade cultural. Esses índices são dados por:

$$\text{Eficiência Cultural} = \frac{\text{Saídas Úteis}}{\text{Entradas Culturais}} \quad (2.1)$$

$$\text{Produtividade Cultural} = \frac{\text{Quantidade de Produto}}{\text{Entradas Culturais}} \quad (2.2)$$

O autor define mais dois índices: a eficiência ecológica e a produtividade ecológica. Esses índices levam em consideração a radiação solar como entrada energética; entretanto, Bueno (2000) citado por Campos (2001) demonstrou a inconsistência em utilizar a radiação global como entrada em análises energéticas.

Atualmente, a maioria dos autores também opta por não utilizar a radiação solar, por considerarem a energia solar como fonte gratuita de energia e com custo de oportunidade zero. Segundo Comitê (1993), a não utilização da radiação solar não implica em maiores restrições ao método.

Do ponto de vista de sustentabilidade de sistemas agrícolas, Risoud (2000) citado por Almeida (2007) utiliza índices que levam em consideração o uso de energias no sistema. Esses índices são denominados balanço energético e eficiência energética, e são dados por:

$$\text{Balanço Energético} = \sum E_{saída} - \sum E_{entrada} \quad (2.3)$$

$$\text{Eficiência Energética } (\eta) = \frac{\sum E_{saída}}{\sum E_{entrada}} \quad (2.4)$$

A energia de saída ($E_{saída}$) é o total energético de saída dos produtos úteis e a energia consumida ($E_{entrada}$) é uma estimativa da energia consumida por cada entrada do sistema. A grande maioria dos autores utiliza esses índices para avaliar o balanço e a eficiência energética de determinada cultura.

Para realizar uma análise energética baseada nos índices citados anteriormente, todos os insumos utilizados e produzidos são quantificados em unidades energéticas, usualmente, em joules (J) ou calorias (cal). O balanço e a eficiência energética são ferramentas importantes para o monitoramento da utilização de energias não renováveis em sistemas agrícolas (CAMPOS; CAMPOS, 2004).

2.4 Matriz Energética

A definição das entradas e saídas de energia utilizadas no sistema agrícola define os fluxos de energia e a matriz energética de uma determinada cultura. A descrição de cada um dos componentes envolvidos é de extrema importância na análise desses sistemas e será apresentada a seguir.

2.4.1 Entradas de Energia na Forma Direta

2.4.1.1 Trabalho Humano

Os coeficientes energéticos adotados na literatura para contabilização do trabalho humano em termos calóricos apresentam divergências muito grandes. De fato, o dispêndio energético com mão de obra pode variar muito de acordo com o posto de trabalho, a localidade e até mesmo entre os próprios trabalhadores.

De acordo com Bueno (2002) essas divergências acontecem pela aplicação de diferentes metodologias para a quantificação da energia gasta com mão de obra. O autor explica que os menores valores dos coeficientes energéticos são utilizados por aqueles autores que relacionam esse gasto apenas à fase de trabalho. Entretanto, outros autores que incluem atividades extra laborais, ou que consideram o Gasto Energético em Repouso – (GER), utilizam valores superiores para esse coeficiente.

O GER é uma metodologia proposta por Carvalho et al. (1974) que leva em consideração a massa, a altura, a idade e gênero do trabalhador. Diversos autores consideram a GER para obtenção do gasto energético com mão de obra como, por exemplo: Bueno, 2002; Frigo et al., 2011; Almeida, 2007; Jasper et al., 2010, entre outros.

Outros autores, como Ulbanere (1988) e Beber (1989) ambos citados por Campos (2001), optaram por não incluir o trabalho humano em seus estudos, já que os gastos energéticos com mão de obra são muito pequenos se comparados à energia fóssil consumida nas atividades agrícolas altamente mecanizadas.

Melo (1986) ponderou a importância da inclusão do trabalho humano na produção agrícola catarinense e utiliza um índice de 500 kcal/hora ($2,1 \text{ MJ } h^{-1}$). De acordo com o autor, esse coeficiente incorpora atividades extra laborais sem ser muito abrangente.

Comitre (1993) adotou o valor de 292,5 kcal/hora ($1,22 \text{ MJ h}^{-1}$) em seu trabalho sobre o balanço energético da soja na região de Ribeirão Preto-SP. Alguns autores também adotam esse coeficiente em seus trabalhos, como é o caso de (SALLA, 2008) e (MARTINS et al., 2015).

A Tabela 2.5 apresenta a variação dos valores utilizados por diversos autores para a contabilização do dispêndio energético com o trabalho humano. Embora os valores dos coeficientes variem muito, é importante ressaltar que em culturas altamente mecanizadas a participação da mão de obra na matriz energética representa uma parcela ínfima dos dispêndios energéticos totais. Na maioria dos trabalhos referenciados na Tabela 2.5 a participação do trabalho humano na matriz energética não ultrapassou 3%.

Entretanto, em culturas que ainda são muito dependentes da mão de obra braçal, grande parte dos trabalhos utiliza o GER para esta contabilização.

Tabela 2.5 – Coeficientes Energéticos para o Trabalho Humano Adotados na Literatura.

Coeficiente Energético (MJ h^{-1})	REFERÊNCIAS
GER	(BUENO, 2002), (ALMEIDA, 2007), (JASPER et al., 2010), (SANTOS; SIMON, 2010), (FRIGO et al., 2011)
4,39	(ANGONESE et al., 2006), (SOUZA et al., 2009), (MEDEIROS, 2010)
2,2	(SERRA et al., 1979), (ROMANELLI, 2002), (ASSENHEIMER; CAMPOS; JÚNIOR, 2009), (CAMPOS et al., 2009), (RIQUETTI; BENEZ; SILVA, 2012), (DIOTTO, 2013), (MARTINS et al., 2015)
2,16	(MELO et al., 2007), (JORDAN et al., 2012), (QUEIRÓZ, 2014)
1,257	(SOUZA et al., 2008), (CARMO et al., 2016)
1,22	(COMITRE, 1993), (MARTINS et al., 2015), (SALLA, 2008)
0,39	(CAMPOS et al., 2004), (BIAGGIONI; BOVOLENTA, 2010), (MATIOLLI, 2016)

Fonte: Do autor.

2.4.1.2 Combustível, Óleo Lubrificante e Graxa

A participação dos combustíveis de origem fóssil na matriz energética de sistemas agropecuários é muito relevante. O Balanço Energético Nacional (BEN) de 2016, feito pela Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE), mostra que no ano base de 2015 o consumo de óleo diesel, por exemplo, representou cerca de 55% do consumo energético desse setor.

A Figura 2.3 mostra as principais fontes de consumo energético do setor agropecuário no ano base de 2015 (BRASIL, 2016). Depois do óleo diesel, a lenha e a eletricidade são os dois maiores consumos energéticos deste setor.

Figura 2.3 – Consumo de Energia pelo Setor Agropecuário.



Fonte: BRASIL (2016).

De acordo com Bueno (2002), a maioria dos trabalhos de análise energética nacionais utiliza os coeficientes energéticos publicados no BEN para quantificar os valores calóricos com combustíveis de origem fóssil (óleo diesel, lubrificante e graxa). Esses valores são atualizados a cada ano e os coeficientes energéticos presentes no BEN de 2016, são apresentados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Coeficientes Energéticos para o Óleo Diesel, Lubrificantes e Graxa, de acordo com o BEN 2016.

	Coeficiente Energético MJ L⁻¹ (MJ kg⁻¹)
Óleo Diesel	35,5
Lubrificantes	36,43
Graxas ¹	33,5 (38,77)

¹ O valor do coeficiente energético da graxa foi retirado da Tabela VIII.7 do BEN 2016. A graxa foi classificada como outros não-energéticos de petróleo de acordo com a página 206. A conversão de m³ para Kg foi feita utilizando a densidade de 864 Kg m⁻³.

Fonte: Do autor.

Sobre a crescente mecanização no setor agrícola, Comitê (1995) pondera que embora a modernização da agricultura tenha gerado avanços significativos no setor, ela tem levado o consumo energético a um padrão muito elevado.

Esta afirmativa é confirmada pelos dados de consumo de insumos derivados do petróleo apresentados no BEN 2016. De acordo com BRASIL (2016) o setor foi responsável pelo consumo de 13% do óleo diesel utilizado no Brasil em 2015, o que representou um aumento de aproximadamente 22% nos últimos 10 anos.

Esses dados ressaltam a importância em se realizar o balanço energético em sistemas agropecuários, visando encontrar e propor soluções para a diminuição do consumo de energia pelo setor.

2.4.1.3 Energia Elétrica

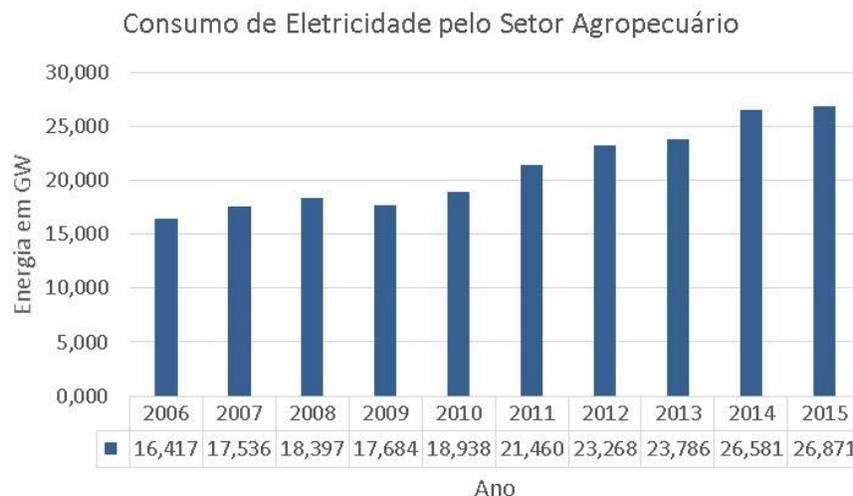
A energia elétrica desempenha um papel muito importante no setor agropecuário. Moraes et al. (2011) afirmam que o uso da energia elétrica é fundamental na modernização dos processos produtivos agropecuários. Os

autores reforçam a importância da eletricidade na agricultura para aumentar a produtividade e atender às necessidades do mercado (MORAES et al., 2011). Opinião compartilhada por Albuquerque et al. (2010), os quais ressaltam que a energia elétrica e a água são insumos necessários ao aumento da produtividade das culturas, principalmente em sistemas de irrigação.

De acordo com o último BEN, o consumo de eletricidade no setor agropecuário vem crescendo significativamente, como mostra a Figura 2.4. De 2006 até 2015 o consumo de energia elétrica aumentou cerca de 63%. Além disso, o setor agropecuário foi responsável por 4,4% do consumo de eletricidade no Brasil em 2015 (BRASIL, 2016).

Da mesma forma que o óleo diesel, a eletricidade representa uma parcela importante do consumo de energético do setor agropecuário (FIGURA 2.3). Embora 75,5% da matriz de geração de energia elétrica brasileira seja a partir de fontes renováveis, a busca pela eficiência energética continua sendo muito discutida na literatura (ALBUQUERQUE et al., 2010; MORAES et al., 2011; GRANDO, 2013). Desta forma, a inclusão da eletricidade nos balanços de energia dos sistemas agropecuários representa mais uma variável de entrada que pode ser otimizada. O coeficiente adotado pela maioria dos autores para converter a energia elétrica consumida de kWh para MJ é de 3,6 (BRASIL, 2016).

Figura 2.4 – Consumo Anual de Energia Elétrica pelo Setor Agropecuário.



Fonte: BRASIL (2016).

2.4.1.4 Fertilizantes Químicos

O uso de fertilizantes químicos tem um impacto significativo no balanço energético e influencia diretamente na sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Em geral, os fertilizantes químicos mais utilizados são à base de NPK: nitrogênio (N), fósforo (P_2O_5) e potássio (K_2O).

De acordo com Brasil (2017a), o consumo de fertilizantes químicos no Brasil praticamente dobrou nos últimos 15 anos, aumentando de 7.483 toneladas no ano de 2000 para 13.690 toneladas em 2015 (BRASIL, 2017a). Fato este que evidencia o aumento no consumo de energia fóssil nas matrizes energéticas, tornando se indispensável a busca por alternativas sustentáveis e de baixo custo.

Para incluir os fertilizantes químicos na matriz energética, os índices utilizados na literatura variam entre os autores. Alguns trabalhos adotam os coeficientes definidos por Pimentel (1980) de $58,28 \text{ MJ Kg}^{-1}$ para o nitrogênio

(N), 12,57 MJ Kg⁻¹ para o fósforo (P₂O₅) e 6,7 MJ Kg⁻¹ para o potássio (K₂O), como (MELO et al., 2007; JORDAN et al., 2012; QUEIRÓZ, 2014).

Outros autores adotam os coeficientes definidos por Pellizzi (1992), que são na faixa de 73-75 MJ Kg⁻¹ para o nitrogênio (N), 13-14 MJ Kg⁻¹ para o fósforo (P₂O₅) e 9-10 MJ Kg⁻¹ para o potássio (K₂O), como: (CAMPOS et al., 2004; ANGONESE et al., 2006; FRIGO et al., 2011; VEIGA et al., 2015).

Romanelli e Milan (2005), em seu trabalho sobre balanço energético de forragens, apresentam uma tabela com os principais índices para os fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos. Os coeficientes apresentados para N, P₂O₅ e K₂O foram de 74 MJ Kg⁻¹ (PELLIZZI, 1992), 12,56 MJ Kg⁻¹ (JÚNIOR, 1999) e 6,7 MJ Kg⁻¹ (JÚNIOR, 1999), respectivamente. Outros autores também adotam estes índices, como: (ROMANELLI; NARDI; SAAD, 2012; DIOTTO, 2013; MARTINS et al., 2015; SANTOS, 2016).

Já Bueno (2002) utiliza os índices energéticos de 62,47 MJ Kg⁻¹ para o nitrogênio (N), 9,62 MJ Kg⁻¹ para o fósforo (P₂O₅) e 9,2 MJ Kg⁻¹ para o potássio (K₂O), definidos por (JÚNIOR; SCOLOWSKI; FANTI, 1984), (LOCKERETZ, 1980) e (PELLIZZI, 1992), respectivamente. O autor ressalta que a escolha do coeficiente utilizado para fertilizantes nitrogenados se deve ao fato de ser um valor detalhado e com cálculos realizados para o Brasil. Esses mesmos coeficientes também foram adotados por: (ALMEIDA, 2007; JASPER et al., 2010; MEDEIROS, 2010).

Uma visão geral da indústria de fertilizantes nitrogenados é apresentada por Felipe Júnior et al. (1984). Os autores avaliam o perfil do consumo energético de fertilizantes nitrogenados, resultando nos dispêndios de 50,84 MJ kg⁻¹ (12,15 kcal · ton⁻¹) para a produção da amônia e 62,47 MJ kg⁻¹ (14,93 x 10⁶ kcal ton⁻¹) para a produção da ureia.

Um estudo semelhante foi feito recentemente por Mendes Júnior e Bueno (2015) em um trabalho sobre a participação de energias fósseis no processo de produção dos fertilizantes nitrogenados com ênfase na produção da ureia. Os autores concluíram que as análises energéticas podem estar subestimando a participação de energias fósseis em sua matriz (JUNIOR; BUENO, 2015).

A Tabela 2.7 resume os principais coeficientes energéticos para os fertilizantes a base de NPK adotados na literatura. A partir desta tabela é possível observar que os coeficientes energéticos adotados pelos autores variam significativamente. Por isso, é importante certa cautela na escolha dos coeficientes utilizados, de forma a melhor representar o consumo de energia do sistema estudado. Cabe ainda salientar a necessidade de padronização e atualização desses coeficientes energéticos para que seja possível representar com fidelidade sua participação nas matrizes energéticas de sistemas agrícolas e permitir comparações entre autores de forma mais efetiva.

Tabela 2.7 – Coeficientes Energéticos para Fertilizantes Utilizados na Literatura.

N	kg^{-1}		Referências
	P2O5	K2O	
50,28	12,57	6,7	(MELO et al., 2007), (JORDAN et al., 2012), (QUEIRÓZ, 2014)
62,47	9,62	9,2	(BUENO, 2002), (ALMEIDA, 2007), (JASPER et al., 2010), (MEDEIROS, 2010)
63,79	13,94	9,7	(MACEDÔNIO; PICCHIONI, 1985), (ZANINI et al., 2003), (ASSENHEIMER; CAMPOS; JÚNIOR, 2009)
73	13	9	(PELLIZZI, 1992), (CAMPOS et al., 2004), (ANGONESE et al., 2006), (FRIGO et al., 2011)
74	12,56	6,7	(ROMANELLI; MILAN, 2005), (ROMANELLI; NARDI; SAAD, 2012), (DIOTTO, 2013), (CUNHA et al., 2015), (MARTINS et al., 2015), (VEIGA et al., 2015)

Fonte: Do autor.

2.4.1.5 Defensivos Agrícolas

Os defensivos agrícolas são os componentes de maior densidade dentro da matriz energética, pois requerem uma grande quantidade de energia para a sua produção. Entretanto, quando empregados em pequenas quantidades não representam uma parcela muito grande da energia total consumida por um sistema agrícola (MELO, 1989).

Grande parte dos trabalhos de balanço energético de sistemas agrícolas adotam os coeficientes para herbicidas, inseticidas e fungicidas propostos por Pimentel (1980), mostrados na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Coeficientes Energéticos para herbicidas, inseticidas e fungicidas de acordo com Pimentel (1980).

Pesticida	Coeficiente Energético MJ kg⁻¹
Herbicida	254,57
Inseticida	184,71
Fungicida	97,13

Fonte: Do autor.

Os coeficientes energéticos utilizados para algumas formulações de defensivos propostos por Fluck e Baird (1982) são apresentados por Romanelli e Milan (2005), como mostrado na Tabela 2.9.

2.4.2 Entradas de Energia na Forma Indireta

2.4.2.1 Máquinas e Implementos

As máquinas agrícolas representam um grande avanço no histórico da agricultura. O uso de motores de combustão interna com grande capacidade de realizar trabalho permitiu aumentar significativamente a capacidade produtiva de um sistema (MELO, 1989).

Entretanto, o seu uso influencia diretamente no consumo energético de sistemas agrícolas. Nos trabalhos de balanço e eficiência energética, além do combustível (óleo diesel) e de outros derivados do petróleo (lubrificantes e graxa) é preciso levar em consideração também a energia gasta para produzir as máquinas e implementos agrícolas.

Tabela 2.9 – Coeficientes Energéticos para alguns defensivos de acordo com Fluck e Baird (1982).

Defensivo	Coeficiente Energético MJ kg⁻¹
Diuron	274,62
Atrazina	188,38
Trifluralina	150,97
Paraquat	459,60
2.4 - D	87,04
2.4.5 - T	135,06
Dicamba	295,13
Glifosate	454,20
Diquat	400,18
Captan	115,05
Carbofuran	454,20

Fonte: Do autor.

A metodologia empregada pela maioria dos autores para incluir o maquinário nos balanços energéticos é a depreciação energética proposta por Doering (1980), citado por Campos (2001). O autor divide a energia consumida pelas máquinas (sem os combustíveis) em: energia relativa à matéria-prima (aço, pneus, alumínio, etc.), energia relativa à manufatura (materiais e fabricação) e energia relativa à manutenção.

A energia contida nos materiais e de manufatura é ajustada à vida útil e à massa do equipamento e acrescidas da energia de manutenção, e então é depreciada linearmente sobre a vida útil do equipamento (MELO, 1989).

Com relação aos coeficientes energéticos, Campos (2001) adota os índices propostos por Macedônio e Picchioni (1985) de 69,83 MJ kg⁻¹ para equipamentos autopropulsionados e 57,20 MJ kg⁻¹ para outros equipamentos.

Esses índices também foram utilizados por outros autores como: (MACEDÔNIO; PICCHIONI, 1985; ZANINI et al., 2003; ROMANELLI; MILAN, 2005; JORDAN et al., 2012; RIQUETTI; BENEZ; SILVA, 2012; GOMES et al., 2013; MARTINS et al., 2015; CUNHA et al., 2015).

Além da metodologia de depreciação energética, Comitre (1993) também adota os coeficientes propostos por Doering (1980). Para computar a energia gasta na fabricação dos tratores e colhedoras são utilizados os coeficientes de $14,61 \text{ MJ kg}^{-1}$ ($3493 \text{ Mcal ton}^{-1}$) para os tratores, 13 MJ kg^{-1} ($3108 \text{ Mcal ton}^{-1}$) para as colhedoras e $85,77 \text{ MJ kg}^{-1}$ ($20,5 \text{ Mcal kg}^{-1}$) para os pneus. A autora também computou 5% sobre o valor energético a título de reparos e 12% a título de manutenção.

Bueno (2002) compartilha da metodologia utilizada por Comitre (1993), entretanto substitui o percentual de 12% de manutenção por valores referentes aos gastos reais de óleos lubrificantes e graxas, sempre que possível. Outros autores, que também adotaram esses coeficientes e metodologia, foram: (JASPER et al., 2010; MEDEIROS, 2010; FRIGO et al., 2011; TURCO, 2016).

Sob outro ponto de vista, Diotto (2013) afirma que para máquinas e implementos é possível utilizar um único coeficiente energético em função da massa total depreciada ao longo de sua vida útil. Esse índice representa a média de avaliações já feitas para diferentes máquinas e implementos agrícolas. Desta forma, o autor utiliza um único coeficiente energético de $68,86 \text{ MJkg}^{-1}$, proposto por (ULBANERE, 1988). Outros autores que também adotaram esse coeficiente energético são: (ROMANELLI; NARDI; SAAD, 2012; VEIGA et al., 2015; SANTOS, 2016).

2.4.2.2 Equipamento de Irrigação

O sistema de irrigação é responsável por duas entradas distintas no balanço energético, uma é a energia direta consumida para a pressurização do sistema (energia elétrica) e a outra é a energia incorporada pelo próprio equipamento (DIOTTO, 2013).

Tsatsarelis (1993), em um trabalho sobre o balanço energético do trigo em condições de irrigação e sequeiro, contabilizou o consumo energético dos equipamentos utilizando os coeficientes energéticos de $92 \text{ KJ } h^{-1}m^{-1}$ do sistema de irrigação e $2,40 \text{ MJ } h^{-1}$ para o sistema de bombeamento. Esses índices propostos por Pimentel (1980) são os mais utilizados na literatura para contabilizar a energia indireta de sistemas de irrigação. Os seguintes autores utilizam esses coeficientes energéticos: (CAMPOS et al., 2004; FRIGO et al., 2011).

O impacto da irrigação no balanço energético da mamona foi avaliado por Jordan (2012) que aplica o coeficiente energético de $57,20 \text{ MJ } kg^{-1}$, o mesmo utilizado para computar o consumo energético de equipamentos não propelidos, e leva em consideração a massa e a vida útil do sistema de irrigação. O mesmo critério também foi adotado por (GOMES et al., 2013).

Em contrapartida, Diotto (2013) apontou a necessidade de criação de um coeficiente energético que represente a energia indireta gasta pelos equipamentos de irrigação. Para tanto, o autor propôs uma metodologia que avalia separadamente 4 sistemas: bombeamento, adutora, filtragem e equipamento de irrigação. O autor propõe formulações específicas para obter a energia gasta por cada um desses sistemas de acordo com o tipo de irrigação (gotejamento ou pivô central). Essa metodologia também foi seguida por (SANTOS, 2016).

2.5 Análise Energética da Cultura do Milho

A cultura do milho ocupa posição de destaque entre as atividades agropecuárias do Brasil. Devido a sua importância na alimentação humana e animal, o balanço energético da cultura do milho para produção de grãos e silagem é essencial. Ramos (2014) mostra que a silagem é responsável por cerca de 30% do consumo de energia para a produção de leite, por exemplo. O que reforça a prerrogativa que o uso ótimo e sustentável é indispensável para a cultura do milho e, por este motivo, o balanço energético desta cultura vem sendo foco de diversos trabalhos.

Ao avaliar o balanço energético da cultura do milho em um assentamento rural, Bueno (2002) concluiu que as entradas culturais representaram uma energia de $8.819,71 \text{ MJ ha}^{-1}$. A energia direta representou 47,19% da matriz energética e a energia indireta 58,81%. Os fertilizantes e combustíveis (óleo diesel) foram os componentes que apresentaram maior consumo energético, $4.657,56 \text{ MJ ha}^{-1}$ e $3.057,96 \text{ MJ ha}^{-1}$, representando 52,8% e 34,7% da matriz energética da cultura do milho. A eficiência foi de 9,01 e a produtividade média da cultura foi de $4,88 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$. O autor chama a atenção ao fato de não considerar consistente a comparação de índices com outros trabalhos da literatura devido às diferentes metodologias e coeficientes energéticos adotados.

Já o balanço energético da produção da silagem foi avaliado por Zanini et al. (2003). Neste trabalho, as entradas de energia totalizaram $9.283,5 \text{ MJ ha}^{-1}$, sendo os dois maiores consumidores o óleo diesel ($4.347,5 \text{ MJ ha}^{-1}$ - 46,84%) e os herbicidas ($2.073,1 \text{ MJ ha}^{-1}$ - 22,33%). A produtividade média da silagem de milho foi $10,6 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$, resultando em uma saída de energia de $206.716,57 \text{ MJ ha}^{-1}$ e uma eficiência de 23,3. Esse valor, quando comparado com a literatura, é considerado elevado, que é justificado pelo autor pelas reduzidas operações mecanizadas e pelo menor consumo de nitrogênio nos fertilizantes.

Diversos autores apresentaram o balanço energético da cultura do milho para produção de grãos e silagem para o Irã: (BANAEIAN; ZANGENEH, 2011; KOMLEH et al., 2011; HOUSHYAR et al., 2012; YOUSEFI et al., 2015). Entre eles, Komeleh et al. (2011) avaliaram o consumo energético da silagem em fazendas de diferentes tamanhos e concluíram que as entradas que mais contribuíram para a matriz foram a energia indireta das máquinas e os fertilizantes químicos com um consumo de 42% e 28% do total da energia de entrada. Todas as culturas avaliadas eram irrigadas e a energia da irrigação foi contabilizada através do óleo diesel e/ou eletricidade utilizados no sistema de bombeamento de água, representando um consumo de energia de 9,24% da matriz energética. Os sistemas em análise apresentaram um consumo de energia de aproximadamente 69 GJ ha^{-1} e uma saída de cerca de 148 GJ ha^{-1} .

Riquetti et al. (2012) avaliaram a demanda energética para seis diferentes sistemas de produção de milho variando o tipo de manejo e o híbrido de milho. Como resultado para o plantio convencional com milho transgênico e não transgênico foram encontradas eficiências energéticas de 12,14 e 11,55, respectivamente, e o consumo de energia foi de pouco mais de 12 GJ ha^{-1} .

Em um trabalho mais abrangente, Veiga et al. (2015) ao avaliarem a incorporação de energia para 23 culturas na agricultura brasileira encontraram uma entrada de energia para o milho de $15,49 \text{ GJ ha}^{-1}$ com produtividade de $8,8 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}$. O trabalho mostra que os dois maiores consumidores de energia foram os fertilizantes com $8,75 \text{ GJ ha}^{-1}$ e os defensivos agrícolas $3,99 \text{ GJ ha}^{-1}$ representando 56% e 26% da matriz energética da cultura do milho, respectivamente.

Ao avaliarem o balanço energético da cultura do milho em Minas Gerais, Cunha et al. (2015) e Martins et al. (2015) quantificaram a eficiência energética da cultura do milho para grãos (considerando a energia gerada pela resíduo da palha) e para silagem, respectivamente.

Cunha et al. (2015) analisaram diferentes tipos de manejo (plantio direto, cultivo mínimo, manejo da palha e plantio convencional) e concluíram que o sistema de manejo da palha foi o que apresentou pior eficiência energética (13,11%) e que para todos os casos os fertilizantes apresentaram o maior consumo energético. Entretanto, com o aumento do uso de máquinas e implementos o plantio direto foi o que mais consumiu óleo diesel quando comparado com os demais tipos de manejo.

Já, Martins et al. (2015) avaliaram a eficiência energética para a produção da silagem em diferentes espaçamentos (0,60 m, 0,75 m e 0,90 m). A maior eficiência energética (9,69%) foi encontrada para o espaçamento de 0,60 m e em todos os cenários avaliados os maiores consumidores de energia na matriz foram os fertilizantes (10.439,19 MJ ha⁻¹) e o óleo diesel (1.990,53 MJ ha⁻¹).

As principais informações do balanço energético para os trabalhos citados anteriormente, e outros também envolvendo a cultura do milho, são resumidos na Tabela 2.10.

De modo geral, embora os coeficientes e as entradas energéticas sejam diferentes, é possível encontrar pontos de similaridade entre os trabalhos. A partir da Tabela 2.10 pode-se observar, por exemplo, que os maiores valores de entrada de energia foram para os trabalhos que avaliam a cultura do milho no Irã, acima de 50 GJ ha⁻¹. Essa grande entrada de energia se deve principalmente a alta participação da energia indireta das máquinas (≈ 29 GJ ha⁻¹) e um alto consumo de fertilizantes nitrogenados ($\approx 19,6$ GJ ha⁻¹).

As eficiências energéticas obtidas para o milho e para a silagem variaram entre 2,2 e 24,52. O que pode ser justificado pelo uso de diferentes coeficientes energéticos para as entradas e saídas de energia, diferentes metodologias de cálculo e também pelos diferentes manejos e produtividade das culturas.

Apesar disso, ainda é possível verificar que em quase todos os trabalhos avaliados os fertilizantes, os defensivos e o óleo diesel foram as maiores demandas da matriz energética, ressaltando a influência dessas entradas na eficiência energética de um sistema agrícola.

Tabela 2.10 – Principais Resultados para Balanço Energético da Cultura do Milho da Literatura.

Cultura	Efic. Energ.	Energ. Ent. (MJ <i>ha</i>-1)	Maiores Cons.	Referência
Milho	9,01	8.819	Fertilizantes e Óleo diesel	(BUENO, 2002)
	12,56	9.697	Fertilizantes e Defensivos	(SANTOS; SIMON, 2010)
	2,59*	52.575	Máquinas e Fertilizantes	(BANAEIAN; ZANGENEH, 2011)
	9,14*	23.900	Fertilizantes e Óleo Diesel	(ALLUVIONE et al., 2011)
	24,52	16.452	Fertilizantes e Defensivos	(CUNHA et al., 2015)
	3,03*	60.833	Eletricidade e Fertilizantes	(YOUSEFI et al., 2015)
	–	15.490	Fertilizantes e Defensivos	(VEIGA et al., 2015)
	5,6	≈ 26.000	Fertilizantes e Óleo Diesel	(FERRO et al., 2017)
Silagem	23,3	9.283	Óleo Diesel e Defensivos	(ZANINI et al., 2003)
	2,20*	68.928	Máquinas e Fertilizantes	(KOMLEH et al., 2011)
	9,69*	14.471	Fertilizantes e Óleo Diesel	(MARTINS et al., 2015)
	20,4 31,5	≈ 12.500	Fertilizantes e Óleo Diesel	(LIN et al., 2016)

*Culturas Irrigadas

Fonte: Do autor.

2.6 Influência dos Sistemas de Irrigação no Balanço Energético de Sistemas Agrícolas

A irrigação é uma prática apontada como grande consumidora de energia e com alto potencial para aumentar a produtividade de sistemas agrícolas. Do ponto de vista energético, os sistemas de irrigação devem ser bem analisados visando sempre maximizar a eficiência desta prática. Por este motivo, o conhecimento da demanda específica de energia ou índice de incorporação de energia para avaliação racional do uso destes sistemas é muito importante (DIOTTO, 2013).

Com relação aos trabalhos de balanço energético de culturas irrigadas, Campos (2004) considerou a energia direta do sistema de bombeamento (energia elétrica) e também a energia indireta dos equipamentos de irrigação. A cultura era irrigada por aspersão. Os equipamentos de irrigação representaram cerca de 0,9% ($549,52 \text{ MJ ha}^{-1}$) da matriz energética, sendo o segundo maior consumidor de energia indireta. Já a energia direta consumida pela irrigação representou cerca de 0,28% ($172,22 \text{ MJ ha}^{-1}$) da matriz energética.

Os custos energéticos da cultura do pinhão-manso e milho em condições de irrigação e sequeiro foram avaliados em um experimento conduzido por Frigo (2011). Para o sistema irrigado com lâmina de aproximadamente 24mm, o dispêndio energético foi de $2.594,70 \text{ MJ ha}^{-1}$ que representou 9,02% da matriz energética do sistema. Para o sistema com fertirrigação ARS o consumo foi de $3.228,26 \text{ MJ ha}^{-1}$ que representou 11,22%.

Por outro lado, Jordan (2012) avaliou o impacto da irrigação por gotejamento para diferentes lâminas de água na produtividade de grãos e no balanço energético de duas cultivares de mamona. O autor concluiu que a irrigação suplementar proporcionou um incremento na produtividade e na eficiência energética da cultura. Os consumos de energia relativos ao sistema de

irrigação foram de 0, 595, 1.190, 2.378 e 3.567 MJ ha^{-1} para tratamentos com irrigação suplementar de 0, 25, 50, 100, 150% da evapotranspiração (correspondentes a uma lâmina de irrigação de 0, 27, 54, 108, 162 mm, respectivamente).

Ao avaliar a demanda energética da cultura do pinhão-manso irrigado, Diotto (2013) propõe a separação da incorporação da energia do sistema de irrigação em: bombeamento, adutora, filtragem e equipamentos de irrigação. No seu trabalho, determinou um consumo de energia de 2.601,14 MJ $ha^{-1}ano^{-1}$ proveniente da adutora, 508 MJ $ha^{-1}ano^{-1}$ do sistema de filtragem. Para irrigação por gotejamento, a energia incorporada foi de 1.186,13 MJ $ha^{-1}ano^{-1}$ e energia total incorporada ao usar pivô central foi de 3.316,37 MJ $ha^{-1}ano^{-1}$ (6,06%). O consumo de energia elétrica do sistema de bombeamento foi 32.104,12 MJ $ha^{-1}ano^{-1}$, cerca de 58,68% da matriz energética. Para contabilizar o consumo de energia elétrica o autor utilizou as formulações apresentadas por Romanelli e Milan (2005) e o coeficiente de 11,80 MJ KWh^{-1} proposto por Pimentel (1980).

Queiroz (2014), ao analisar o balanço energético da produção de sorgo sacarino irrigado com lâmina 0,59 mmh^{-1} , mostrou que o consumo de eletricidade representou 29,8% (6.370,56 MJ ha^{-1}) e os equipamentos de irrigação cerca de 2% (422,30 MJ ha^{-1}) da matriz energética.

Carmo et al (2016), em estudo sobre o balanço energético de sistemas de produção de feijão irrigado, consideraram apenas a eletricidade consumida pelo sistema de irrigação e um consumo de 4,6 kWh para cada 10 m^3ha^{-1} de água. A irrigação representou o segundo maior consumo de energia representando de 19,4 a 21,6% da matriz para as diferentes fazendas analisadas.

Santos (2016), ao analisar o balanço energético do pinhão-manso com e sem irrigação (pivô central), obteve um consumo de energia indireta de 4.444,2 MJ ha^{-1} para os sistemas de irrigação e direta de 6.938,4 MJ ha^{-1} para o sistema

de bombeamento (energia elétrica). Para contabilizar a energia elétrica adotou o coeficiente de $11,80 \text{ MJ } KWh^{-1}$ proposto por Pimentel (1980) e para a energia indireta do sistema de irrigação utilizou a metodologia proposta por Diotto (2013). A energia elétrica (direta) e a energia incorporada pelo uso do sistema de irrigação (indireta) participaram 7,9 e 8,1% da energia total demandada na cultura avaliada.

A partir dos trabalhos apresentados na literatura é possível observar que alguns autores não consideram a energia gasta pelo equipamento de irrigação, apenas a eletricidade do sistema de bombeamento. Neste contexto, a metodologia utilizada para incluir os equipamentos de irrigação proposta por Diotto (2013) é a mais detalhada, pois apresenta formulações separadas para cada equipamento do sistema de irrigação.

Além disso, apesar de as entradas energéticas serem maiores para sistemas irrigados, em geral essa energia vem acompanhada de um aumento de produtividade, melhorando os índices de eficiência energética. Entretanto, ainda é de extrema importância a busca pela minimização das entradas de energia no sistema e identificação de pontos de desperdício energético visando sempre maximizar a eficiência do sistema.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área do Experimento

O Centro de Desenvolvimento e Transferência de Tecnologia (CDTT-UFLA), apresentado na Figura 3.1, é uma fazenda experimental da Universidade Federal de Lavras. O CDTT-UFLA está localizado no município de Ijaci-MG, nas coordenadas $21^{\circ} 9' 41''\text{S}$ e $44^{\circ} 54' 58''\text{O}$, com altitude média de 918m.

Figura 3.1 – Centro de Desenvolvimento e Transferência de Tecnologia – UFLA.



Fonte: Google Earth (2017)

O solo é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo (LVAd) de textura argilosa e o clima da região é considerado temperado úmido com inverno seco e verão quente (Cwa), segundo a classificação Köppen (MARTINS et al., 2015).

O CDTT-UFLA possui área total de 119,80 *ha* onde são implantadas diversas culturas, tais como milho para grãos, milho para silagem, entre outras.

3.1.1 Limites Estabelecidos para o Sistema Estudado

O presente trabalho irá avaliar o balanço energético da cultura milho irrigado por pivô central nos 11 *ha* apresentados na Figura 3.2. Essa cultura é destinada à produção de silagem de milho para alimentação suplementar de bovinos em um sistema intensivo de produção de leite.

Figura 3.2 – Delimitação do Sistema Estudado - Plantio de Milho sob Pivô Central.



Fonte: Google Earth (2017).

Neste trabalho serão avaliadas todas as etapas de produção da silagem desde o preparo do solo até o processo de compactação para ensilagem da cultura do milho irrigada por pivô central no ano agrícola de 2014/2015.

3.2 Operações de Implantação, Condução e Colheita da Cultura do Milho

O manejo utilizado neste trabalho para o cultivo do milho segue as seguintes etapas:

1. Dessecação Pré-Semeadura: consiste na aplicação de herbicidas antes da semeadura, que atuam na eliminação plantas daninhas ou culturas de cobertura existentes na área a ser cultivada. Esta etapa é comum em sistemas de plantio direto ou cultivo mínimo e deve ser tão eficiente quanto a eliminação mecânica feita no sistema de plantio convencional.
2. Subsolação: é utilizada para romper as camadas compactadas do solo resultantes do tráfego inadequado de conjuntos motomecanizados.
3. Semeadura e Adubação: consiste no plantio e na adubação do solo. Nesta etapa, os fertilizantes utilizados são a base de NPK contendo formulações específicas de acordo com o diagnóstico de fertilidade do solo e necessidade de nutrientes da cultura a ser implantada.
4. Irrigação com Pivô Central: é feita logo após o plantio a cada dois dias até o início do período chuvoso, buscando aumentar a produtividade e garantir a sobrevivência da plantação.
5. Herbicidas Pós-Semeadura: são aplicados herbicidas pós-emergentes seletivos em um período de até 30 dias após a semeadura para combater as plantas daninhas.
6. Adubação de Cobertura: é realizada para manter o nível de nutrientes no solo durante o desenvolvimento da cultura e é feita com fertilizantes a base de fósforo e potássio.

7. Colheita: consiste no processo de colheita da planta inteira triturada para silagem e inclui o transporte para armazenamento no silo. Ocorre em até 120 dias após o plantio.
8. Compactação para Ensilagem: consiste no processo de compactação do milho para silagem, com o objetivo de retirar oxigênio e diminuir a fermentação.

Essas etapas foram avaliadas em termos de consumo energético para a 1^a e 2^a safra do milho irrigado por pivô central. O processo de implantação, condução e colheita da cultura do milho na área estudada para duas safras em questão é descrito em detalhes a seguir.

Vale ressaltar que os operadores de cada máquina são treinados para conduzir de forma eficiente, buscando otimizar o consumo de combustível. Além disso, para padronizar o manejo de cada etapa da cultura nas diferentes safras, as máquinas são sempre conduzidas pelos mesmos trabalhadores.

3.2.1 Dessecação Pré-Semeadura

Para a dessecação de plantas daninhas foi realizada a aplicação do herbicida Roundup Original, que é um herbicida pós-emergente não seletivo de ação sistêmica. O Roundup possui 36 % do princípio ativo Glifosato (360g/L) e foi aplicado com dosagem de 3,5 L/ha^{-1} e volume de calda de 300 L/ha^{-1} .

A aplicação foi realizada com o pulverizador de barras de fabricação IMEP, modelo IM-12, com barras de 12 metros (FIGURA 3.3 (a)). O pulverizador foi acoplado ao trator de fabricação Valtra, modelo A750, com potência de 75 cv (55,16 kW) (FIGURA 3.3 (b)).

Para esse procedimento foi necessário apenas 1 trabalhador para operar o trator durante um período de aproximadamente 1 dia (8 horas). Esta operação

foi conduzida de maneira semelhante na 1^a e 2^a safra, utilizando as mesmas máquinas. A quantidade combustível e graxa utilizada foi contabilizada para os 11 *ha*.

3.2.2 Subsolagem

A subsolagem foi realizada utilizando o escarificador/subsolador de fabricação Stara, modelo ASA Laser KS, regulado com profundidade de aproximadamente 25 *cm*, como apresentado na Figura 3.4.

Devido à disponibilidade das máquinas, na 1^a safra o subsolador foi acoplado ao trator de fabricação Massey Ferguson, modelo MF283 com potência de 86 cv (63,5 kW). E na 2^a safra o mesmo subsolador foi utilizado com o trator de fabricação Valtra, modelo BM100, com potência de 106 cv (77,96kW).

Figura 3.3 – Máquinas Utilizadas na Dessecação Pré-Semeadura.



(a) Pulverizador de Barras

(b) Trator Valtra A750

Fonte: Do Autor (2017)

Para esse procedimento foram necessários 3 dias e 1 trabalhador para operar a máquina durante esse período (24 horas).

3.2.3 Semeadura e Adubação

Para semeadura, utilizou-se a semente de milho híbrido BM 840 PRO de fabricação Biomatrix, transgênica, de ciclo precoce e dupla aptidão (silagem e grãos). Foram utilizados 60 kg de sementes por ha resultando em uma população de 75.000 plantas por ha. Junto com a semeadura foi realizada a aplicação do fertilizante químico NPK 8-28-16, com dose de 450 kg ha⁻¹ na 1ª safra e de 400 kg ha⁻¹ na 2ª safra, de acordo com recomendação baseada na análise de solo.

Para este procedimento utilizou-se uma semeadora adubadora pneumática de fabricação Jumil, modelo JM2680, com 6 unidades de semeadura regulada para o espaçamento de 60 cm (FIGURA 3.5 (b)). A semeadora foi acoplada ao trator de fabricação Massey Ferguson, modelo MF283, com potência de 86 cv (63,5 kW) (FIGURA 3.5 (a)).

Figura 3.4 – Preparação do Solo – Subsolagem.



Fonte: Do Autor (2017).

Figura 3.5 – Máquinas e Implementos Utilizados na Semeadura e Adubação.



(a) Trator MF 283

(b) Semeadora Adubadora Jumil JM 2680

Fonte: Do Autor (2017).

Para esta etapa foram necessários 2 trabalhadores, um para operar a máquina e outro para avaliar a semeadura. O tempo gasto para foi de 4 dias (32 horas) e a sua condução foi idêntica nas duas safras.

3.2.4 Aplicação de Herbicidas Pós-Semeadura

Após a semeadura, foi realizada a pulverização de herbicida pós-emergente para o controle de plantas daninhas. Foram aplicados $2,5 L ha^{-1}$ de Siptran 500SC (50% Atrazina) e $0,24 L ha^{-1}$ de Soberan (42% Tembotriona) com volume de calda de $200 L ha^{-1}$.

Para a aplicação do herbicida pós-semeadura utilizou-se o pulverizador IMEP IM-12 e o trator Valtra A750 (FIGURA 3.3). Para esta etapa foi necessário 1 trabalhador para operar a máquina durante 1 dia (8 horas). Adotou-se a mesma dosagem, mesmas máquinas e implementos nas duas safras no processo de aplicação dos herbicidas.

3.2.5 Adubação de Cobertura

Para a adubação de cobertura utilizou-se o fertilizante químico NPK 300-20, garantindo o fornecimento de nutrientes ao solo e à planta. A dose utilizada foi de $450 kg ha^{-1}$ na 1ª safra e de $400 kg ha^{-1}$ na 2ª safra, de acordo com recomendação baseada na análise de solo. Utilizou-se a adubadora de cobertura de fabricação Baldan, modelo ACD-N, acoplada ao trator Valtra A750 (FIGURA 3.3 (b)).

Foram necessários, aproximadamente, 3 dias de trabalho (24 horas) para concluir o processo de adubação de cobertura e 1 trabalhador, procedimento adotado para as duas safras.

3.2.6 Irrigação

A irrigação da cultura do milho foi promovida pela utilização do sistema de irrigação por pivô central (FIGURA 3.6), de fabricação círculo verde modelo CV.600.4, constituído por 4 torres móveis, 68 aspersores e é capaz de irrigar 10,4 hectares.

A adutora é constituída de ferro fundido com 665 m de comprimento e vazão de $83,7 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, permitindo uma lâmina de 4 mm .

Figura 3.6 – Pivô Central Utilizado na Irrigação



(a) Vista Lateral

(b) Vista Frontal

Fonte: Do Autor (2017).

A unidade de bombeamento é composta por uma bomba de fabricação KSB - WKL 80/6 com potência de 52,5 cv (38,6 kW), de 6 estágios, diâmetro do rotor de 220mm, rotação nominal de 1750 rpm e rendimento de

¹ Vale ressaltar que horário da irrigação adotado neste trabalho não otimiza os custos com energia elétrica, pois o pivô central não está sendo acionado no horário reservado para irrigação noturna (21h 30 min às 6h), onde a tarifação é menor. Visto que o foco deste trabalho é o balanço energético, não serão propostas soluções e análises econômicas.

aproximadamente 69%. As curvas da bomba são apresentadas no Apêndice B (FIGURAS 1 e 2). O motor de indução utilizado é de fabricação WEG modelo W22 de 54 cv (39,72 kW).

O turno de rega do pivô é de 12 horas/dia. O pivô é acionado manualmente por volta das 18 h e desligado as 6 h³. Para irrigação do solo antes do plantio, o pivô é acionado durante 12 horas. Após o plantio irrigação é feita por 12 horas a cada 2 dias até o começo do período chuvoso.

Para a 1^a safra o pivô ficou ligado por aproximadamente 30 dias (360 horas). Já para a 2^a safra o pivô tenha ficado ligado por aproximadamente 45 dias (540 horas).

3.2.7 Colheita

A colheita do milho para silagem na área estudada foi feita de maneira simultânea com 2 tratores e 2 caminhões, como apresentado na Figura 3.7.

Um dos conjuntos utilizados na colheita é composto pela forrageira de fabricação Nogueira, modelo Pecus 9004 acoplada ao trator de fabricação Massey Ferguson, modelo MF283. A silagem colhida foi transportada por caminhão de fabricação Ford, modelo Cargo 2428E de 275 cv.

Figura 3.7 – Colheita Simultânea.



Fonte: Do Autor (2017).

O segundo conjunto é composto pela forrageira de fabricação JF, modelo JF92 Z10 acoplada ao trator de fabricação New Holland, modelo TL 85E com potência de 88 cv (64,72kW). O transporte da silagem foi feito pelo caminhão de fabricação Volvo modelo VM270 com potência de 270 cv, como na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Colheita do Milho para Silagem.



Fonte: Do Autor (2017).

Para a colheita são necessários 4 trabalhadores, cada um operando uma das máquinas por aproximadamente 6 dias de trabalho (48 horas). O tempo de colheita e as máquinas utilizadas nas duas safras do milho analisadas neste trabalho foram os mesmos.

3.2.8 Compactação para Ensilagem

À medida que a colheita era realizada, os caminhões transportavam a silagem para ser armazenadas nos silos. O processo de ensilagem iniciou com a compactação do milho, como apresentado na Figura 3.9.

Para a compactação do milho utilizou-se uma pá carregadora de fabricação New Holland modelo 12c. Entretanto, a máquina utilizada em cada safra dependia da disponibilidade para as atividades da fazenda. Por este motivo, em 2014 na 1^a safra, para a compactação do milho para silagem foi utilizado um trator da Massey Ferguson MF283 (FIGURA 3.5 (b)). Já em 2015, na 2^a safra a compactação foi feita com o trator de fabricação Valtra modelo A750 (FIGURA 3.3 (b)).

Figura 3.9 – Processo de Compactação da Silagem de Milho.



Fonte: Do Autor (2017).

O processo de compactação para ensilagem é realizado paralelamente à colheita, dura aproximadamente 6 dias (48 horas), requerendo 1 trabalhador para operar a máquina.

3.3 Período de Implantação de cada Etapa da Cultura

A Tabela 3.1 apresenta as datas de início e término de cada etapa da cultura do milho para silagem, descritas anteriormente.

Tabela 3.1 – Datas de Implantação de cada Etapa da Cultura do Milho.

Etapa do Plantio	1a Safra		2a Safra	
	Início	Duração	Início	Duração
Dessecação Pré-Semeadura	11/08/2014	1 dia	26/01/2015	1 dia
Subsolagem	12/08/2014	3 dias	27/01/2014	3 dias
Semeadura	01/09/2014	4 dias	09/02/2014	4 dias
Herbicidas Pós-Semeadura	22/09/2014	1 dia	02/03/2014	1 dia
Adubação de Cobertura	29/09/2014	3 dias	09/03/2014	3 dias
Colheita	08/12/2014	6 dias	18/05/2014	6 dias
Compactação para Ensilagem	08/12/2014	6 dias	18/05/2014	6 dias

Fonte: Do autor.

As datas e os tempos de duração de cada etapa são utilizados na obtenção da energia relativa à mão de obra e à depreciação energética das máquinas, conforme descrito a seguir. Neste trabalho, considerou-se um dia de trabalho com aproximadamente 8 horas.

3.4 Análise Energética

Para realizar a análise energética do milho para silagem foram contabilizadas as entradas e as saídas energéticas da cultura em questão. A energia de entrada foi classificada como energia direta e indireta, sendo a energia direta aquela relacionada aos combustíveis fósseis, trabalho humano e energia elétrica, e a energia indireta aquela relacionada à fabricação de maquinários, conforme proposto por Zanini (2013).

Os coeficientes energéticos de cada fonte são constituídos por dados da literatura, conforme descrição apresentada no Capítulo 2. Esses coeficientes não

contabilizam a energia proveniente do poder calorífico da fonte energética, mas de uma série de fatores (energia) envolvidos para sua obtenção.

3.4.1 Entrada de Energia Direta (E_D)

A metodologia para obtenção dos valores energéticos de cada uma das entradas consideradas neste trabalho é apresentada a seguir.

Mão de Obra

Adotou-se o coeficiente energético de $2,2 \text{ MJ } h^{-1}$, proposto na literatura por Serra (1979) e utilizado por diversos autores, como: (ROMANELLI, 2002; CAMPOS et al., 2009; DIOTTO, 2013). Esses autores conduziram experimentos semelhantes a este, que leva em consideração uma cultura com alto grau de mecanização e com baixa utilização de mão obra braçal.

Sementes

O coeficiente energético utilizado para as sementes foi o apresentado por Martins (2015) de $18,71 \text{ MJ } kg^{-1}$, obtido através da queima do material em uma bomba calorimétrica. Esse coeficiente foi escolhido devido à utilização do mesmo tipo de semente e à similaridade do experimento.

O cálculo da entrada de energia relativa ao uso das sementes (E_{sem}) é obtido pela multiplicação da quantidade de semente utilizada (kg) pelo seu coeficiente energético (CE_{sem}).

Óleo Diesel, Lubrificantes e Graxas

Os coeficientes energéticos utilizados para o óleo diesel, lubrificantes e graxas foram aqueles definidos no Balanço Energético Nacional de 2016, devido a confiabilidade e atualidade dos dados.

A entrada de energia relativa ao consumo de óleo diesel (E_{od}), lubrificantes (E_{lub}) e graxa (E_{gxa}) é obtida através da multiplicação de seus coeficientes energéticos (CE_{od} , CE_{lub} , CE_{gxa}) pela quantidade utilizada de cada componente.

Fertilizantes

Os coeficientes energéticos utilizados para os fertilizantes químicos foram aqueles definidos por Romanelli e Milan (2005), de 74 MJ kg^{-1} para o N, $12,56 \text{ MJ kg}^{-1}$ para o P_2O_5 e $6,7 \text{ MJ kg}^{-1}$ para o K_2O . Embora esses coeficientes não tenham sido definidos com base em levantamentos feitos no Brasil, esses índices foram os mais utilizados em trabalhos semelhantes que fazem a análise energética de sistemas agrícolas, facilitando a comparação dos resultados. Alguns autores que conduziram trabalhos para a cultura do milho também utilizaram esses coeficientes foram: (ROMANELLI; MILAN, 2005; DIOTTO, 2013; CUNHA et al., 2015; MARTINS et al., 2015; VEIGA et al., 2015).

Para os fertilizantes contendo NPK as formulações vêm expressas no formato (a-b-c), onde a , b e c são as quantidades de cada produto em kg para cada 100 kg de fertilizantes (CAMPOS, 2001). Para a determinação do conteúdo energético do fertilizante (E_{fer}), multiplica-se as quantidades de cada elemento ativo (N, P_2O_5 e K_2O) utilizado na cultura pelo coeficiente energético correspondente.

Defensivos

Devido a pouca quantidade de dados disponíveis na literatura para os defensivos agrícolas, os coeficientes energéticos utilizados neste trabalho, seguem os valores definidos por Fluck e Baird (1982) que estão citados no trabalho de Romanalli e Milan (2005) e são utilizados por diversos autores, como: (CAMPOS, 2001; ROMANELLI; MILAN, 2005; DIOTTO, 2013; SANTOS, 2016).

A entrada de energia relativa ao uso de defensivos agrícolas (E_{df}) líquidos é obtida através da seguinte equação:

$$E_{df} = C_{pa} \cdot Q_{df} \cdot CE_{df} \quad (3.1)$$

onde, CE_{df} é o coeficiente energético do defensivo (MJ L^{-1}); C_{pa} é a concentração do princípio ativo (decimal) e Q_{df} é a quantidade do defensivo utilizada por hectare (L ha^{-1}).

Energia Elétrica

A energia elétrica consumida pelo sistema de bombeamento do pivô central (E_{el}) foi obtida através da equação (3.2), descrita por (ROMANELLI, 2002).

$$E_{el} = \frac{P \cdot T_{UD} \cdot N}{A} \cdot CE_{el} \quad (3.2)$$

em que, CE_{el} é o coeficiente energético da eletricidade definido por BRA-

SIL (2016); P é a potência nominal do motor que aciona o sistema de bombeamento; T_{UD} é o tempo de uso diário (h); N é o número de dias e A é a área total da cultura (ha).

Para finalizar, é possível obter a energia direta total (E_D) através da soma das energias de cada entrada, como descrito na equação a seguir:

$$E_D = E_{mo} + E_{sem} + E_{od} + E_{lub} + E_{gxa} + E_{fer} + E_{df} + E_{el} \quad (3.3)$$

Os coeficientes energéticos adotados para as entradas de energia direta estão resumidos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Coeficientes Energéticos Adotados para as Entradas de Energia Direta.

Entrada de Energia	Unidade	Coefficiente Energético	Referência
Mão de Obra	MJ h^{-1}	2,2	(DIOTTO, 2013)
Sementes	MJ kg^{-1}	18,71	(MARTINS et al., 2015)
Óleo Diesel	MJ L^{-1}	35,5	(BRASIL, 2016)
Lubrificantes	MJ L^{-1}	36,43	(BRASIL, 2016)
Graxas	MJ kg^{-1}	38,77	(BRASIL, 2016)
Fertilizantes			
N	MJ kg^{-1}	74	(DIOTTO, 2013)
P_2O_5	MJ kg^{-1}	12,56	(DIOTTO, 2013)
K_2O	MJ kg^{-1}	6,7	(DIOTTO, 2013)
Defensivos			(ROMANELLI; MILAN,
Roundup (Glifosato)	MJ L^{-1}	454,20	2005)
Atrazina	MJ L^{-1}	188,38	(ROMANELLI; MILAN,
			2005)
Soberan	MJ L^{-1}	254,57	(ROMANELLI; MILAN,
			2005)
Energia Elétrica	MJ kWh^{-1}	3,6	(BRASIL, 2016)

Fonte: Do autor.

3.4.2 Entrada de Energia Indireta (E_I)

Os valores de energia indireta foram obtidos através da definição dos coeficientes energéticos mais adequados, como descrito a seguir.

Máquinas e Implementos Agrícolas

Os coeficientes adotados para contabilizar a energia gasta na fabricação de máquinas e implementos foram os apresentados por Campos (2001) de $69,83 \text{ MJ kg}^{-1}$ para equipamentos autopropelidos e de $57,20 \text{ MJ kg}^{-1}$ para outros equipamentos.

O cálculo da energia indireta das máquinas (E_{maq}) e implementos agrícolas (E_{imp}) foi feito com base no conceito da depreciação energética, como descrito a seguir:

$$E_{maq/imp} = \left(\frac{M \cdot T_U}{V_U \cdot A} \right) CE_{maq/imp} \quad (3.4)$$

onde, M é a massa dos equipamentos (kg); CE_{maq} é o coeficiente energético utilizado para máquinas (MJ kg^{-1}); CE_{imp} é o coeficiente energético utilizado para os implementos agrícolas (MJ kg^{-1}); T_U é o tempo de uso (h); V_U é a vida útil das máquinas (h) e A é a área total da cultura.

Equipamento de Irrigação

Para obtenção da demanda energética da fabricação dos equipamentos de irrigação foram utilizados os equacionamentos propostos por Diotto (2013) por se tratar de uma metodologia mais completa e adequada para os sistemas de irrigação com pivô central. De acordo com o autor, para o pivô é possível contabilizar a energia consumida pelo sistema de bombeamento, pela adutora e pelo pivô (torres e a linhas laterais).

Para a energia consumida pelo sistema de bombeamento (E_{bomb}) foi utilizada a seguinte equação:

$$E_{bomb} = \left(\frac{7,62 \cdot P}{A_{irr}} \right) F_{aj} \quad (3.5)$$

onde, P é potência da bomba (kW); F_{aj} é um fator de ajuste para adequar o tempo de uso do sistema quando este for menor que um ano (*anos*) e A_{irr} é a área irrigada em hectares (*ha*).

Para a energia consumida por uma adutora de metal (E_{ad}) foi utilizada a seguinte equação:

$$E_{ad} = \frac{[0,7242 \cdot Q_{ad} + 54,642] L_{ad}}{A_{irr}} F_{aj} \quad (3.6)$$

onde, Q_{ad} e L_{ad} são a vazão ($m^3 h^{-1}$) e comprimento da adutora (m), respectivamente.

Por fim, para o cálculo da energia incorporada pelo sistema de irrigação do pivô central (E_{pivo}), utilizou-se a seguinte equação:

$$E_{pivo} = \left(10318 \cdot A_{irr}^{-0,53} \right) F_{aj} \quad (3.7)$$

A energia total consumida pelo equipamento de irrigação (E_{irr}), em MJ ha^{-1} , pode então ser calculada da seguinte maneira:

$$E_{irr} = E_{bomb} + E_{ad} + E_{pivo} \quad (3.8)$$

O cálculo da energia indireta de máquinas, implementos agrícolas e equipamentos de irrigação leva em consideração a vida útil desses equipamentos. A Tabela 3.3 apresenta a vida útil das máquinas utilizadas neste trabalho, de acordo com os dados apresentados por (BRASIL, 2010).

Tabela 3.3 – Vida Útil de Equipamentos de Acordo com a BRASIL (2010).

Máquinas	Vida Útil (h)	Vida Útil (anos)
Tratores	15.000	10
Caminhão	12.000	10
Implementos		
Escarificadores/Subsoladores	2.500	15
Semeadora/Adubadora	1.200	15
Pulverizador de Barras	2.000	8
Colhedora de Forragens	5.000	10
Sistema de Irrigação		
Máquinas	Vida Útil (h/ano)	Vida Útil (anos)
Pivô Central	2.000	20
Conjunto Moto-Bomba	2.000	15

Fonte: Do autor.

A Tabela 3.4 apresenta um resumo dos coeficientes energéticos utilizados para obtenção da energia indireta demandada na produção de máquinas e implementos agrícolas.

Tabela 3.4 – Coeficientes Energéticos Adotados para as Entradas de Energia Indireta.

Entrada de Energia	Unidade	Coeficiente Energ.	Referência
Máquinas	$MJkg^{-1}$	69,83	(MARTINS et al., 2015)
Implementos	$MJkg^{-1}$	57,20	(MARTINS et al., 2015)

Fonte: Do autor.

A energia indireta total (E_I) foi obtida através da soma das energias demandadas para a produção de cada máquina, implementos e pelo equipamento de irrigação, como descrito na equação a seguir:

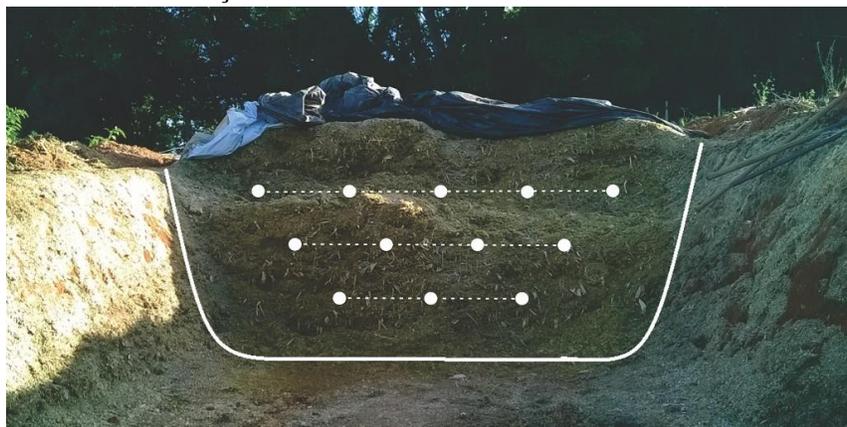
$$E_I = \sum E_{maq} + \sum E_{imp} + E_{irr} \quad (3.9)$$

3.4.3 Saída de Energia (E_S)

A energia de saída foi obtida por meio da quantificação do poder calorífico da silagem produzida. O poder calorífico representa a quantidade de calor que é liberado na combustão da silagem de (MJ), quando esta é queimada por unidade de massa (kg).

Para realizar tal procedimento foram retiradas 12 amostras, de aproximadamente 300 gramas cada, da silagem de milho após o processo completo de ensilagem. As amostras foram retiradas ao longo do silo buscando encontrar uma melhor representatividade da cultura como um todo (FIGURA 3.10).

Figura 3.10 – Pontos de Coleta das Amostras de Silagem Utilizadas para Obtenção do seu Poder Calorífico.



Fonte: Do Autor (2017).

As amostras foram analisadas utilizando o calorímetro de fabricação IKA modelo C2000, apresentado na Figura 3.11. Este equipamento funciona a combustão e é capaz determinar os valores caloríficos brutos de amostras líquidas e sólidas. Os ensaios foram realizados de acordo com a metodologia proposta pela norma brasileira ABNT NBR 8633 (ABNT, 1984).

Figura 3.11 – Equipamento Utilizado para Obtenção do Poder Calorífico da Silagem.



(a) Calorímetro



(b) Bomba Calorimétrica

Fonte: Do Autor (2017).

A energia de saída (E_s) é obtida através da multiplicação do poder calorífico da silagem ($CE_{silagem}$) pela produtividade da cultura ($Prod$), como:

$$E_s = Prod \cdot CE_{silagem} \quad (3.10)$$

3.4.4 Balanço Energético e Eficiência Energética

Para análise energética da cultura do milho utilizou-se dois índices de eficiência, descritos por Martins (2015): a eficiência energética e o balanço energético. Esse índices são dados por:

$$\text{Balanço Energético} = E_{saida} - E_{entrada} \quad (3.11)$$

$$\text{Eficiência Energética } (\eta) = \frac{E_{saida}}{E_{entrada}} \quad (3.12)$$

A energia de entrada ($E_{entrada}$) é dada pela soma da energia direta e indireta ($E_{entrada} = E_D + E_I$) e a energia de saída (E_{saida}) é aquela obtida pelo coeficiente energético do milho em função da produtividade.

4 RESULTADOS

A partir dos dados levantados na implantação da cultura do milho para silagem da 1^a e 2^a safra do ano agrícola de 2014/2015 foram feitos os cálculos de entrada e saída de energia. Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

4.1 Entradas de Energia

As entradas de energia direta e indireta da cultura do milho irrigado por pivô do CDTT-UFLA foram calculadas a partir dos dados coletados durante a implantação da cultura. Para tanto, as seguintes entradas energéticas foram contabilizadas:

- Entradas de Energia Direta: mão de obra, sementes, óleo diesel, lubrificantes, graxa, fertilizantes, defensivos e energia elétrica.
- Entradas de Energia Indireta: máquinas, implementos e irrigação.

O consumo de energia para cada uma dessas entradas foi obtido de acordo com as formulações apresentadas na metodologia e os coeficientes energéticos definidos nas Tabelas 3.2 e 3.4. Os resultados obtidos para a 1^a e 2^a safra do ano agrícola de 2014/2015 são apresentados na Tabela 4.1, onde é apresentada a matriz energética da cultura em análise e a participação (%) de cada entrada no consumo de energia total.

A partir dos dados da Tabela 4.1 é possível observar que o consumo energético total foi de aproximadamente 45.643,85 MJ ha^{-1} para a 1^a safra e 47.303,60 MJ ha^{-1} para a 2^a safra. Esses valores de entrada de energia são significativamente maiores que os encontrados por Martins et al. (2015) e Cunha et al. (2015), de 14.471 MJ ha^{-1} e 16.452 MJ ha^{-1} , que fizeram análises

semelhantes para a cultura do milho na mesma região. Esses autores realizaram experimentos de pequeno porte para avaliar a influência do manejo do solo e do espaçamento entre grãos no balanço energético do sistema. Em ambos os trabalhos os autores não consideram a energia gasta no processo de compactação para ensilagem, transporte da silagem e sistemas de irrigação.

Tabela 4.1 – Entradas de Energia na Cultura do Milho para Silagem.

Entrada de Energia	1ª Safra		2ª Safra	
	MJ ha ⁻¹	Participação	MJ ha ⁻¹	Participação
Energia Direta				
Mão de Obra	809,60	1,77%	809,60	1,71%
Sementes	1.122,60	2,46%	1.122,60	2,37%
Óleo Diesel	17.660,70	38,69%	17.716,28	37,45%
Lubrificantes	1.002,92	2,20%	1.010,38	2,14%
Graxas	656,20	1,44%	581,69	1,23%
Fertilizantes	15.322,50	33,57%	13.620,00	28,79%
8-28-16	4.729,50	10,36%	4.204,00	8,89 %
30-0-20	10.593,00	23,21%	9.416,00	19,91 %
Defensivos	833,43	1,83%	833,43	1,76%
Roundup (36%)	572,29	1,25 %	572,29	1,21%
Atrazina (50%)	235,48	0,52 %	235,48	0,50%
Soberan (42%)	25,66	0,06 %	25,66	0,05%
Energia Elétrica	4.949,72	10,84%	7.424,58	15,70%

Continua...

Conclusão.

Energia Direta Total	42.357,67	92,80%	43.118,56	91,15%
Energia Indireta				
Máquinas	963,31	2,11%	967,75	2,05%
Implementos	534,02	1,17%	534,02	1,13%
Irrigação	1.788,85	3,92%	2.683,27	5,67%
Bombeamento	5,24	0,01 %	7,86	0,02%
Adutora	1.246,78	2,73 %	1.870,16	3,96%
Pivô Central	536,83	1,18%	805,25	1,70%
Energia Indireta Total	3.286,18	7,20%	4.185,04	8,85%
Entrada de Energia Total	45.643,85	100,00%	47.303,60	100%

Fonte: Do autor.

Por outro lado, autores como Yousefi et al. (2015) e Komleh et al. (2011), que avaliaram o consumo energético da cultura do milho para pequenas (< 5 ha), médias (5-10 ha) e grandes (> 10 ha) propriedades do Irã, obtiveram uma entrada de energia de 60.833 MJ ha⁻¹ e 68.928 MJ ha⁻¹. Entretanto, uma comparação direta dos valores brutos de entrada de energia seria deficiente, pois os coeficientes energéticos e as entradas de energia adotadas por esses autores são diferentes das utilizadas neste trabalho. Porém, os valores mais elevados de entrada de energia estão de acordo com os encontrados neste trabalho, uma vez que se trata de culturas de médio porte, altamente mecanizadas e com irrigação.

Neste trabalho, também foi possível observar uma forte predominância do consumo de energia direta (42.357,67 MJ ha⁻¹ e 43.118,56 MJ ha⁻¹) em relação ao consumo de energia indireta (3.286,18 MJ ha⁻¹ e 4.185,04 MJ ha⁻¹). A maioria dos autores que utilizam uma classificação de energia semelhante também encontrou maior influência da energia direta em sua matriz energética,

tais como: (ANGONESE et al., 2006; MELO et al., 2007; BIAGGIONI; BOVOLENTA, 2010; SOUZA et al., 2009; SANTOS; JÚNIOR, 2004; VELOSO, 2014; MARTINS et al., 2015; CUNHA et al., 2015).

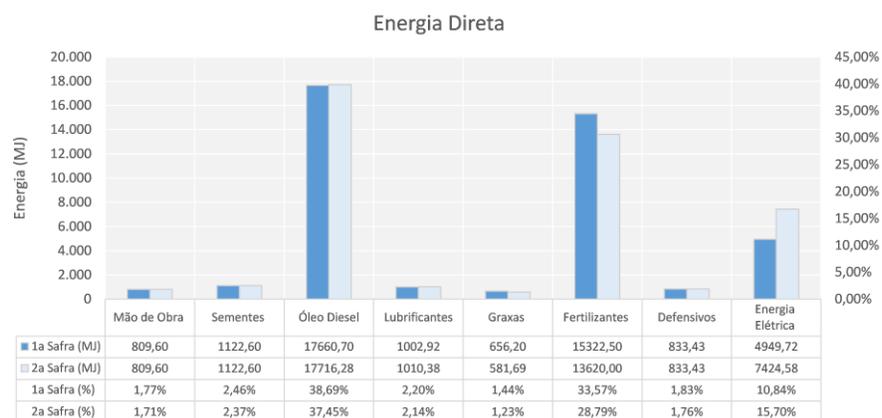
A seguir são detalhados os resultados encontrados para cada entrada de energia (direta e indireta) e sua influência na matriz energética da cultura do milho.

4.2 Energia Direta

O consumo de energia direta representou uma participação 91,23% e 92,80% na matriz energética da cultura do milho para a 1^a e 2^a safra, respectivamente. O consumo de cada fonte de energia direta pode ser avaliado a partir da Figura 4.1.

O óleo diesel representa o maior consumo energético da matriz com 17.660,70 MJ ha⁻¹ e 17.716,28 MJ ha⁻¹ e uma participação maior que 37%. O consumo de combustíveis é praticamente o mesmo para as duas safras já que as máquinas utilizadas e o tempo de uso de cada uma delas são similares. A quantidade de óleo diesel requerida por máquina o tempo de uso de cada máquina e implemento para todas as etapas de implantação e condução da cultura do milho são apresentadas nas Tabelas 1, 2, 3 e 4 do Apêndice A.

Figura 4.1 – Consumo de Energia Direta por Fonte para 1ª e 2ª Safra.



Fonte: Do Autor (2017).

Os valores encontrados pelo consumo de óleo diesel são significativamente maiores do que aqueles encontrados na literatura. Entretanto, é importante ressaltar que neste trabalho foi considerado o consumo de combustíveis de dois caminhões para o transporte do milho do local da cultura até os silos, e de um trator utilizado no processo de compactação para ensilagem.

Alguns autores, como Martins (2015) e Cunha (2015), por exemplo, não consideram o consumo de combustíveis para as etapas de transporte e compactação. O fato de essas etapas serem incluídas como entradas de energia da cultura do milho em análise justificam a elevada participação do óleo diesel na matriz energética, se comparado com outros trabalhos similares ou para mesma cultura.

A segunda maior demanda de energia foi a dos fertilizantes, com um consumo de 15.332,50 MJ ha⁻¹ e 13.620,00 MJ ha⁻¹, o que representou uma participação 33,57% e 28,79% na matriz energética. A alta participação energética dos fertilizantes químicos é uma característica comum de muitos

trabalhos, como pode ser observado na Tabela 2.10. Diversos autores que fizeram balanço energético da cultura do milho para grão e silagem apresentaram os fertilizantes como a maior fonte de consumo energético, tais como: (BUENO, 2002; ALLUVIONE et al., 2011; VEIGA et al., 2015; CUNHA et al., 2015; MARTINS et al., 2015; LIN et al., 2016; FERRO et al., 2017).

A energia elétrica utilizada pelo sistema de bombeamento da irrigação foi a terceira maior demanda, e apresentou um consumo significativo de 4.949,72 e 7.424,58 MJ ha^{-1} (com participação de 10,84% e 15,70% na matriz). O consumo de energia elétrica é apontado por alguns autores como a fonte de energia mais significativa dentro dos sistemas de irrigação (JORDAN et al., 2012; QUEIRÓZ, 2014; DIOTTO et al., 2014; CARMO et al., 2016; SANTOS, 2016).

Queiróz (2014), por exemplo, retratou que o consumo de eletricidade foi 6.370,56 MJ ha^{-1} e representou 29,8% da matriz energética. Já para Carmo (2016) o consumo de eletricidade do sistema de irrigação foi de 4.961,4 MJ ha^{-1} e foi a segunda fonte com maior consumo energético de sua matriz. Esses resultados validam a relevância do consumo de eletricidade dentro da matriz energética de um sistema agrícola.

As demais fontes de energia direta, tais como: mão de obra, sementes, lubrificantes, graxa e defensivos apresentam menor impacto na matriz energética, com participação menor que 2,5 %. A baixa participação de fontes, como sementes e mão de obra, mostram uma tendência observada em diversos trabalhos, tais como: (ASSENHEIMER; CAMPOS; JÚNIOR, 2009; ROMANELLI; NARDI; SAAD, 2012; JORDAN et al., 2012; MARTINS et al., 2015; CUNHA et al., 2015; CARMO et al., 2016), entre outros.

Além disso, o baixo uso de mão de obra em conjunto com o elevado consumo de combustíveis evidenciam o alto grau de mecanização da cultura avaliada.

4.3 Energia Indireta

A energia indireta consumida pela cultura representou um percentual pequeno da matriz energética, com participação de 7,20% e 8,77 %. As principais fontes de energia consideradas foram as máquinas, implementos e os equipamentos de irrigação. A seguir será feita uma breve análise do consumo de energia indireta de cada uma dessas fontes.

4.3.1 Máquinas e Implementos Agrícolas

A energia indireta consumida na produção de máquinas e implementos agrícolas foi obtida através do método da depreciação energética (DEE). Para tanto, foram levantados os dados de vida útil (*h*) e peso (*kgf*) de cada uma das máquinas. Os dados de vida útil foram obtidos de acordo com a Tabela 3.3, de Brasil (2010), e o peso foi obtido a partir dos dados de catálogo de cada máquina. Os resultados são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Vida Útil e Peso das Máquinas e Implementos.

Máquina (Potência cv)	Vida Útil (h)	Peso (kgf)
Trator Valtra A750 (75 cv)	15000	3160
Trator Valtra BM100 (106 cv)	15000	3868
Trator Massey Ferguson MF283 (86 cv)	15000	3431
Trator New Holland TL 85 E	15000	3160
Caminhão Volvo VM270 (270 cv)	12000	10700
Caminhão Ford Cargo 2428 E (275 cv)	12000	13910
Implementos		
Pulverizador de Barras 12 metros IMEP	2000	295
Subsolador Stara Asa Laser KS	2500	1300
Semeadora Jumil JM2680 PD	1200	2220
Adubadora de Cobertura Baldan ACD - N	1200	660
FORAGEIRA Nogueira Pecu 9004	5000	740
FORAGEIRA JF 192 C12	5000	870

Fonte: Do autor.

O cálculo da depreciação energética também leva em consideração o tempo de uso de cada máquina e implemento, que são apresentados nas Tabelas 1 e 2 do Apêndice A, para cada etapa do cultivo do milho na 1^a e 2^a safra.

A Figura 4.2 apresenta o consumo de energia indireta das máquinas, implementos agrícolas e dos equipamentos irrigação. O maior consumidor de energia indireta foram os equipamentos de irrigação com participação de 3,92% e 5,67%, seguido pelas máquinas com participação de 2,11% e 2,05% na matriz.

Esses equipamentos apresentaram no total um consumo de 1.497,33 e 1.501,77 MJ ha⁻¹, cerca de 3% da matriz energética. Apesar do alto grau de

mecanização da cultura, as máquinas apresentam uma participação pequena na matriz, devido principalmente à metodologia da DEE. Desta forma, a energia gasta para a produção dessas máquinas será dividida para as demais operações ao longo de sua vida útil.

Figura 4.2 – Consumo de Energia Indireta por Fonte.



Fonte: Do autor (2017).

4.3.2 Equipamentos de Irrigação

Para contabilizar o consumo energético dos equipamentos de irrigação foram considerados os parâmetros apresentados na Tabela 4.3. Esses dados foram aplicados de acordo com a metodologia proposta por Diotto (2013). O autor separa o consumo de energia indireta dos equipamentos de irrigação em três componentes: o sistema de bombeamento, a adutora e o pivô central (sistema de irrigação).

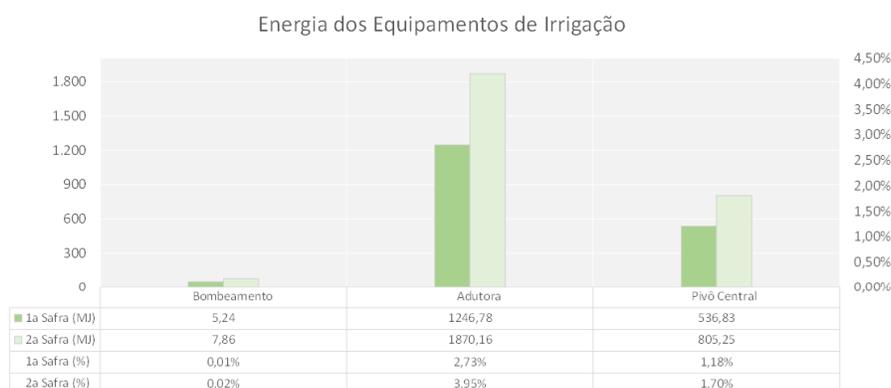
Tabela 4.3 – Parâmetros Utilizados no Cálculo da Energia Indireta do Sistema de Irrigação.

Parâmetros	1 Safra	2 Safra
Potência do Motor (Bomba)	39,72 kW	39,72 kW
Comprimento da Adutora	625 m	625 m
Tempo de operação diário	12 h	12 h
Número de dias de irrigação	30 dias	45 dias
Vazão média	83,70 m ³ h ⁻¹	83,70 m ³ h ⁻¹
Área Irrigada	10,40 ha	10,40 ha
Lâmina de água	4 mm	4 mm
Altura Manométrica	114 mca	114 mca

Fonte: Do autor.

A Figura 4.3 apresenta o consumo de energia indireta para os equipamentos de irrigação. O sistema de bombeamento apresentou um consumo de energia muito pouco significativo, se comparado com a energia gasta pela adutora e pelo sistema de irrigação.

Figura 4.3 – Consumo de Energia Indireta dos Equipamentos de Irrigação.



Fonte: Do autor (2017).

O maior dispêndio energético dos equipamentos de irrigação foram as tubulações da adutora, com um consumo de 1.246,78 MJ ha^{-1} e 1.870,16 MJ ha^{-1} . Devido ao seu comprimento de 650 metros, a adutora representou cerca de 69,7% do consumo total de energia indireta dos equipamentos de irrigação.

O pivô central, por sua vez, participou em 30% no consumo de energia dos equipamentos de irrigação com 536,83 MJ ha^{-1} e 805,25 MJ ha^{-1} . Os resultados encontrados neste trabalho corroboram com aqueles apresentados por Diotto (2013) e Santos (2016) que utilizaram a mesma metodologia.

Outros autores, como Jordan et al. (2012) e Gomes et al. (2013), calcularam o consumo de energia indireta dos equipamentos de irrigação através da mesma metodologia utilizada para os implementos agrícolas. Portanto, os autores não contabilizaram de forma separada o consumo de energia indireta de cada equipamento.

Desta forma, vale ressaltar que apesar da participação dos equipamentos de irrigação na matriz energética ser pequena (< 6%), esses equipamentos representaram a fonte com maior consumo de energia indireta e o quarto maior consumo de energia da matriz. O dispêndio energético de 1.788,85 e 2.683,27 MJ ha^{-1} foi maior que algumas fontes de energia direta, tais como: mão de obra, sementes, lubrificantes, graxa e defensivos agrícolas.

4.4 Demanda Energética por Etapa de Cultivo

A Tabela 4.4 apresenta o consumo energético de cada etapa do cultivo de milho para silagem na 1^a e 2^a safra.

A etapa de colheita e transporte foi a que apresentou maior demanda energética, com um consumo de 17.359,49 e 17.272,56 MJ ha^{-1} , representando uma participação de 38,01% e 36,52% na matriz energética.

Na 1ª safra, a segunda maior demanda energética ocorreu na adubação de cobertura, o consumo total foi de 11.211,41 MJ ha^{-1} , resultando em uma participação de 24,56% na matriz. Ainda na 1ª safra, pode-se observar que a semeadura e a irrigação consumiram praticamente a mesma quantidade de energia, com uma participação de 14,86% e 14,76%, respectivamente. A demanda energética total da semeadura foi de 6.784 MJ ha^{-1} e da irrigação foi de 6.738 MJ ha^{-1} .

Na 2ª safra, o maior número de dias de irrigação fez com que o sua demanda superasse a da semeadura e da adubação de cobertura. O consumo total da irrigação foi de 10.107,86 MJ ha^{-1} , com uma participação de 21,37% da matriz energética. Enquanto a adubação de cobertura consumiu 10.035,47 MJ ha^{-1} e a semeadura 6.255,83 MJ ha^{-1} .

As demais etapas, como a ensilagem, subsolagem, dessecação e aplicação de herbicidas, apresentaram uma participação menor que 4% na matriz energética.

Tabela 4.4 – Consumo de Energia por Etapa da Cultura para 1ª 2ª Safra.

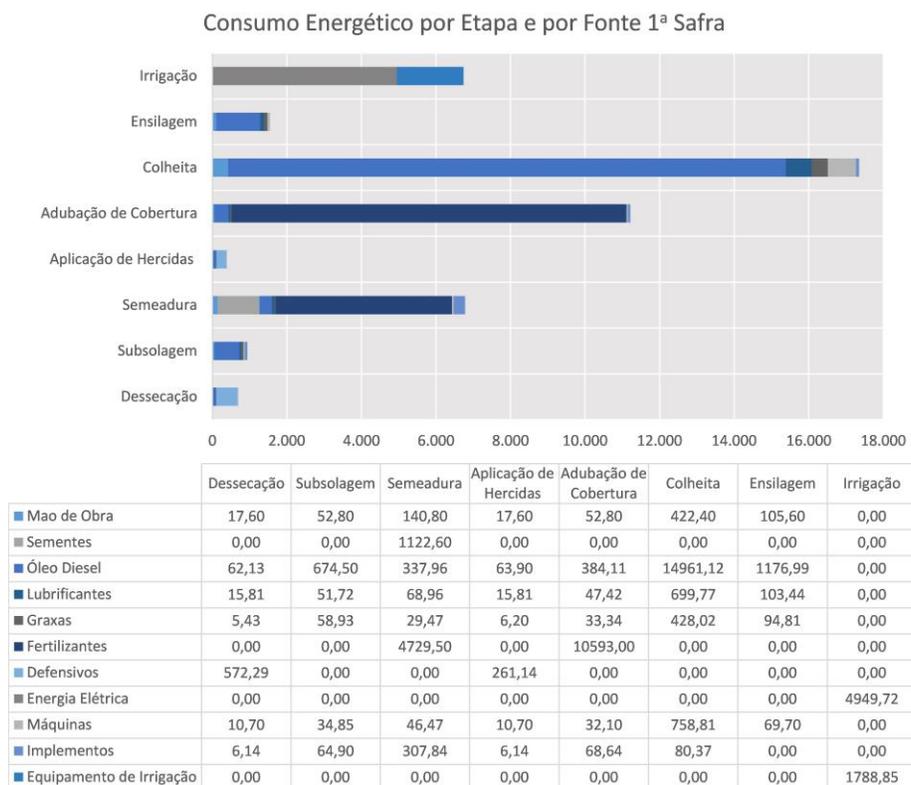
Etapa da Cultura	1ª Safra		2ª Safra	
	MJ ha^{-1}	Participação	MJ ha^{-1}	Participação
Dessecação	690,09	1,51%	690,09	1,46%
Subsolagem	937,70	2,05%	949,59	2,01%
Semeadura	6.783,59	14,86%	6.255,83	13,22%
Aplicação de Herbicidas	381,48	0,84%	378,93	0,80%
Adubação de Cobertura	11.211,41	24,56%	10.035,47	21,22%
Colheita	17.350,49	38,01%	17.274,56	36,52%
Ensilagem	1.550,54	3,40%	1.611,28	3,41%
Irrigação	6.738,57	14,76%	10.107,86	21,37%
Total	45643,85	100,00%	47303,60	100,00%

Fonte: Do autor.

As Figuras 4.4 e 4.5 são utilizadas para avaliar o impacto de cada fonte de energia na demanda das etapas da cultura do milho para a 1^a e 2^a safra, respectivamente.

Na etapa da colheita e transporte a fonte energia mais significativa foi o óleo diesel, como era de se esperar. Pois, para esta etapa foram utilizados dois tratores e dois caminhões, contabilizando um consumo total de cerca de 420 Lha^{-1} , conforme apresentado nas Tabelas 3 e 4 do Apêndice A. O alto consumo de combustível para esta etapa pode ser justificado pelo número de máquinas e dias de colheita e também pela distância percorrida do local da plantação até o silos. O óleo diesel representou cerca de 86% do consumo energético da colheita com uma demanda de 14.961,12 MJ ha^{-1} .

Figura 4.4 – Participação das Fontes de Energia em Cada Etapa da Cultura do Milho para Silagem - 1ª Safra.



Fonte: Do autor (2017).

Na etapa de adubação de cobertura, a fonte de energia predominante foi o fertilizante, responsável por 94,5% do consumo de energia da adubação de cobertura, com demanda de 10.593,00 MJ ha^{-1} . O fertilizante utilizado foi o NPK 30-0-20 e seu consumo pode ser justificado pelo alto coeficiente energético escolhido para o nitrogênio, pela formulação e pela quantidade utilizada.

Vale ressaltar que o coeficiente energético adotado para o Nitrogênio foi de 74 MJ kg^{-1} , um dos maiores apresentados na Tabela 2.7. Esse coeficiente foi

adotado tomando como base os trabalhos de Martins et. al (2015) e Cunha et. al (2015), que também realizaram experimentos no CDTT-UFLA. Além disso, Mendes Júnior e Bueno (2015), que estudaram o consumo de energia no processo de produção dos fertilizantes nitrogenados, concluíram que as análises energéticas poderiam estar subestimando a participação desse componente, mais uma razão para utilizar um coeficiente energético mais alto para o mesmo.

A participação dos fertilizantes também impactou na etapa de semeadura, onde foi utilizado o NPK 8-28-16. Devido à menor concentração de nitrogênio, o consumo energético foi de $4.729,50 \text{ MJ ha}^{-1}$, menor que o da adubação de cobertura. Ainda assim representou 69,7% do consumo de energia da etapa de semeadura.

A eletricidade consumida pelo pivô central foi responsável por 73,5% da energia da irrigação, com uma demanda energética de $4.949,72 \text{ MJ ha}^{-1}$. A energia dos equipamentos de irrigação, por sua vez, representou os outros 36,5% da energia relativa ao sistema de irrigação.

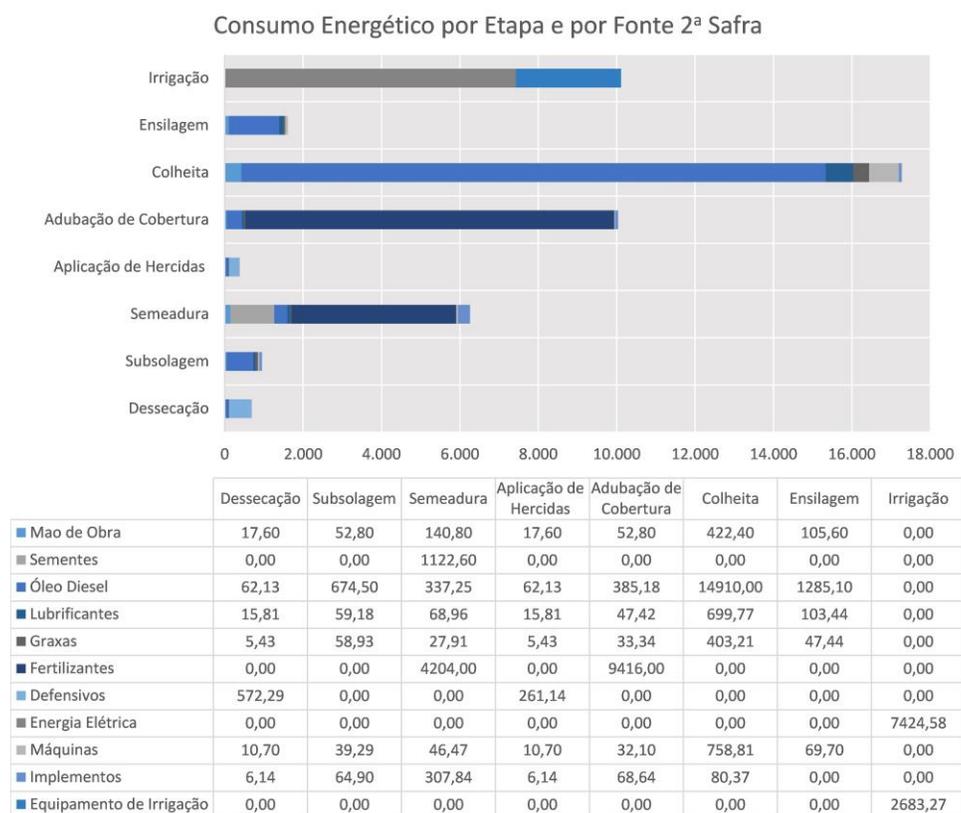
Os defensivos agrícolas representaram uma pequena parcela das etapas de dessecação e da aplicação de herbicidas. Apesar dos altos coeficientes energéticos (TABELA 3.2), o seu uso é feito em pequenas doses o que resultou em um consumo de $572,29$ e $261,14 \text{ MJ ha}^{-1}$, nas etapas de dessecação e aplicação de Defensivos, respectivamente.

A mão de obra e a energia indireta das máquinas e implementos estiveram presentes em praticamente todas as etapas, mas a participação dessas fontes não ultrapassou os 7%.

O perfil da participação das diferentes fontes no consumo energético de cada etapa da cultura do milho da 2ª safra (FIGURA 4.5) foi semelhante ao da 1ª safra (FIGURA 4.4). A principal diferença foi encontrada na irrigação, onde a eletricidade consumida aumentou de $4.949,72 \text{ MJ ha}^{-1}$ para $7.424,58 \text{ MJ ha}^{-1}$.

Em consequência do aumento do número de dias de irrigação, essa etapa passou a consumir mais energia que a adubação de cobertura e a semeadura.

Figura 4.5 – Participação das Fontes de Energia em Cada Etapa da Cultura do Milho para Silagem - 2ª Safra.



Fonte: Do autor (2017).

4.5 Poder Calorífico e Energia de Saída

A energia de saída foi computada através da relação entre a produtividade da cultura e o coeficiente energético da silagem produzida, e os resultados são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Obtenção da Energia de Saída da Silagem do Milho para 1^a e 2^a Safra.

	1^a Safra	Unidade	2^a Safra	Unidade
Coeficiente Energético	19,0644	MJ kg ⁻¹	18,4849	MJ kg ⁻¹
Produtividade	60.000	kg ha ⁻¹	72.000	kg ha ⁻¹
Saída de Energia	1.143.864	MJ ha ⁻¹	1.330.914	MJ ha ⁻¹

Fonte: Do autor.

O coeficiente energético da silagem do milho foi obtido através dos resultados da análise do Poder Calorífico Superior (PCS) realizados nas amostras retiradas do silo. O valor médio do PCS obtido foi de 19,06 MJ kg⁻¹ e de 18,48 MJ kg⁻¹ para a 1^a e 2^a safra, respectivamente.

A cultura alcançou uma produtividade de 60 ton ha⁻¹ para a 1^a safra e de 72 ton ha⁻¹ para a 2^a safra. Pode-se observar que na 2^a safra a produtividade foi 20% superior que na 1^a safra. Isso porque a cultura fica submetida a um fotoperíodo maior devido à época do ano em que foi cultivada (fevereiro a maio).

Devido aos altos níveis de produtividade alcançados, a saída de energia foi de 1.143,8 GJ ha⁻¹ para a 1^a safra e de 1.330,9 GJ ha⁻¹ para a 2^a safra. Os valores de energia de saída foram muito maiores do que aqueles encontrados por: (ZANINI et al., 2003; KOMLEH et al., 2011; MARTINS et al., 2015; LIN et al., 2016)

Martins et al. (2015) e Lin et al. (2016), que não consideram culturas irrigadas, obtiveram uma energia de saída de 140,1 GJ ha⁻¹ e 345 GJ ha⁻¹, respectivamente. Ambos autores utilizaram coeficientes energéticos para a silagem próximos aos encontrados neste trabalho (17,32 MJ kg⁻¹ e 19 MJ kg⁻¹).

Por outro lado, a produtividade encontrada foi da ordem de 8 ton ha^{-1} e 18,8 ton ha^{-1} , respectivamente.

Já os autores como Zanini (2003) e Komleh et al. (2011), que consideram culturas irrigadas, obtiveram saídas de energia de 206,7 GJ ha^{-1} e 148,4 GJ ha^{-1} , que também são muito inferiores às encontradas neste trabalho. Entretanto, a cultura analisada por esses autores apresentou uma produtividade de 10,6 ton ha^{-1} e 18,5 ton ha^{-1} , respectivamente.

Sabe-se que a alta produtividade alcançada não está relacionada somente ao uso da irrigação, e outros fatores também devem ser considerados, como: a adubação nitrogenada, o híbrido de milho utilizado, o manejo, o espaçamento do plantio, entre outros. O impacto desses fatores na produtividade da cultura do milho foi avaliado por: (TURGUT et al., 2005; CARMI et al., 2006; DEMÉTRIO et al., 2008; PAVINATO et al., 2008; ISLAM; GARCIA; HORADAGODA, 2012; JORDAN et al., 2012).

4.6 Balanço Energético e Eficiência Energética

O balanço energético e a eficiência da cultura do milho para silagem irrigada por pivô central foram obtidos através dos dados de entrada e saída de energia e são apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Resultados Finais da Análise Energética da Cultura do Milho para Silagem.

Energia (MJ ha⁻¹)		
	1 ^a Safra	2 ^a Safra
Entrada de Energia	45.644	47.304
Saída de Energia	1.143.864	1.330.914
Balço Energético	1.098.220	1.283.610
Eficiência Energética	25,1	28,1

Fonte: Do autor.

Como consequência da alta produtividade, a cultura analisada apresentou um balanço energético muito positivo, com uma energia líquida de 1.098,2 GJ ha⁻¹ e 1.283,6 GJ ha⁻¹, resultando em uma eficiência energética de 25,1 e 28,1 para a 1^a e 2^a safra, respectivamente.

Os resultados encontrados são considerados elevados se comparados com outros da literatura (TABELA 2.10). A cultura analisada por Martins et al. (2015) apresentou uma entrada de energia cerca de 3 vezes menor do que a deste trabalho. Entretanto, a produtividade foi significativamente inferior, resultando em uma eficiência energética 9,69 (espaçamento de 0,6m).

Já os resultados apresentados por Lin et al. (2016) retrataram uma eficiência energética de 20,4 e 33,5, para a silagem de milho em fazendas convencionais e para sistemas agroflorestais, respectivamente. O alto coeficiente energético alcançado para os sistemas agroflorestais foi justificado pelos autores pelo menor consumo de energia deste tipo de sistema.

De uma maneira geral, pode-se dizer que a cultura do milho para silagem avaliada neste trabalho apresentou resultados positivos de balanço

energético. Apesar dos grandes valores de entrada de energia e de ser considerada uma cultura altamente mecanizada, o sistema apresentou níveis de produtividade muito bons ($>60 \text{ ton ha}^{-1}$). Os resultados encontrados podem ser justificados pelos seguintes fatores:

- uso de um híbrido de milho adequado, mais resistente a pragas e doenças, que reduz significativamente o consumo de energia com defensivos agrícolas e aumenta a produtividade (ROMANELLI; NARDI; SAAD, 2012);
- adoção de um manejo que elimina as etapas de gradagem e aração e mantém apenas a etapa de subsolagem devido à compactação do solo durante a colheita (cultivo mínimo) (CUNHA et al., 2015);
- uso de máquinas adequadas a cada etapa e operadores capacitados para manter padronização do processo;
- uso de sistemas de irrigação por pivô central, que apesar de impactar no consumo de energia contribui significativamente para o aumento da produtividade (JORDAN et al., 2012);
- escolha do espaçamento 0,6m que otimiza a produção de matéria seca por hectare e confere maior eficiência energética (MARTINS et al., 2015).

Ainda assim, a cultura avaliada pode alcançar melhores índices de eficiência energética ao investir em manejos que otimizem o consumo de fertilizantes químicos e estratégias para economia de energia elétrica e combustíveis, tais como:

- utilização de adubos orgânicos em substituição aos fertilizantes químicos (FERRO et al., 2017);

- redução do uso de fertilizantes nitrogenados através da rotação de culturas (CAMPOS, 2001);
- automação do sistema de irrigação e o uso de inversores de frequência visando otimizar o consumo de energia elétrica (MORAES et al., 2014);
- estratégias para redução do consumo de óleo diesel, principalmente nas etapas de colheita e transporte.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma análise do balanço energético da cultura do milho para silagem sob irrigação de pivô central. A cultura avaliada foi implantada no Centro de Desenvolvimento e Transferência de Tecnologia da Universidade Federal de Lavras (CDTT-UFLA) e os dados da 1^a e 2^a safra do ano agrícola de 2014/2015 foram avaliados.

A matriz energética mostrou que a cultura consumiu 45.643,85 MJ ha^{-1} e 47.303,60 MJ ha^{-1} de energia na 1^a e 2^a safra. Desta energia, aproximadamente 92% é proveniente de fontes de energia direta. A energia indireta das máquinas, implementos e dos equipamentos de irrigação teve uma participação menor na matriz, cerca de 8%.

Dentre as fontes de energia direta, o óleo diesel se destacou com uma participação de aproximadamente 37% na matriz. Os fertilizantes químicos e a energia elétrica empregada na irrigação também apresentaram participação significativa na entrada de energia total da cultura.

Os resultados também mostraram que a irrigação representou 14,76% e 21,37% da matriz energética do milho (6738,57 MJ ha^{-1} e 10107,86 MJ ha^{-1}), mas, juntamente com outros fatores, permitiu que o sistema alcançasse níveis de produtividade maiores que 60 ton ha^{-1} .

De uma maneira geral, pode-se dizer que a cultura do milho para silagem avaliada neste trabalho apresentou resultados positivos de balanço energético (1.098,2 GJ ha^{-1} e 1.283,6 GJ ha^{-1}). Os grandes valores de entrada de energia foram compensados pela boa capacidade de conversão do sistema, revertendo em uma saída de 1.143,9 e 1.330,9 GJ ha^{-1} . Esses resultados levaram a cultura a uma eficiência energética de 25,1 e 28,1 para a 1^a e 2^a safra, respectivamente.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 8633: Carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro: **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 1984. 13 p.

ALBUQUERQUE, P. E. P. de et al. **Uso eficiente da água de irrigação e da energia elétrica em cultura de milho sob pivô central num plantio comercial em Várzea da Palma, MG**. XXVIII Congresso Nacional de Milho e Sorgo, p. 3209–3215, 2010.

ALLUVIONE, F. et al. **Eue (energy use efficiency) of cropping systems for a sustainable agriculture**. Energy, 2011.

ALMEIDA, L. C. F. de. **Avaliação Energética Econômica da Cultura do Milho em Assentamento Rural, Iperó-SP**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista - UNESP (Botucatu), 2007.

ANGONESE, A. R. et al. Eficiência energética de sistema de produção de suínos com tratamento dos resíduos em biodigestor. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 3, 2006.

ASSENHEIMER, A.; CAMPOS, A. T.; JÚNIOR, A. C. G. Análise energética de sistemas de produção de soja convencional e orgânica. **Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 5, n. 3, 2009.

BANAEIAN, N.; ZANGENEH, M. **Study on energy efficiency in corn production of iran**. Energy, 2011.

BERNARDES, T. F. **Levantamento das Práticas de Produção e Uso de Silagens em Fazendas Leiteiras no Brasil**. Departamento de Zootecnia: Universidade Federal de Lavras, 2012.

BIAGGIONI, M. A. M.; BOVOLENTA, F. C. Balanço energético comparativo das rotas de escoamento de soja. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 4, jul./ago. 2010.

BRASIL. Custos de Produção Agrícola: A metodologia da CONAB. 2010. **Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB)**, Brasília.

BRASIL. **Balanço Energético Nacional**. Ministério de Minas e Energia Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE). 2016.

BRASIL. Evolução do consumo aparente de N, P, K e total de NPK no Brasil. 2017. International Plant Nutrition Institute (IPNI). Disponível em: <<http://brasil.ipni.net/article/BRS-3132#evolucao>>. Acesso em: 18/04/2017.

BRASIL. **Safra Mundial de Milho 2016/17 - 11º Levantamento do USDA**. 2017. Informativo DEAGRO (Departamento do Agronegócio) - FIESP.

BRASIL. Séries Históricas de Área Plantada, Produtividade e Produção, Relativas às Safras 1976/77 a 2015/16 de Grãos. 2017. Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&ordem=produto&Pagina_objcmsconteudos=3>. Acesso em: 25/04/2017.

BUENO, O. de C. **Análise Energética e Eficiência Cultural do Milho em Assentamento Rural**, Itaberá/SP. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista - UNESP (Botucatu), 2002.

CAMPOS, A. T. **Balanco Energético Relativo à Produção de Feno de "coast-cross" e Alfafa em Sistema Intensivo de Produção de Leite**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista, 2001.

CAMPOS, A. T.; CAMPOS, A. T. Balanços energéticos agropecuários: Uma importante ferramenta como indicativo de sustentabilidade de agroecossistemas. **Ciência Rural**, v. 34, n. 6, p. 1977–1985, nov-dez 2004.

CAMPOS, A. T. et al. Análise energética da produção de soja em sistema plantio direto. **Global Science Technology**, v. 2, n. 2, 2009.

CAMPOS, A. T. et al. **Balanco energético e sustentabilidade na produção de silagem de milho**. Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural., 2004.

CARMI, A. et al. Effects of irrigation and plant density on yield, composition and in vitro digestibility of a new forage sorghum variety, tal, at two maturity stages. **Animal Feed Science and Technology**, v. 131, 2006.

CARMO, H. F. do et al. Balanco energético e pegada de carbono nos sistemas de produção integrada e convencional de feijão-comum irrigado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, 2016.

CARVALHO, I. Q. de. **Tecnologia da Produção de Silagem de Milho em Sistemas de Produção de Leite**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Maringá, 2013.

COMITRE, V. **Avaliação Energética e Aspectos Econômicos da Filière soja na Região de Ribeirão Preto - SP**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, 1993.

COMITRE, V. A questão energética e o padrão tecnológico da agricultura brasileira. **Informações Econômicas**, v. 25, n. 12, dez 1995.

CRUZ, J. C. et al. (Ed.). Milho: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília, DF: **Embrapa Informação Tecnológica**, 2011. v. 1.

CUNHA, J. P. B. et al. A demanda energética de diferentes manejos de solo no cultivo de milho. **Bioscience Journal**, v. 31, n. 3, 2015.

DEMÉTRIO, C. S. et al. Desempenho de híbridos de milho submetidos a diferentes espaçamentos e densidades populacionais. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 43, n. 12, 2008.

DIOTTO, A. et al. Embodied energy associated with the materials used in irrigation systems: Drip and centre pivot. **Biosystems engineering**, 2014.

DIOTTO, A. V. **Demanda de Energia no Sistema de Produção do Pinhão-Manso (*atropa Curcas L.J*) Irrigado**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2013.

FERRO, N. D. et al. Crop yield and energy use in organic and conventional farming: A case study in north-east italy. **European Journal of Agronomy**, 2017.

FRIGO, M. S. et al. Custos energéticos do agroecossistema pinha-manso e milho: Comparativo entre sistema de condução sequeiro e o irrigado. **Revista Energia na Agricultura**, v. 26, n. 3, 2011.

GOMES, E. P. et al. Análise econômica e viabilidade energética da cultura do feijoeiro comum sob irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 8, 2013.

GRANDO, M. S. **Estudo sobre Eficiência Energética em uma Propriedade de Produção Agrícola. 2013.** Monografia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

HOUSHYAR, E. et al. Sustainable and efficient energy consumption of corn production in southwest iran: Combination of multi-fuzzy and dea modeling. **Energy**, 2012.

ISLAM, M. R.; GARCIA, S. C.; HORADAGODA, A. Effects of irrigation and rates and timing of nitrogen fertilizer on dry matter yield, proportions of plant fractions of maize and nutritive value and in vitro gas production characteristics of whole crop maize silage. **Animal Feed Science and Technology**, v. 172, 2012.

JASPER, S. P. et al. Análise energética da cultura do cambre (crambe abyssinica hochst) produzida em plantio direto. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 3, mai./jun. 2010.

JORDAN, R. A. et al. Impacto energético da irrigação por gotejamento no cultivo de mamona. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 4, 2012.

JUNIOR, A. A. M.; BUENO, O. D. C. Participação da energia fóssil na produção dos fertilizantes industriais nitrogenados com Ênfase na ureia. **Revista Energia na Agricultura**, v. 30, n. 4, 2015.

JUNIOR, G. de F.; SCOLOWSKI, J. C.; FANTI, O. D. J. **Considerações sobre as tecnologias e a evolução da indústria de fertilizantes nitrogenados.** Anais do Simpósio Sobre Fertilizantes na Agricultura Brasileira, Brasília: EMBRAPA-DEP,, v. 52, p. 21–71, 1984.

JUNIOR, L. A. F. **Proposição de método de avaliação de sistemas de produção e de sustentabilidade.** Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura "Luiz Queiroz", 1999.

KOMLEH, S. P. et al. Energy use and economic analysis of corn silage production under three cultivated area levels in tehran province of iran. **Energy**, 2011.

LIN, H.-C. et al. Effects of changing farm management and farm structure on energy balance and energy-use efficiency—a case study of organic and conventional farming systems in southern germany. **European Journal of Agronomy** - Online, 2016.

LOCKERETZ, W. Energy inputs for nitrogen, phosphorus and potash fertilizers. In: PIMENTEL, D. (Ed.). **Handbook of energy utilization in Agriculture**. Boca Raton: CRC Press, 1980.

MACEDÔNIO, A. C.; PICCHIONI, S. A. Metodologia para o cálculo do consumo de energia fóssil no processo de produção agropecuária. Curitiba: **Secretaria de Estado da Agricultura**, 1985. v. 1.

MARTINS, F. G. L. et al. Análise energética da produção de milho para silagem cultivado em diferentes espaçamentos. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 4, 2015.

MATIOLLI, M. C. **Demanda e Análise Energética em Instalações de Frango de Corte do tipo Darkhouse**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Lavras, 2016.

MEDEIROS, L. F. S. de. **Avaliação da energia Contida nos Principais Sistemas Agrícolas e Industriais da Região Médio Norte do Estado de Mato Grosso 2010**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Mato Grosso, 2010.

MELO, D. de et al. Balanço energético do sistema de produção de soja e milho em uma propriedade agrícola do oeste do Paraná. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v. 29, n. 2, 2007.

MELO, R. de. Um modelo para análise energética de agroecossistemas. **Revista de Administração de Empresas**, São Paulo, v. 4, 1989.

MIRANDA, J. E. de C.; RESENDE, H.; VALENTE, J. de O. **Plantio de Milho para Silagem. 2002**. Comunicado Técnico Embrapa – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

MORAES, M. J. et al. Automação em sistema de irrigação tipo pivô central para economia de energia elétrica. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 6, 2014.

- MORAES, M. J. de et al. Gerenciamento do lado da demanda no bombeamento de água para perímetro irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 9, p. 875–882, 2011.
- PAVINATO, P. S. et al. Nitrogênio e potássio em milho irrigado: análise técnica e econômica da fertilização. **Ciência Rural**, v. 38, 2008.
- PEIXOTO, C. de M. O milho no Brasil, sua importância e evolução. 2014. Disponível em: <<http://www.pioneersementes.com.br/media-center/artigos/165/o-milho-no-brasil-sua-importancia-e-evolucao>>. Acesso em: 25/04/2017.
- PELLIZZI, G. Use of energy and labour in italy agriculture. *Journal Agric. Res.*, v. 52, p. 111–119, 1992.
- PEREIRA, B. M. **Avaliação da Qualidade da Silagem de Híbridos de Milho (Zea Mays. L.) Cultivados no Distrito Federal**. 2013. Monografia – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília, 2013.
- QUEIRÓZ, M. V. B. M. **Balço Energético Da Produção De Sorgo Sacarino em Cultivo Irrigado e Sequeir**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Grande Dourados, 2014.
- RAMOS, M. C. et al. Sustentabilidade na produção de leite: Balço energético em sistema intensivo de produção com visão focada nos processos. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 3, 2014.
- REHMAN, H. Energy Use in Agricultural Productivity. [S.l.]: **Concept Publishing Company**, 2004. 124 p.
- RIQUETTI, N. B.; BENEZ, S. H.; SILVA, P. R. Demanda energética em diferentes manejos de solo e híbridos de milho. **Revista Energia na Agricultura**, v. 37, n. 2, 2012.
- ROMANELLI, T. L. **Modelagem e Balço Energético na Alimentação Suplementar de Bovinos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura "Luiz Queiroz", 2002.
- ROMANELLI, T. L.; MILAN, M. Energy balance methodology and modeling of supplementary forage production for cattle in brazil. **Scientia Agrícola**, v. 62, n. 1, 2005.

ROMANELLI, T. L.; NARDI, H. D. S.; SAAD, F. A. Material embodiment and energy flows as efficiency indicators of soybean (glycine max) production in Brazil. **Engenharia Agrícola**, Joboticabal, v. 32, p. 261–270, 2012.

SÁ, J. M. e et al. Balanço energético da produção de grãos, carne e biocombustíveis em sistemas especializados e mistos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, 2013.

SALLA, D. A. **Análise Energética de Sistemas de Produção de Etanol de Mandioca, Cana-de-Açúcar e Milho**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista, 2008.

SANTOS, O. N. A. **Irrigação e tipos de podas no cultivo do pinhão-manso em Piracicaba, SP**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura "Luiz Queiroz", 2016.

SANTOS, R. R. D.; SIMON, E. J. Análise energética do milho em sistema de plantio direto, no assentamento rural da fazenda de Pirituba, Itaberá/SP. **Revista Energia na Agricultura**, v. 25, n. 1, 2010.

SANTOS, T. M. B.; JÚNIOR, J. D. L. Balanço energético em galpão de frangos de corte. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 1, 2004.

SERRA, G. E. et al. **Avaliação da energia investida na fase agrícola de algumas culturas**. Brasília: Secretaria de Tecnologia Industrial, 1979.

SOUZA, C. V. et al. Análise energética em sistema de produção de suínos com aproveitamento dos dejetos como biofertilizante em pastagem. **Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 4, 2009.

SOUZA, J. L. de et al. Balanço e análise da sustentabilidade energética na produção orgânica de hortaliças. **Horticultura Brasileira**, v. 26, n. 4, 2008.

TEIXEIRA, J. C. Modernização da agricultura no Brasil: Impactos econômicos, sociais e ambientais. **Revista Eletrônica da Associação dos Geógrafos Brasileiros**, v. 2, p. 21–42, 2005.

TURCO, P. H. N. **Rentabilidade Econômica e Dispendios Energéticos nos Sistemas de Café Convencional e Irrigado em Três Municípios na Região de Marília**, São Paulo. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita, Botucatu, 2016.

TURGUT, I. et al. Alternate row spacing and plant density effects on forage and dry matter yield of corn hybrids. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 191, 2005.

ULBANERE, R. C. **Análise dos balanços energéticos e econômicos relativa à produção e perdas de grãos de milho no Estado de São Paulo**. Tese (Doutorado) — Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Botucatu, 1988.

VEIGA, J. P. S. et al. Energy embodiment in brazilian agriculture: an overview of 23 crops. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 6, 2015.

VELOSO, A. V. **Análise Ambiental e Energética de Sistemas de Produção de Suínos com Tratamento de Dejetos Biodigestor**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Lavras, 2014.

YOUSEFI, M. et al. Water, nitrogen and energy use efficiency in major crops production systems in iran. **Advances in Plants and Agriculture Research**, v. 2, n. 3, 2015.

ZANINI, A. et al. Análise do consumo de energia na produção de silagem de milho em plantio direto. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v. 25, n. 2, 2003.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Dados Complementares do Balanço Energético

As tabelas deste apêndice apresentam os dados coletados durante a condução e implantação da cultura do milho para silagem. Estes foram utilizados como base de cálculo das entradas energéticas do sistema. As Tabelas 1 e 2 mostram o tempo de uso das máquinas e implementos agrícolas para cada etapa da cultura para a 1ª e 2ª Safra do ano agrícola de 2014/2015.

Tabela 1 – Tempo de Uso das Máquinas.

Máquina	Etapa	Tempo de Uso (h)	
		1a Safra	2a Safra
Trator Valtra A750	Dessecação	8	8
	Aplicação de Herbicidas	8	8
	Adubação de Cobertura	24	24
	Compactação - Ensilagem	-	48
Trator Valtra BM 100	Subsolagem	-	24
Trator New Holland TL 85 E	Colheita	48	48
Trator Massey Ferguson MF283	Subsolagem	24	-
	Semeadura	32	32
	Colheita	48	48
	Compactação - Ensilagem	48	-
Caminhão Ford Cargo 2428 E	Colheita	48	48
Caminhão Volvo VM270	Colheita	48	48

Fonte: Do autor.

Tabela 2 – Tempo de Uso dos Implementos.

Implementos	Etapa	Tempo de Uso (h)	
Pulverizador de Barras IMEP	Dessecação	8	8
	Aplicação de Herbicidas	8	8
Subsolador Stara Asa Laser KS	Subsolagem	24	24
Semeadora Jumil JM2680 PD	Semeadura	32	32
Aduadora de Cobertura Baldan	Aduação de Cobertura	24	24
Forageira Nogueira Pecu 9004	Colheita	48	48
Forageira JF 192 C12	Colheita	48	48

Fonte: Do autor.

As Tabelas 3 e 4 mostram o consumo de óleo diesel, lubrificante e graxa para cada máquina e etapa da cultura.

Tabela 3 – Consumo de Óleo Diesel, Lubrificante e Graxa 1ª Safra

Etapa	Máquina	Óleo Diesel (l ha⁻¹)	Lub. (l ha⁻¹)	Graxa (kgha⁻¹)
Dessecação	Trator A750	1,75	0,43	0,14
Subsolagem	Trator MF283	19,00	1,42	1,52
Semeadura	Trator MF283	9,52	1,89	0,76
Aplic. de Herb.	Trator A750	1,80	0,43	0,16
Adu. de Cobert.	Trator A750	10,82	1,30	0,86
Colheita	Trator MF283	69,03	2,84	5,52
	Trator TL85E	69,03	2,87	5,52
	Caminhão VM270	141,69	6,73	-
	Caminhão Cargo 2428 E	141,69	6,76	-
Compactação	Trator A750	33,15	2,72	2,45

Fonte: Do autor.

Tabela 4 – Consumo de Óleo Diesel, Lubrificante e Graxa 2^a Safra.

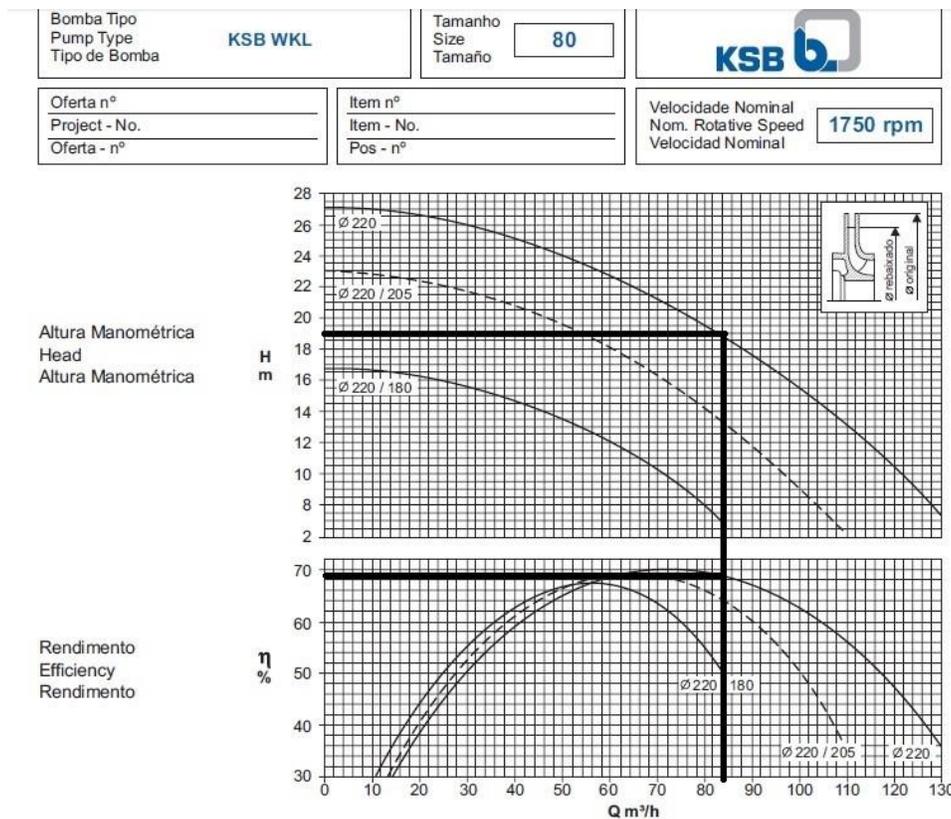
Etapa	Máquina	Óleo Diesel (l ha⁻¹)	Lub. (l ha⁻¹)	Graxa (kg ha⁻¹)
Dessecação	Trator A750	1,75	0,43	0,14
Subsolagem	Trator BM100	19,00	1,62	1,52
Semeadura	Trator MF283	9,50	1,89	0,72
Aplic. de Herb.	Trator A750	1,75	0,43	0,14
Adub. de Cobert.	Trator A750	10,85	1,30	0,86
Colheita	Trator MF283	68,00	2,84	5,20
	Trator TL 85 E	68,00	2,87	5,20
	Caminhão VM270	142,00	6,73	-
	Caminhão Cargo 2428 E	142,00	6,76	-
Ensilagem	Trator MF283	36,20	2,84	1,22

Fonte: Do autor.

APÊNDICE B – Dados Complementares do Sistema de Irrigação

A Figura 1 apresenta as curvas de rendimento e altura manométrica da bomba KSB-WKL 80/6.

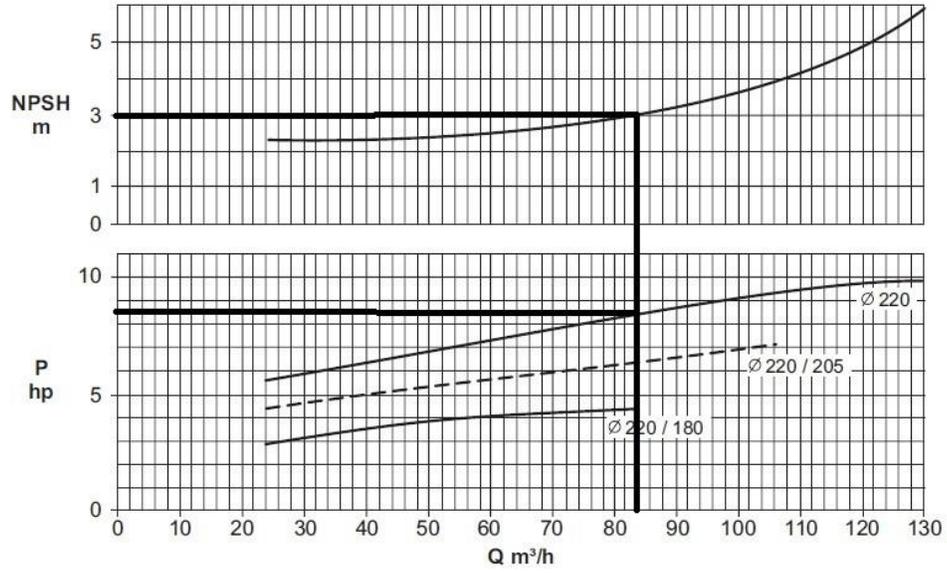
Figura 1 – Curva de rendimento e altura manométrica da bomba KSB-WKL.



Fonte: Do autor (2017)

A Figura 2 apresenta as curvas de NPSH e potência da bomba KSB-WKL 80/6.

Figura 2 – Curva de rendimento e altura manométrica da bomba KSB-WKL.



Fonte: Do autor (2017)