

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

Fluxos de energia de um sistema de produção de soja no Tocantins

Geraldo Cesar Zambrzycki

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

**Piracicaba
2012**

Geraldo Cesar Zambrzycki
Engenheiro Mecânico

Fluxos de energia da cultura de um sistema de produção de soja no Tocantins
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **THIAGO LIBORIO ROMANELLI**

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

**Piracicaba
2012**

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

Zambrzycki, Geraldo Cesar

Fluxos de energia de um sistema de produção de soja no Tocantins / Geraldo Cesar Zambrzycki. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2012.
97 p: il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2012.

1. Balanço de energia 2. Investimentos 3. Mecanização agrícola 4. Soja - Produção
I. Título

CDD 633.34
Z24f

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

À

Minha mãe, Marlene Slivak Zambrzycki (*in memoriam*),
ao meu pai, Thadeu Brasil Zambrzycki (*in memoriam*),
que tão bem souberam ensinar a busca do aprendizado,
conhecimento e os valores de honestidade e
sinceridade, pela dedicação
e esforço para minha formação e incentivo
para sempre seguir em frente.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer a Deus pelas oportunidades de crescimento pessoal durante o longo período do curso, a força e a coragem estabelecida nos momentos difíceis, onde desistir ou mudar o caminho foi à única alternativa, muito obrigada por colocar verdadeiros anjos em meu caminho.

Ao **Prof. Dr. Thiago Libório Romanelli** pela consideração, pela oportunidade de orientação acadêmica, mais ainda no constante desafio, pela busca de conhecimento, aprendizado e firmeza de propostas. Agradeço pelo carinho e a leveza de tornar as dificuldades coisas simples e objetivas, contudo não tirou a oportunidade do aprendizado e da busca individual.

Ao **Prof. Dr. Jose Paulo Molin** pela oportunidade, pelo preparo técnico e científico proporcionado durante este período, que transformaram nosso convívio em uma grande amizade. A este, que na prática nunca deixou de ser meu orientador, fica aqui o meu agradecimento pelos ensinamentos que me espelharei por toda a minha vida. Obrigado pela paciência, dedicação, incentivo, enfim, por fazer parte do meu crescimento profissional e pessoal. MEU RESPEITO e ADMIRAÇÃO!

À **Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**, através do Programa de Pós-graduação em Máquinas Agrícolas pela oportunidade oferecida de realização do curso.

Ao corpo docente do curso de pós-graduação em Máquinas Agrícolas: **Casimiro Dias Gadanha Junior, Marcos Milan, Rubens Duarte Coelho, Sérgio Nascimento Duarte, Tomaz Caetano Cannavam Ripoli e Walter Francisco Molina Júnior**, que com seus conhecimentos contribuíram para o meu crescimento profissional e humano.

Aos Professores componentes da Comissão Examinadora, que apresentaram valiosas sugestões, visando enriquecer a pesquisa.

Aos funcionários da Biblioteca Central, em especial a bibliotecária **Eliana Maria Garcia**, que me auxiliou a passar por mais esta etapa em minha vida.

Aos companheiros de turma **André, Antonio, Carla, Carlos, Cilene, Diego, Edemilson, Eloy, Evandro, Franz, João, Luciano, Neisvaldo, Nelson, Ranieri e Samir.**

Talvez a dissertação não tenha dado os resultados esperados inicialmente enquanto “sonho” inicial, mas tenho a convicção que aprendi muito durante o percurso, a trajetória longa e cheia de medos, inseguranças e principalmente desafios pessoais. Entretanto as oportunidades também foram imensas, como bênção conheci pessoas únicas, cheias de luz própria, que foram verdadeiros exemplos para a minha vida. Obrigado a cada uma delas. Enfim, agradeço a todos aqueles que contribuíram durante este período e que, de alguma forma contribuíram para a minha formação.

Muito Obrigado...

EPÍGRAFE

“Embora ninguém possa voltar
atrás e fazer um novo começo,
qualquer um pode começar agora
e fazer um novo fim”.

Chico Xavier

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	15
1 INTRODUÇÃO	17
2 DESENVOLVIMENTO	21
2.1 Revisão Bibliográfica	21
2.1.1 A soja no Mundo	21
2.1.2 A Soja no Brasil	23
2.1.3 A Soja no Tocantins	25
2.1.4 Caracterização da cultura da soja	27
2.1.5 Exigências climáticas da soja.....	28
2.1.6 Exigência hídrica da Soja.....	29
2.1.7 Panorama energético nacional e a agricultura moderna	30
2.1.8 A energia e os sistemas agrícolas.....	33
2.1.9 Tipos de energia.....	35
2.1.10 O perfil energético da agricultura brasileira	38
2.1.11 O perfil energético da cultura da soja	39
2.1.12 Análise energética em sistemas agrícolas	42
2.1.13 Subirrigação	44
2.2 Material e Métodos.....	46
2.2.1 Caracterização do cenário.....	46
2.2.2 Descrições do conjunto de operações.....	47
2.2.2.1 Gradagem	50
2.2.2.2 Adubação a lanço.....	51
2.2.2.3 Incorporação	51
2.2.2.4 Rolagem	51
2.2.2.5 Semeadura e adubação	52
2.2.2.6 Aplicação de defensivos.....	52
2.2.2.7 Colheita	52
2.2.2.8 Subirrigação	53
2.3 Variáveis selecionadas para a produção de soja	54
2.3.1 Mão-de-obra.....	54
2.3.2 Sementes	55
2.3.3 Fertilizantes	55

2.3.4 Defensivos	56
2.3.5 Máquinas e equipamentos.....	57
2.3.6 Combustíveis e lubrificantes	58
2.3.7 Subirrigação.....	58
2.4 Determinação da energia consumida	59
2.5 Determinação da energia produzida (EP).....	60
2.6 Cálculo do balanço energético do sistema de produção agrícola.....	60
2.7 EROI	61
2.8 Balanço de Energia (BE)	62
2.9 Eficiência Cultural (EfC).....	62
2.10 Energia Incorporada (EI).....	63
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
3.1 Apresentação e discussão da matriz energética calculada em comparação com os cenários nacionais	72
4 CONCLUSÕES.....	83
REFERÊNCIAS.....	85

RESUMO

Fluxos de energia de um sistema de produção de soja no Tocantins

A soja é o principal produto do agronegócio do país tanto em volume como em geração de renda, sendo que vários fatores têm contribuído para seu bom desempenho, entre os quais podemos citar a adaptabilidade de cultivares às diferentes regiões produtoras. Existe uma questão mundial relacionada aos recursos naturais não renováveis, onde se buscam alternativas para prolongar o acesso a tais recursos. Grande parte dos insumos envolvidos na cultura da soja é proveniente de energia fóssil, configurando dependência e vulnerabilidade do seu sistema produtivo. Num sistema de produção agrícola, a demanda de energia é um dos aspectos mais preocupantes. Nesse sentido, a análise dos fluxos de energia, desenvolvida nos anos 1970 e posteriormente difundida em análises do ciclo de vida (ACV), tem sido uma ferramenta utilizada em estudos de viabilidade energética e a sustentabilidade de sistemas agrícolas, a partir da mensuração das entradas e saídas de energia direta e energia embutida nos insumos e produtos. O objetivo desse trabalho foi mensurar o fluxo de energia do cultivo de soja em sistema reduzido de preparo do solo de uma propriedade agrícola, no município de Lagoa da Confusão, TO. Consideraram-se dois tipos de energia que entram no sistema: a direta e indireta. Como energia direta foi considerada: a biológica, que corresponde à mão de obra e sementes; e a fóssil que inclui óleo diesel, lubrificante e graxa. Como energia indireta foi considerada: a de origem industrial, que inclui máquinas e implementos, fertilizantes, defensivos e energia elétrica. Os coeficientes energéticos foram obtidos em referências sobre a quantificação energética das operações e dos insumos. A produtividade obtida foi de 58,45 GJ ha⁻¹. O maior consumo de energia foi na categoria industrial (4,34 GJ ha⁻¹), seguida pela energia fóssil (1,83 GJ ha⁻¹) e energia biológica (1,81 GJ ha⁻¹). A eficiência energética consiste na racionalização do uso das fontes de energia, ou seja, no gasto de menos energia para fornecer a mesma quantidade de valor energético no produto final. Verificou-se a lucratividade energética, razão de energia líquida disponibilizada e demandada (EROI) com 5,13. O Balanço Energético que indica o ganho absoluto e a intensidade energética, que atribui o conteúdo energético por unidade física de produto foi de 48,91 GJ ha⁻¹. Porém, apesar da alta eficiência e lucratividade, constatou-se que esse sistema é altamente dependente do uso de energia não renovável, representada pelo consumo de óleo diesel, fertilização e defensivos, totalizando 6,79 GJ ha⁻¹ (71,25%) do total da energia consumida. Assim, avanços na redução do custo energético trazem à tona a questão dos nutrientes e consumo de combustível. A matriz energética possui um baixo índice na utilização de energia biológica na produção da cultura. A utilização dessa energia pode diminuir a dependência de sistemas agrícolas, por fontes de energias não renováveis. Sendo assim, acreditamos que o grande desafio para produtores e pesquisadores seja como equilibrar essas necessidades.

Palavras-chave: *Glycine max* (L.); Fluxo material; Balanço energético; EROI

ABSTRACT

Energy flow of a system of soybean production in Tocantins state Brazil

Soybean is the main product of agribusiness in the country both in volume and in income generation, being that several factors have contributed to its good performance, among which we can mention the adaptability of cultivars at different producing regions. There is a global issue related to non-renewable natural resources, where to seek alternatives to extend the access to such resources. Most of the inputs involved in culture of soy are from fossil energy, configuring your system's vulnerability and dependency. A system of agricultural production, the demand for energy is one of the most worrying aspects. In this sense, the analysis of energy flows, developed in the years 1970 and later pervasive in life cycle analysis (LCA), has been a tool used in feasibility studies for energy and sustainability of agricultural systems, from the measurement of direct energy inputs and outputs and inline power in inputs and products. The aim of this study was to measure the energy flow of soybean cultivation in reduced system of tillage of agricultural land in the municipality of Lagoa da Confusão, TO. Found two types of energy entering the system: direct and indirect. How to direct energy was considered: biological, which corresponds to labour and seeds; fossil and that includes diesel fuel, lubricant and grease. As indirect energy was considered: the industrial source, which includes machinery and implements, fertilizers, pesticides and electricity. The energy coefficients were obtained in references on the quantification of energy inputs and operations. Productivity retrieved was 58.45 GJ ha^{-1} . The highest consumption of energy was in the category industrial (4.34 ha GJ^{-1}), followed by fossil energy ($\text{GJ } 1.83 \text{ ha}^{-1}$) and biological energy ($\text{GJ } 1.81 \text{ ha}^{-1}$). Energy efficiency is the rational use of energy sources, i.e. spending less energy to provide the same amount of energy in the final product. There was energy, profitability ratio net energy available and defendant (EROI) with 5.13. The Energy Balance indicates absolute gain and energy intensity, which assigns the energy content per unit product physics was 48.91 GJ ha^{-1} . However, despite the high efficiency and profitability, it was found that this system is highly dependent on the use of non-renewable energy, represented by the consumption of diesel oil, fertilization and pesticides, totaling 6.79 GJ ha^{-1} (71.25%) of the total energy consumed. So, advances in reducing the energy cost bring to the fore the question of nutrients and fuel consumption. The energy matrix has a low energy use in organic production of culture. The use of this energy can decrease the dependency of agricultural systems, by non-renewable energy sources. Therefore, we believe that the great challenge for producers and researchers is how to balance those needs.

Keywords: *Glycine max* (L.); Material flow; Energy balance; EROI

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ACV – Análise do Ciclo de Vida
- ADAPEC – Agência de Defesa Agropecuária do Tocantins
- BE – Balanço energético
- BEN – Balanço Energético Nacional
- CcO – Capacidade de Campo Operacional
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento
- DEE – Demanda Específica de Energia
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- EC – Energia Consumida
- EI – Energia Incorporada
- EP – Energia Produzida
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética
- EROI - Energy return over investment
- FAO – Food and Agriculture Organization
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IEA – Instituto de Economia Agrícola
- OIE – Oferta Interna de Energia
- PDE – Plano Decenal de Expansão de Energia
- RR – Roundup® Ready
- RURALTINS – Instituto Rural do Tocantins
- SEAGRO – Secretaria da Agricultura, da Pecuária e do Desenvolvimento Agrário.
- SPD – Sistema de plantio direto
- TEP – tonelada equivalente de petróleo (44,47 GJ)
- USDA - Departamento de Agricultura dos Estados Unidos

1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história, o desenvolvimento do uso das fontes de energia mostra que, após um longo período de domínio da lenha, foi a aplicação do carvão mineral para a geração de vapor que impulsionou os primórdios da revolução industrial no século XVIII. A partir da industrialização, estabeleceu-se uma nova economia, baseada em alto consumo de recursos não renováveis.

A utilização do petróleo, em seguida, proporcionou ainda maior facilidade de conveniência e uso, derrubando até mesmo as oportunidades que se abriram na revolução industrial para os cereais de alto potencial energético, como no caso a utilização do biodiesel. No início do século XX, o petróleo dominou o cenário e promoveu uma grande revolução dos usos e costumes de que se teve registro na história da humanidade. Os avanços tecnológicos e mobilidade foram o alicerce do processo hoje consolidado de globalização.

O desenvolvimento da agricultura sempre esteve associado a capacidade do homem em aplicar energia para cultivar a terra. O uso da máquina a vapor, do motor de combustão interna e do motor elétrico acentuou o uso da energia. Com o desenvolvimento de outros sistemas de produção, a agricultura passou a ser assistida também pela energia incorporada nos fertilizantes, defensivos, combustíveis, cuja produção foi facilitada pela abundância dos recursos naturais. No Brasil, o cenário da agricultura moderna tem passado por profundas transformações que trouxeram aumentos de produtividade de alimentos e matérias-primas, com a intensificação da utilização de recursos não renováveis de energia para incrementar os processos produtivos.

Entretanto, esse modelo de produção é pouco adequado para corroborar a sustentabilidade ambiental do século XXI. Como o esgotamento progressivo das reservas mundiais de petróleo é uma realidade cada vez menos contestada, a produção agrícola pode encontrar-se dependente de recursos caros e escassos. O homem necessita administrar com mais eficiência os processos de geração e uso da energia. É imprescindível que as futuras gerações se tornem menos dependentes de energia fóssil, alcancem maior eficiência na utilização com o uso de fontes de energia renováveis no processo de recuperação da fertilidade dos solos, tendo em contrapartida a crise alimentar.

De acordo com o cenário traçado pelo Instituto Internacional de Economia – IEA (2003), a demanda projetada de energia no mundo sofrerá um acréscimo 1,7% ao ano, e 2000 a 2030, quando atingirá o patamar de 15,3 bilhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep) por ano. Sem que as demais variáveis no sistema sejam alteradas na matriz energética mundial, os combustíveis não renováveis irão representar 90% da matriz energética, projetado na demanda mundial até 2030.

Com base na matriz energética mundial que tem participação de 80% de fontes de carbono fóssil, sendo 36% de petróleo, 23% de carvão mineral e 21% de gás natural. O Brasil tem destaque entre as economias industrializadas pela elevada participação das fontes renováveis em sua matriz energética 45,5% (Balanço Energético Nacional - BEN, 2011), isso se deve pelo auxílio da natureza, com uma bacia hidrográfica contando com vários rios de planalto, fundamental a geração de eletricidade (14%), e o fato de ser o maior país tropical do mundo, um diferencial positivo para a produção de energia de biomassa (23%). Entretanto, ele tem sua matriz energética fundamentada na utilização massiva de energia derivada do fóssil nos processos produtivos.

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN, 2010), o consumo brasileiro de energia em 2010 atingiu 226,09 milhões de toneladas equivalentes de petróleo, e o consumo de energia por habitante foi de 1,42 tep por habitante. Os 226,09 milhões de tep consumidos pelo Brasil em 2010 correspondem a 83,48% da Oferta Interna de Energia – OIE, sendo um consumo 3,4 vezes superior ao verificado em 1970.

O estudo da energia utilizada em sistemas de produção agrícolas constitui importante fator para a avaliação deste sistema, considerando a preocupação com a relação energética entre o que está sendo consumido e o que está se produzindo. Este tipo de estudo possibilita mensurar os processos materiais e equipamentos de maior consumo energético, apontando opções de minimizar a sua demanda.

Determinar a melhor estratégia de manejo das culturas à dinâmica de interações do sistema solos- plantas no planejamento e condução no cultivo da soja vem sendo o maior desafio dos pesquisadores. No entanto, depende da análise das condições ambientais específicas, bem como, tem de ser repensada a partir da matriz de custo energético e econômico. Torna-se de vital importância que a análise de fluxo de energia não seja uma mera aprovação do balanço energético, mas, a medida que novos tratamentos culturais sejam implantados ajudem a elucidar as evidências dos excessivos gastos de energia nos processos produtivos atuais. A

análise da energia deve representar igual importância para o planejamento da atividade agrícola, juntamente com a análise econômica, por conseguinte, sendo a que traduza de melhor forma a finitude dos recursos naturais nos processos produtivos.

O Cerrado brasileiro a partir dos anos 1970 é a grande fronteira agrícola nacional. É a região em que mais cresce a produção de grãos e é visto como o grande potencial agropecuário do país. Governo e iniciativa privada têm investido muito nas terras do Cerrado. A produção de soja vem crescendo a cada ano. Atualmente, o Cerrado produz cerca de 50% da produção de soja nacional, alcançando produtividades superiores a dos estados do sul e a média nacional.

Na região Sul do Tocantins existem grandes perímetros irrigados, como o de Lagoa da Confusão e Formoso do Araguaia, sendo a soja cultivada no período de entressafra (junho-setembro), em condições de várzea irrigada sob-regime de subirrigação. A ausência de chuvas, aliada a baixa umidade relativa do ar e a baixa temperatura noturna, tem possibilitado a obtenção de sementes de alta qualidade. Carece, no entanto, de adequação de tecnologias, como a escolha de materiais genéticos adaptados às condições edafoclimáticas da referida região.

Portanto, em face de potencialidade e expressão econômica que a soja representa para o Cerrado, a importância da pesquisa desse sistema de produção deve-se a necessidade de dados, além da produtividade obtida e pela relação custo marginal pelo lucro marginal, observando outras variáveis e critérios capazes de identificar sua demanda total e eficiência refletida pelo ganho líquido de energia e pela relação saída/entrada, além, da quantidade necessária para produzir um quilograma de produto.

Com a finalidade de aumentar a eficiência na utilização de insumos energéticos na agricultura tropical, procurou-se estimar o custo energético (MJ ha^{-1}) das principais operações agrícolas.

O objetivo do estudo é avaliar a produção de soja quanto a demanda e disponibilização de energia em um sistema de várzea tropical no estado do Tocantins.

2 DESENVOLVIMENTO

Nesse trabalho determinaram-se os fluxos de energia em um sistema de produção de soja no estado do Tocantins, durante o seu ciclo produtivo. Para a determinação dos fluxos de energia, primeiramente foram mensurados os insumos inseridos no sistema.

2.1 Revisão Bibliográfica

2.1.1 A soja no Mundo

A soja (*Glycine max (L.) Merrill*)(*Fabaceae*) tratando-se de uma planta nativa da Ásia, tem como centro de origem uma região de clima temperado a leste da China, conhecida como a antiga Manchúria entre latitudes de 30° a 45° N (MUNDSTOCK; THOMAS, 2005). Com fundamento em programas de melhoramento genético, atualmente é cultivada em todos os continentes, possui ampla adaptabilidade aos climas tropicais e temperados e características agrônomicas importantes, como tolerância à seca, ao frio e calor. É uma leguminosa de ciclo anual (90 a 160 dias), empregada para consumo animal e na alimentação humana, com consumo *in natura* ou em produtos derivados (CAVALETT, 2008).

O grão de soja é o principal oleaginoso produzido no mundo e a segunda principal matéria prima para produção de óleo vegetal, perdendo apenas para o óleo de palma. Seu elevado teor de proteína (40%), de excelente qualidade, tanto para a alimentação animal quanto humana e de óleo (20%) que pode ser usado para diversos fins, especialmente associados com a alimentação humana e a produção de biocombustíveis, além, do elevado rendimento de grãos. De acordo com Magalhães (1998), o principal motivo para a alta demanda da soja no mercado internacional não decorre do aumento do consumo de óleos vegetais em si, mas da crescente demanda de farelo de soja nos países desenvolvidos no mercado internacional. Assim, a condição de subproduto da produção de farelo justifica a expansão do óleo de soja como fonte principal de gorduras vegetais no mercado mundial, segundo o autor.

Entre os anos de 1987 e 2010, enquanto a área mundial com a cultura cresceu 88,6%, a produção foi ampliada em 150,7%. Nesse período, a área passou de 54 milhões para aproximadamente 102 milhões de hectares na safra 2010, já a produção mundial que em 1987 foi de 103,67 milhões, na safra 2010 atingiu a marca de 259,89 milhões de toneladas (LAZZAROTTO; HIRAKURI, 2010).

O consumo mundial de óleos na década de 2000 passou de 91 milhões de toneladas para 145 milhões de toneladas, a perspectiva para a safra 2011/12 é de que a produção mundial de óleos vegetais alcance 151,5 milhões de toneladas, com aumento de 4% em relação a da temporada atual (USDA, 2011), deste total, atualmente 80% é óleo de origem vegetal, os determinantes do aumento de consumo são: crescimento populacional, consumo *per capita*, situação econômica, tendências nos preços dos óleos vegetais e desenvolvimento industrial. Entretanto, há forte tendência de aumento do consumo, ressaltando-se que até o momento, as gorduras de origem vegetal tiveram gradiente de crescimento três vezes maior que a de origem animal (CASTIGLIONI; OLIVEIRA, 2005).

A Tabela 1 mostra os principais produtores de soja (Estados Unidos, Brasil e Argentina), sendo também os principais exportadores. O Brasil mantém há cerca de trinta anos a posição de segundo maior produtor e exportador mundial de soja e derivados, com uma participação de 33% do mercado internacional, sendo que do total exportado, 70% tem destino à Comunidade Europeia, Irã, China, Índia e Holanda (USDA, 2010).

Tabela 1 - Principais países produtores de soja na safra 2010/11

País	Produção (milhões t)	% Total
Estados Unidos	91,4	35,8
Brasil	68,4	26,2
Argentina	54,5	20,7
China	14,5	5,6
Índia	8,7	3,4
Paraguai	7,0	2,7
Canadá	3,5	1,4
Outros	10,7	4,2
Total	255,9	100,0

Fonte: USDA, (2010)

2.1.2 A Soja no Brasil

A cultura da soja atingiu 130 anos de presença no Brasil em 2012. A sojicultura tem se destacado entre as principais culturas anuais pela expansão da área e da produtividade desde o início da década de 1970. Neste ano, a cultura ocupava uma área de aproximadamente 1,3 milhão de hectares no país (SILVA, 1984). Embora a área cultivada com a cultura represente apenas 7,65% da área agropecuária brasileira, algo em torno 21,8 milhões de hectares (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2010; INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2010), no ano de 2010, as exportações de produtos desse complexo representaram 26,64% e 11,28%, respectivamente, das exportações do agronegócio nacional e do País como um todo (BRASIL, 2010). Para a safra 2010/11 há uma projeção de aumento para 23,2 milhões de hectares, uma expansão em percentagem para 38,3% da área com a cultura no país e uma expectativa de produtividade de 2.931 kg ha⁻¹ (IBGE, 2010). Em dados mundiais, ressalta-se que, atualmente, o Brasil participa com cerca de 26,5% e 31,3%, respectivamente, da produção e da exportação de soja em grão (USDA, 2010).

Embora a cultura tenha sido introduzida no Brasil em 1908 por imigrantes japoneses, ela foi, durante várias décadas, uma cultura marginal. Isso porque era explorada, sobretudo, para fornecer alimentos para animais criados em pequenas propriedades rurais do Rio Grande do Sul (LAZZAROTTO; HIRAKURI, 2010). O interesse do governo brasileiro pela expansão na produção da soja fez com que a cultura ganhasse cada vez mais incentivos oficiais. Até meados da década de 1970, toda a produção brasileira de soja era semeada com cultivares e técnicas importadas dos Estados Unidos. Assim, a soja só produzia bem, em escala comercial, na região Sul, onde as cultivares americanas encontrava condições semelhantes a seu país de origem (IGREJA et al., 1988).

Embora seja uma planta originária de clima temperado, a soja adapta-se bem em uma ampla faixa de condições climáticas. Assim, para atender às expansões das regiões produtoras de soja foi criado, em 1975, o Centro Nacional de Pesquisa de Soja, como uma das unidades da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Sua principal missão era desenvolver cultivares adaptada tecnologicamente para as condições de produção brasileira (EMBRAPA SOJA, 2007).

O crescente consumo nos mercados interno e externo deu estabilidade aos preços do produto no mercado, o que incentivou a expansão de áreas produtoras. Pesquisadores da Embrapa Soja criaram a primeira cultivar brasileira, o que permitiu que a soja produzisse nos climas tropical e subtropical, onde antes a planta não se desenvolvia (EMBRAPA SOJA, 2010). No Brasil a soja é cultivada em considerável diversidade de ambientes, desde as altas latitudes (Sudeste e Sul) até baixas latitudes (Centro Oeste, Nordeste e Norte).

Duas tecnologias contribuíram para o desenvolvimento da sojicultura brasileira: um visava ao aumento de produtividade e redução de custos, amplamente utilizado em grandes países produtores, e a outra possibilitou a expansão da área em novas fronteiras agrícolas, com destaque para a agricultura do Cerrado, resultado da interação de modernas tecnologias mecânica, química e biológica específicas para as condições edafoclimáticas dessas regiões. A partir disso, o Cerrado, até então visto como impróprio para a agricultura, influenciada pelo clima, relevo e acidez do solo, iniciou-se uma grande migração para as suas áreas. Nesse sentido, a projeção realizada nas décadas de 1970 e 1980 subestimou a capacidade de crescimento da produção brasileira, por não ter sido considerada a possibilidade do surgimento de inovações tecnológicas destinadas à expansão nessa região (EMBRAPA, 1999).

A partir dos anos 1980, a soja se expandiu para os estados de Goiás, sul do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, Tocantins e Bahia (IGREJA et al., 1988). Atualmente, áreas da Amazônia Legal (região Norte, Mato Grosso e Oeste do Maranhão) também estão sendo alvo do avanço do cultivo de soja (EMBRAPA SOJA, 2010).

O avanço dos sistemas agrícolas de soja na região Norte do Brasil, tem levado o temor de que contribua para acentuar o desmatamento da região Amazônica. Em pesquisas sobre o clima quente e úmido da maior parte da região, favorece a propagação de pragas e fungos, como o *Phakopsora pachyrhizi*, deste modo apenas o sul da Amazônia Legal (que corresponde a 17% de sua área) apresenta possibilidades para que as atividades agropecuárias tenham êxito econômico (GLIESSMANN, 2000).

Entretanto, mesmo que a expansão da cultura não implique em mais um fator de pressão sobre a área de floresta, devem ser analisados os riscos potenciais ao ambiente, como a contaminação de mananciais e alterações nas condições do

solo, advindos do uso intensivo de insumos químicos e máquinas (GUIMARÃES et al., 2008).

Dentre os países produtores de soja, o Brasil é o que possui maior capacidade e disponibilidade de expandir o cultivo de grãos e oleaginosas, seja pelo aumento de tecnologia na produção, seja pelo potencial de expansão da área cultivada para que possa ofertar simultaneamente a crescente demanda nas áreas de alimentos e biocombustíveis (BELDA; SILVA, 2007). Até o final desta década, a agricultura brasileira deverá ultrapassar a produção dos 100 milhões de toneladas, podendo assumir a liderança mundial na produção do grão (VENCATO, 2010).

Em termos de expressão espacial no território brasileiro, de acordo com a CONAB (2010), as principais participações em termos de ocupação de lavoura de soja, o estado de Mato Grosso responde por quase 28% da produção brasileira, com aproximadamente 19 milhões de toneladas, em uma área de 6,4 milhões de hectares, o que resulta numa produtividade média de 3,19 t ha⁻¹ (Tabela 2).

Tabela 2 - Principais estados produtores de soja no Brasil na safra 2009/2010

Estado	Produção (mil t)	%Total
MT	18.772	27,9
PR	13.969	20,7
RS	9.543	14,2
GO	7.528	11,2
MS	4.930	7,3
BA	2.921	4,3
SP	1.575	2,3
Brasil	67.381	100,0

Fonte: CONAB (2010)

2.1.3 A Soja no Tocantins

O estado do Tocantins possui uma área total de 27,8 milhões de hectares, dos quais 50% têm vocação para a produção agrícola (IBGE, 2010). A soja representa a terceira cultura em termos de participação no valor bruto da produção, na safra 2010/11 teve a área plantada de 365,4 mil hectares, 8,8% superior à safra anterior, com produtividade média de 3.100 kg ha⁻¹ com acréscimo de 4,2% em relação à safra passada e produção de 1,1 milhão de toneladas, consolidando assim o estado como o maior produtor de grãos da região Norte do Brasil, responsável por 46% da produção e 39% de área cultivada (CONAB, 2011).

A variabilidade temporal e espacial no rendimento de grãos das principais culturas agrícolas no estado do Tocantins está associada, entre outros fatores, a ocorrência de déficits hídricos pronunciados, no solo. Os déficits hídricos ocorrem, normalmente, durante os meses de junho a setembro, como consequência da inexistência de precipitação pluvial (PELUZIO et al., 2010).

A soja é cultivada no período de entressafra (maio-setembro), em condições de várzea irrigada sob-regime de subirrigação (elevação do lençol freático, de forma a manter o solo com aproximadamente 70% da capacidade de campo, durante todo o ciclo da cultura). A ausência de chuvas, aliada à baixa umidade relativa do ar e à baixa temperatura noturna, tem possibilitado a obtenção de grãos de alta qualidade. Assim, a produção de soja nesse período tem-se tornado altamente viável para os produtores, em razão do preço de mercado da soja, e parte da produção ser comercializada na forma de sementes (PELUZIO et al., 2010).

Dados da SEAGRO (2011) – Secretaria da Agricultura, da Pecuária e do Desenvolvimento Agrário, mostram que no estado do Tocantins somente no vale do Araguaia, mais precisamente à margem direita do rio Javaés, afluente do rio Araguaia, a existência de 1,43 milhão de hectares de várzeas tropicais planas, com elevado teor de matéria orgânica, em ótimas condições de utilização para a irrigação por subirrigação, 36 mil hectares fazem parte dos projetos Formoso do Araguaia e Javaés, abrangendo municípios como Lagoa da Confusão e Formoso do Araguaia. As vantagens, em relação aos demais estados para o cultivo em áreas de várzeas, são a abundância de recursos hídricos, estação chuvosa e condições edafoclimáticas bem definidas, baixo valor relativo das terras, localização estratégica e facilidade de acesso aos mercados (PELUZIO et al., 2010).

A literatura sobre o manejo da soja é extensiva. Entretanto, para a condição de cultivo de soja irrigada em várzea, poucos estudos têm sido realizados para identificar materiais superiores de soja neste período nas condições. São poucas as informações sobre manejo das cultivares mais recentes, e a resposta das plantas ao manejo da subirrigação. É fundamental, portanto, o conhecimento da relação existente entre produtividade de grãos e a resposta morfológica da soja ao manejo da irrigação para a soja cultivada em regiões de baixas latitudes no Brasil.

Nas regiões produtoras de soja no Centro-Oeste e Norte do País, a cultura é produzida principalmente em grandes propriedades (entre 300 e 50.000 hectares), geralmente em um sistema de monocultura com uso intensivo de tecnologia e

recursos externos não renováveis. Nessas grandes fazendas a média de empregos é baixa devido ao elevado grau de mecanização das propriedades (SCHLESINGER et al., 2006).

2.1.4 Caracterização da cultura da soja

Define-se um sistema de produção como sendo as relações intrínsecas entre um conjunto específico de fatores envolvidos num processo produtivo qualquer e a produção física possível de se obter com a tecnologia existente (FERGUSON, 1988).

Guimarães et al. (2008) afirmam que o sistema de produção de uma cultura agrícola está condicionado a vários fatores de interação entre solo, à planta e ao clima, existindo uma relação funcional entre estes fatores e a produção das culturas, característica de cada condição ambiental.

Segundo Costa (2007), a produtividade da cultura de soja é definida pela interação entre o potencial genético das cultivares, o ambiente de produção, manejo e de fatores que interferem na intensidade fotossintética da planta e quanto deste potencial vai ser atingido depende do efeito de fatores limitantes que estarão atuando em algum ponto durante o ciclo. Além do correto preparo do solo, que visa oferecer condições para que a cultura obtenha espaço para a germinação de sementes; ambiente no qual as raízes possam obter umidade e nutrientes; controle das plantas invasoras; uniformidade do terreno e para facilitar o trabalho eficiente da máquina agrícola utilizada no sistema.

A soja é uma cultura exigente quanto a sua nutrição mineral, sendo o nitrogênio o elemento requerido em maior quantidade. Porém, a resposta da adubação nitrogenada não é boa, além de desnecessária, uma vez que a obtenção desse nutriente é por meio da fixação biológica, por rizobactérias; assim, para melhorar a absorção de nitrogênio é necessária a inoculação das sementes com essas bactérias.

Para White (1975), a produção de soja em regiões de clima temperado, como os Estados Unidos, Canadá, Argentina e região Sul do Brasil, dependem de elevado consumo de energia não renovável e pela alta tecnologia utilizada. De acordo com Wilson e Brigstocke (1980), a obtenção desses mesmos produtos em regiões de

clima tropical pode ocorrer com menor consumo de energia em função da elevada fotossíntese.

De acordo com a duração de seu ciclo, as cultivares de soja podem ser classificadas como precoces (até 115 dias), semiprecoces (116 a 125 dias), médias (126 a 137 dias), semitardias (138 a 150 dias) e tardias (> 150 dias) (EMBRAPA, 2007). Contudo, a duração do ciclo pode variar quando a cultura é exposta a diferentes condições de clima, faixas de latitude, altitudes, entre outros (EMBRAPA, 2010).

A cultivar de soja, além do clima, época de semeadura e fertilidade do solo, é decisiva na resposta à densidade de plantas. Esse efeito ocorre em função de particularidades no fechamento das entrelinhas, bem como na altura e no acamamento das plantas. Tanto o arranjo de plantas no dossel vegetativo, quanto a época de semeadura e a disponibilidade hídrica, podem ser limitantes à fotossíntese e conseqüentemente à produtividade da cultura (EMBRAPA, 2002).

Após os grãos terem atingido a maturação fisiológica, ocasião em que não ocorre mais acúmulo de matéria seca, e a umidade situando-se ao redor de 14%, a colheita, teoricamente, pode ser efetuada. Quando a produção é destinada ao fornecimento de sementes, é colhida com um pouco mais de umidade.

A Embrapa (2002) recomenda que a colheita deva começar tão logo a soja atinja o estágio fenológico R8, pois, a partir deste estágio, a tendência é a deterioração dos grãos e a debulha em intensidade proporcional ao tempo que a soja permanecer no campo. Para que a colheita possa ser processada adequadamente, é necessário que as plantas percam praticamente todas as folhas e que o caule e os ramos estejam secos, estando à maioria dos legumes com a cor característica da cultivar.

2.1.5 Exigências climáticas da soja

A cultura encontra condições climáticas favoráveis em praticamente todas as regiões produtoras, sendo que a ocorrência de temperaturas compreendidas entre 20° e 35°C, principalmente as mais próximas de 30°C, são consideradas ótimas para a emergência das plântulas, a formação de nódulos e o desenvolvimento vegetativo das plantas (FARIAS et al., 2007).

Considera-se que regiões com precipitações pluviométricas anuais de 700 a 1.200 mm, bem distribuídos, durante o ciclo vegetativo das plantas, são aptas para a cultura. A necessidade total de água na cultura da soja, para obtenção do máximo rendimento varia entre 450 a 800 mm ciclo⁻¹ dependendo das condições climáticas, do manejo da cultura e da duração do ciclo (EMBRAPA, 2007).

A temperatura exerce influência sobre todas as fases do ciclo vegetativo da planta. A faixa térmica mais apropriada para o desenvolvimento da cultura situa-se entre 600 e 2.400°C, total obtido pela soma diária das temperaturas superiores a 15°C durante todo o ciclo vegetativo. Temperaturas elevadas associadas a excessos hídricos durante o período de maturação causam danos severos à qualidade do produto (SEGATELLI, 2004).

2.1.6 Exigência hídrica da Soja

Um teor de umidade disponível no solo, dentro de uma faixa ótima, constitui um dos parâmetros imprescindíveis para o desenvolvimento da cultura da soja, facilitando o transporte de nutrientes através das raízes (GAYNOR et al.,2001).

A cultura da soja é sensível tanto ao excesso quanto à escassez de umidade, em diferentes etapas de seu ciclo. Cabe ressaltar, porém, que graças ao desenvolvimento de seu sistema radicular e ao período prolongado de florescimento, apresenta maior resistência a curtos períodos de estiagem, quando comparada a outras espécies cultivadas (EMBRAPA, 2007).

A fase de emergência é uma das etapas críticas em relação à disponibilidade de água; a escassez é extremamente prejudicial, além de em solos argilosos, ocorrer formação de crostas que dificultam ou impedem a ascensão dos cotilédones e plúmula. Entretanto, quando feita a aplicação de uma lâmina de água excessiva, pode-se provocar a saturação do solo e a deficiência no teor de oxigênio para as raízes, o que diminuiria o crescimento das mesmas. Um excesso da lâmina de irrigação também poderia causar deficiências nutricionais e favorecer o ataque de doenças radiculares (MOURAD, 2008).

As deficiências hídricas durante o período vegetativo da planta provocam diminuição da taxa de crescimento, da atividade de fotossíntese, da fixação de nitrogênio e do metabolismo da planta. Esses efeitos são caracterizados pela menor

altura das plantas, menor número de nós e do comprimento dos internódios, além da menor turgescência das folhas (FLOSS, 2008).

Contudo, considera-se que a escassez de umidade é mais prejudicial durante os períodos de florescimento e de frutificação que na fase de vegetação. A deficiência de umidade durante a etapa de diferenciação dos botões florais promove queda de grande número de flores. Esta mesma ocorrência pode ser verificada se a estiagem for seguida por um repentino excesso de precipitações (EMBRAPA, 2010).

O período de enchimento dos grãos é outra etapa crítica quanto à exigência hídrica; a deficiência de umidade reduz severamente a produtividade. O período próximo a maturação caracteriza-se pela baixa necessidade de água, sendo favorecido pela menor necessidade de irrigação. O excesso de umidade, entretanto, pode ocasionar problemas no amadurecimento normal dos grãos, ocasionarem condições para maior aparecimento de micro-organismos acelerando a deterioração dos grãos, principalmente em cultivares de maturação superprecoce e precoce (EMBRAPA, 2004).

Segundo Carlesso (1995), a demanda de água às plantas é determinada pela habilidade da cultura em utilizar a água armazenada no solo e, a demanda, por outro lado, é determinada pela combinação dos fatores meteorológicos interagindo com o dossel vegetativo da cultura. Na verdade, a germinação, o crescimento e o desenvolvimento da soja, é o resultado da interação entre o potencial genético do cultivar com o ambiente, de maneira que ocorrendo mudanças no ambiente também ocorrerá no desenvolvimento da planta.

2.1.7 Panorama energético nacional e a agricultura moderna

O desenvolvimento da agricultura no mundo vem atravessando constantes mudanças. A agricultura moderna tem um importante significado na economia mundial, sendo o suporte da alimentação humana e animal, constituindo a matéria prima da agroindústria, indústria química e indústria alimentícia. Mas, calcada na maior escala produtiva, tem como fundamentação a alocação de quantidades de insumos cada vez maiores nos sistemas produtivos, visando o aumento de produtividade, com o agravante que o aporte dessa energia seja de origem fóssil (CAVALETT, 2008).

Esse dispêndio de energia impõe motivo de preocupação: a carga de energia investida no processo produtivo de alimentos, em muitos casos é maior que o retorno obtido em valor energético dos produtos, proporcionando balanço pouco expressivo e muitas vezes deficitário (ASSENHEIMER, 2009).

Nas últimas décadas a matriz energética está baseada em reservas de fontes fósseis, cada vez mais escassas e de difícil exploração. Por essa particularidade, a obtenção dessa fonte de energia é dispendiosa, além de ser finito, o que justifica os esforços na busca de alternativas para a sua substituição (BUENO, 2002).

O processo de modernização no setor agropecuário iniciado na década de 1960, e com o desenvolvimento dessas tecnologias, houve no Brasil um grande aumento no consumo de energia. O Ministério de Minas e Energia, para a mensuração da produção, consumo e exportação de energia, utiliza como unidade a tonelada equivalente de petróleo (tep), alegando que esta unidade está relacionada com uma fonte de energia importante, expressando uma realidade física do real significado, além de ser coerente com o Sistema Internacional de Unidades (FERREIRA, 2010).

A incorporação e difusão destas tecnologias consolidaram a partir dos anos de 1970, aumentando o consumo energético de derivados do petróleo de 1,08 milhão de tep para 40,66 milhões de tep em 2010, Balanço Energético Nacional - BEN (1990 e 2011).

Dados BEN (2010) apresentam que a demanda total de energia no Brasil, em 2010, foi de 226,09 milhões de tep, valor este 9,6% superior a demanda de 2009, e que representa um consumo per capita de 1,42 tep, frente aos 1,29 existentes em 2009.

O percentual de participação do conjunto de fontes renováveis de energia vai aumentar na matriz energética brasileira nos próximos dez anos. A presença destes recursos, que somou 45,5% em 2011, chegará a 46,3% em 2020, de acordo com o mais recente ciclo do Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE (2011). A matriz energética mundial tem participação total de 80% de fontes de carbono fóssil, sendo 36% de petróleo, 23% de carvão e 21% de gás natural (Tabela 3).

Tabela 3 - Comparativo entre a matriz energética mundial e a brasileira

Fonte	Mundo (%)	OCDE (%)	Brasil (%)
Petróleo	33,1	37,2	38,0
Carvão mineral	27,0	19,7	5,1
Gás natural	21,1	24,2	10,2
Biomassa tradicional ¹	10,7	5,5	9,6
Nuclear	5,8	11,3	1,4
Hidroelétrica	2,2	2,1	14,2
Biomassa moderna ²	0,01		17,7
Outras renováveis			3,8

Fonte: IEA (2008), OCDE (2009) e EPE (2011)

¹ São aquelas utilizadas de forma não sustentável para cocção, secagem, aquecimento de ambientes e produção de carvão (combustão direta de madeira, lenha, carvão vegetal e resíduos agrícolas, de animais e urbanos)

² São aquelas utilizadas de maneira sustentável como na cogeração de energia e biocombustíveis (etanol e biodiesel)

O alerta sobre a escassez relativa de combustíveis fósseis foi transmitido pelos principais países produtores, em outubro de 1973, a busca incessante na redução da utilização de recursos fósseis tem-se constituído como uma necessidade de vários países desde então (FERREIRA; ULBANERE, 1989). O esgotamento progressivo das reservas mundiais de fontes fósseis é uma realidade cada vez menos contestada. Segundo Campbell (2005), a quantidade total anual de insumos não renováveis começa a diminuir ao longo das próximas décadas, estamos findando a primeira metade dos 150 anos da era do petróleo, quando atingimos o máximo da capacidade de extração das reservas mundiais existentes.

Como observado no setor agropecuário, que é dependente de uma crescente demanda de energia nos processos produtivos, a agricultura brasileira consome 4,8% da oferta interna de energia, em torno de 10,4 milhões de toneladas equivalente de petróleo. Patusco (1998) descreve que a equivalência energética entre tep e MW h⁻¹, considerando a primeira lei da termodinâmica, é de 0,08 tep MW h⁻¹, portanto, a título de comparação, a energia utilizada pela agricultura no Brasil é equivalente a 130 milhões de MW h⁻¹, ou seja, mais do que toda a energia gerada pela Usina Hidrelétrica de Itaipu (94 milhões de MW h⁻¹).

O interesse cada vez maior do planeta por fontes de energia limpas, que possam substituir gradualmente os combustíveis fósseis, traz à tona as culturas renováveis de alto potencial de energia. Estas culturas tendem a serem voltadas a regiões do país consideradas como celeiro agrícola, sendo o Cerrado, atualmente o principal.

A agricultura moderna sofreu grandes avanços durante o século XX, tendo como suporte o aumento do consumo de energia no setor, principalmente das fontes de energia de baixa entropia, tendo como principais exemplos os combustíveis de fontes não renováveis (ROMANELLI; MILAN, 2005). Os sistemas de produção agrícola e florestal adotam e continuarão a demandar avanços tecnológicos para abastecer, com as mais diversas alternativas de biomassa, uma população mundial em constante crescimento com recursos naturais limitados. Neste panorama é vital analisar os cenários alternativos de manejo existentes, a agricultura sustentável exige o uso de tecnologias adequadas às condições ambientais regionais, e da previsão e prevenção dos impactos negativos, econômicos e ambientais para que os sistemas agrícolas sejam produtivos e rentáveis ao longo do tempo (ROMANELLI; MILAN, 2005).

2.1.8 A energia e os sistemas agrícolas

O homem primitivo viveu ao longo de várias gerações no estado nômade, onde toda a energia que necessitava era proveniente da força muscular oriunda de sua alimentação.

A demanda de energia da agricultura é representada pelas energias disponíveis livremente na natureza (energia solar, ar, água, nutrientes orgânicos e minerais do solo) transformadas ou não, e pelas energias inseridas pelo homem (trabalho humano e animal, fertilizantes, combustíveis e defensivos) (BEBER, 1989).

De maneira geral, pode-se definir energia como a capacidade de realizar mudanças. Estas mudanças e a possibilidade de transformação entre diferentes formas de energia são de importância imprescindível para a existência e manutenção da vida, na maneira que a conceituamos (GUERRERO, 1987).

Segundo Guerrero (1987), a energia é um amplo conceito científico presente nas bases teóricas da física, química e biologia. A sua versatilidade faz que o conceito de energia seja utilizado para grande parte das atividades que envolvem os seres humanos, tais como, transferência de calor, transporte, alimentação, construções e, principalmente no objetivo dessa pesquisa, na agricultura.

O desenvolvimento da máquina a vapor no final do século XVIII mudou o pensamento científico acerca da natureza da energia. A ideia que temos de energia acabou fluindo associada ao conceito de trabalho. Nesse sentido, definimos

classicamente por energia a capacidade de produzir um trabalho ou realizar uma ação (GUERRERO, 1987).

O trabalho é entendido como a medida da energia transferida pela aplicação de uma força a um objeto, ao longo de um deslocamento. Dessas considerações, tem-se que todo elemento capaz de produzir trabalho é potencialmente energia.

Sabem-se da existência de variadas formas de energia, como a energia elétrica, energia térmica e energia nuclear. Um caso particular de energia química, ou seja, aquela contida nas ligações entre os elementos químicos é a bioenergia.

Nos dias atuais na agricultura, em que a energia está ficando cada vez mais onerosa, a questão do consumo é de vital importância nos processos produtivos. É muito importante que se saiba o quanto dela é gasto para se produzir qualquer produto, pelo fato que, é com a análise dos fluxos de energia e da eficiência energética, que se quantificam todos os insumos utilizados e produzidos que são transformados em unidades de energia (SANTOS et al., 2007), sem considerar a energia solar que é usada diretamente pela planta via fotossíntese.

O seu domínio, constitui importante instrumento para decisões relativas a adoção de novas técnicas e manejos agropecuários, bem como, a busca por novas matérias primas que tenham uma eficiência maior no que tange a produtividade energética. No futuro, o princípio básico para avaliar qualquer investimento ou atividade humana será o seu custo energético e, mais ainda, o seu balanço energético (URQUIAGA et al., 2005).

A agricultura, em essência, é a adequação humana da captação e fluxo de energia em sistemas agrícolas. Os seres humanos usam agrossistemas como um meio de converter energia solar em formas particulares de biomassa, formas que podem ser usadas como alimentos, fibras, combustíveis como lenha e álcool, resíduos orgânicos como palhas, folhas, esterços, ração e combustível. Em todos os agrossistemas, desde os primitivos até os intensamente tecnificados pela mecanização, atualmente, requerem uma inserção de energia. Esta inserção pode ocorrer na forma de energia solar, ar, água, fertilizantes, pela energia adicionada pelas forças humana e animal e óleo diesel, estas inserções sendo necessário devido em grande parte a remoção de energia na forma de produto colhido. Sendo assim, os produtores podem intervir de várias maneiras, entre estas, controle de invasoras, tratos culturais, manejo de doenças e pragas, no processo de irrigação e

no preparo do solo, pois estas ações requerem trabalho e gasto de energia (ZANINI et al., 2003).

A análise energética de agrossistemas tem o objetivo de descrever o fluxo de energia e seu ciclo, determinando o grau de eficiência energética a partir de medidas parciais, relacionada apenas, como terra, trabalho ou capital (SANTOS et al., 2007).

2.1.9 Tipos de energia

A energia possui grande participação em nosso cotidiano, desde as formas primárias as secundárias (PANESAR; FLUCK, 1993). Para garantir alimentação, proteção, transporte, bens de consumo e outras funções, sempre se gasta muita energia, independente da forma em que ela se apresenta. Essa afirmação categórica é tão verdadeira quanto ao fato de que sem energia não haveria seres humanos.

A energia tem sido a base do desenvolvimento da humanidade como insumo fundamental nos processos de produção, é de suma importância no contexto das grandes nações industrializadas, mas principalmente naquelas em desenvolvimento, que possuem necessidades energéticas mais iminentes.

As chamadas fontes de energia estão disponíveis em diferentes formas na natureza, em diferentes níveis de refinamento que vão da lenha à nuclear. Em uma avaliação global de um sistema energético, faz-se necessário expressar todas as formas de energia de uma maneira unificada, permitindo assim, que resultados de diferentes estudos fossem facilmente comparados (ODUM, 1996).

A Food and Agriculture Organization - FAO (1976) classificou os recursos energéticos em renováveis e não renováveis e também assinalou a conveniência de estabelecer diferença entre recursos energéticos comerciais e não comerciais.

Por fontes de energia renováveis compreendemos os produtos oriundos da fotossíntese como biomassa em geral, lenhas, carvão vegetal, além da energia solar, eólica, hídrica, geotérmica, etc. E por fontes de energia não renováveis o coque, carvão mineral, petróleo, gás natural, etc. (GOLDEMBERG; LUCON, 2008).

Em relação a forma com que os recursos de energia se apresentam na natureza, outros autores como Macedônio e Picchioni (1985), classificaram a energia em "primária" ou "secundária". Consideram por energia primária aquelas que

existem livremente na natureza e podem gerar energia de forma direta, destas destacam-se o carvão mineral, o petróleo e o gás natural, a energia hídrica, solar, eólica e de biomassa. As energias secundárias são originadas a partir da transformação de fontes de energia primárias, como por exemplo, a energia elétrica, gasolina, óleo diesel, gás, carvão mineral, vapor entre outros, com as respectivas perdas na transformação (Tabela 4).

A energia, derivada de fontes primária ou secundária, é a essência para operação e manutenção de todos os sistemas. A vida na Terra é regida pela energia, desde a Biosfera até ecossistemas de produção, dentre eles os sistemas agrícolas. Sendo assim, e admitindo que tudo é energia, alterando apenas as diversas formas de estado ou manifestação, logo se percebeu a necessidade de padronizar alguns aspectos da análise energética, permitindo que resultados de diferentes estudos fossem facilmente comparados, assim, a mensuração da energia pode padronizar o estoque e fluxo que existe no ecossistema (ODUM, 1996).

Tabela 4 - Classificação das fontes energéticas

Fontes	Tipos	Energia Primária	Energia Secundária
Não Renováveis	Fósseis	Carvão Mineral	Termoeletricidade, calor, combustível para transporte
	Nuclear	Petróleo e derivados, gás natural, materiais fósseis.	Termoeletricidade, calor
	Tradicionalis	Biomassa primitiva: Lenha de desmatamento	Calor
Renováveis	Convencionais	Potenciais hidráulico de médio e grande porte.	Hidrelétricas
	Modernas	Potenciais hidráulicos de pequeno porte. Biomassa moderna: lenha plantada; culturas energéticas (cana, óleos vegetais)	Biocombustíveis (etanol, biodiesel, termoelétricas, calor)
		Outros: Energia solar Geotermal, Eólica Maremotriz e das ondas.	Calor, eletricidade fotovoltaica; Calor, eletricidade; Eletricidade.

Fonte: Goldemberg e Lucon (2008)

De maneira mais detalhada, Campos e Campos (2004) consideraram categorias “Biológica”, “Fóssil” e “Industrial”, na primeira, a energia humana e animal, resíduos de animais e da agroindústria, sementes e mudas, alimentos para animais, adubação verde e cobertura vegetal; na segunda, os produtos e subprodutos de origem fóssil, tidos como fontes de energia primária, incluindo adubos químicos e defensivos e na terceira são incluídos a maquinaria agrícola à tração mecânica e biológica e a energia elétrica.

Comitre (1993) propôs uma divisão semelhante, utilizando como referencial teórico Malassis (1973) apresentou a composição do fluxo externo contido num sistema agrícola em dois tipos básicos: energia direta (biológica e fóssil) e energia

indireta (Industrial composta por máquinas, insumos, fertilizantes e defensivos). Segundo a autora, os tipos de energia subdividem-se de acordo com a fonte e estas são especificadas segundo as formas nas quais se apresentam no processo de produção.

Junqueira et al. (1982) apresentaram uma classificação da energia consumida nos processos produtivos levando em consideração seu destino ou uso. Conforme citação na literatura, Zanini et al. (2003) afirmaram que a maioria dos autores tem utilizado a divisão em energia direta e energia indireta. A energia direta apresenta-se em três fontes: biológica, fóssil ou elétrica, enquanto a fonte industrial representa a energia indireta. Como se observa nos trabalhos de diversos autores (BUENO, 2002; CAMPOS et al., 2001; CLEVELAND, 1995; DELEAGE et al., 1979; PELLIZZI, 1992; SIQUEIRA et al., 1999; ZUCCHETTO; JANSSON, 1979).

Romanelli (2002) suscita que a lei da entropia permite classificar a questão da qualidade da energia, pois as mesmas quantidades de energia de formas diferentes possuem diferentes potenciais para reduzir o trabalho. As fontes potencialmente mais utilizáveis, onde a energia química contida nos combustíveis fósseis possui um alto grau de ordenação, ou seja, uma grande disponibilidade de energia, que poderiam ser chamadas de alta qualidade. Nelas o teor energético é mais alto e as perdas no processo de utilização são relativamente menores.

Elas ainda podem ser classificadas quanto à emissão de gases de efeito estufa em limpas (as que poluem menos), e sujas (as altamente produtoras de gases estufa). É o caso do petróleo e do carvão mineral, exatamente as fontes que são as de maiores demanda da matriz energética mundial (CAMPOS; CAMPOS, 2004).

2.1.10 O perfil energético da agricultura brasileira

Embora em varias regiões brasileiras, ainda se pratica uma agricultura rudimentar ou simplesmente de subsistência, a modernização da agricultura voltada à exportação, a produção de energia, alimentação de animais e demais culturas intensivas no uso de insumos industrializados é fenômeno recente e está estreitamente ligada a instalação no País de montadoras de tratores e fabricantes de fertilizantes químicos e defensivos. O modelo econômico brasileiro é dependente da energia fóssil (ULBANERE; FERREIRA, 1989). Com os altos custos da atividade agrícola acentuados, é importante considerar os impactos dos custos energéticos

nos custos de exploração. Assim, não resta ao setor agrícola alternativa, senão, adequar-se aos novos tempos, tomando decisões que possibilitem sua manutenção na atividade produtiva com lucro razoável, minimizando ao máximo seus custos.

Dos debates estabelecidos nos últimos anos sobre a questão energética no Brasil, pouca importância se deu ao balanço energético dos sistemas produtivos. Considerações maiores têm sido efetuadas na busca por novas fontes, a partir de culturas com alto potencial de produção de energia. O esforço modernizador dos setores agrícola, industrial e de transportes, apoiado no modelo de países desenvolvidos, necessita cada vez mais de recursos energéticos em seus processos, sejam renováveis ou não (CAMPOS; CAMPOS, 2004).

O conhecimento de novas formas de estimar a produção e suprir o consumo de energia nos diversos sistemas é fundamental para a definição de novas políticas de estímulos à produção ou de restrição de seu consumo (CASTANHO FILHO; CHABARIBERY, 1983).

O consumo de energia está sujeito a análise das condições ambientais específicas, bem como dos dados de balanços energéticos e econômicos. Assim, para Campos et al. (2004) um dos instrumentos básicos capazes de maximizar os ganhos energéticos é o melhor conhecimento da relação produção-consumo de energia na produção agrícola, tanto quanto a sua análise econômica.

Porém, há dúvidas sobre a forma de avaliar o custo de produção da soja em relação ao balanço de energia em sistema de produção sequeiro e irrigado, o conhecimento da produção e o dispêndio de energia pela cultura da soja reproduzem a necessidade da mensuração dos índices das diversas relações de fluxo de energia no sistema agrícola.

2.1.11 O perfil energético da cultura da soja

A produção da cultura da soja em um sistema moderno é alicerçada no uso de energia fóssil, insumos, fertilizantes, defensivos, elevada mecanização agrícola, pouca utilização de mão de obra, variedades de alta produtividade, além de muitos outros recursos não renováveis (CAVALETT, 2008).

O incremento de soja na produção de alimentos, também pode ser obtido mediante o aumento da produtividade, utilizando técnicas de produção compatíveis com a realidade do produtor e da região (PETRY, 2000). Existe ainda, uma

infinidade de fatores que provocam variação nos resultados para um mesmo produto agrícola. Fatores, tais como, tipo de solo e relevo (inclinação, altitude, exposição solar) pode provocar diferenças consideráveis no fluxo de energia. Somando-se todas estas fontes de variação, pode-se dizer que até mesmo a tradição local pode introduzir diferenças nos processos produtivos (CAMPOS; CAMPOS, 2004).

O incremento na cadeia agroindustrial da soja é condizente com a utilização crescente de processos mecânicos (máquinas e equipamentos), na injeção de quantidades cada vez maiores de energia no processo, dos insumos químicos e na infraestrutura física, visando o aumento da produtividade dos grãos (ODUM; BARRET, 2008).

Entretanto, a maior parte desses insumos vem, diretamente ou não, de combustíveis de fontes não renováveis, entretanto, o aumento no uso de energia compromete a química e fertilidade do solo com a perda da mesofauna e organismos sensíveis na composição da biologia do solo (GLIESSMAN, 2000).

No Brasil, o gasto para produção de 4,18 kJ de alimento é de 10,9 kJ de energia. Em países industrializados o gasto energético é de 21 kJ; nos Estados Unidos gastam-se 38 kJ e na Ásia 50 kJ. Pimentel (1980) relata que os usos dominantes da energia nos Estados Unidos se referem a combustíveis, para movimentar maquinaria agrícola e a matéria prima para produzir fertilizantes e defensivos. Ainda para o autor, a energia fóssil em países industrializados é imprescindível para a produção agrícola, assim como são os recursos terra e água.

Em pesquisa realizada no estado do Paraná com a cultura de soja, Assenheimer et al. (2009) comparam o balanço energético na produção da soja em sistemas orgânico e convencional, e encontraram a produção de 41.690 MJ e 113.820 MJ, respectivamente. A energia consumida pelo sistema para a produção de um hectare foi de 12.254 MJ (orgânico) e 16.723 MJ (convencional).

Ferreira (2010) ao comparar o consumo de óleo diesel em três unidades de produção de soja no Rio Grande do Sul, encontrou 49,00%, 39,71% e 44,78%, em sistemas de produção de plantio direto (SPD). As sementes participaram com 21,19%, 22,57 e 31,00% dos dispêndios totais de demanda de energia.

Observou-se no que tange a matriz energética, que o consumo de energia indireta foi aproximadamente 92,8%, sendo que, somente os adubos formulados e o herbicida contribuíram com 42,3%, o que demonstra o elevado grau de dependência do fornecimento de adubos químicos para a nutrição das variedades chamadas de

alta produtividade. Os inseticidas, inoculante e fungicidas participaram respectivamente com 1,9%, 1,5% e 0,9%.

Ferreira (2010), ao estudar o balanço energético, definido como a diferença entre a energia convertida e a energia consumida na produção da soja, em plantio direto nas safras de 2007 e 2008, em três diferentes Unidades de Produção Agrícola no estado do Rio Grande do Sul, obteve 32904 MJ t^{-1} , 30742 MJ t^{-1} e 31140 t^{-1} .

Fernandes et al. (2008) determinaram o custo energético com cultivo mínimo, grade de disco leve com 50 % de abertura do ângulo de travamento, para o mínimo revolvimento do solo, e semeadura com semeadora convencional do milho e aplicação de herbicida. O sistema consumiu $14,3 \text{ L ha}^{-1}$, com as operações de gradeação, semeadura e pulverização consumindo $656,24 \text{ MJ ha}^{-1}$, $532,20 \text{ MJ ha}^{-1}$ e $816,06 \text{ MJ ha}^{-1}$, de energia respectivamente.

Campos et al. (2009) analisaram o balanço energético no sistema de plantio direto de soja em uma propriedade agrícola no oeste do Paraná, considerando dois tipos de energia que entram no sistema: a direta e indireta. O consumo energético com combustível, sementes e herbicidas, representaram 29,43%, 27,50% e 22,26% respectivamente da energia total empregada, demonstrando a grande dependência de energia fóssil.

Cavalett (2008) cita a relação de energia calculada para a soja (*output/input*) foi de 7,24. Enquanto Comitre (1993) avaliou o balanço de energia da cultura da soja nas etapas agrícola, industrial e de distribuição, obtendo valores de 5,77; 0,97; e 2,31; respectivamente.

Em estudo feito por Gazzoni et al. (2006) para a produção de soja e girassol envolvendo as fases agrícola e industrial para a relação *input/output* de energia, obtiveram para a produção do óleo de soja 1: 1,57 e de 1: 1,61 para o de girassol. Ao considerarem a energia contida nos subprodutos das culturas, o EROI – Energy Return Over Investment obteve 4,75: 1 para a soja e 2,69: 1 para o girassol.

Dos vários insumos nos agrossistemas em que há *input* de energia, destacam-se a irrigação, a aplicação de fertilizantes químicos e o uso de combustíveis. Em sistemas intensivos de produção de arroz irrigado, esses itens chegam a representar, respectivamente, 42, 17, 15 e 6% e em sistemas de produção de milho não irrigado, 37, 28 e 14% da energia cultural total gasta no sistema (PIMENTEL et al., 1973; FAO,1980).

Em experimento com uma cultivar de soja de ciclo semiprecoce, Rambo et al. (2003) testando irrigação, espaçamento entre linhas e população de plantas, verificaram que o rendimento de grãos foi afetado pela irrigação e pela interação espaçamento e população. O tratamento irrigado (5.015 kg ha^{-1}) apresentou rendimento de grãos 18% superior ao não irrigado (4.253 kg ha^{-1}).

Boerma e Asheey (1982) encontraram interação significativa entre a época de semeadura e irrigação em soja. Em déficit hídrico, o aumento da produtividade devido à irrigação foi de 355% na semeadura tarde e 115% na semeadura super tarde, ou seja, há um incremento de produtividade em função da irrigação.

Em estudos realizados Sweeney e Granade (2002) concluíram que quando a soja é semeada tardiamente, uma única irrigação durante os estágios reprodutivos pode aumentar o rendimento da soja.

Esse modelo econômico de produção da soja pode ser considerado de capital intensivo devido à modernização tecnológica, mecânica, biológica e química em todas as etapas de produção, à medida que a demanda energética aumenta, aumenta também a necessidade de fertilizantes e do emprego de defensivos (PIMENTEL et al., 2005).

2.1.12 Análise energética em sistemas agrícolas

O aumento constante dos custos energéticos com fontes de energia obriga a população a repensar a atual situação em que vivemos, assim como encarar a dependência energética com uma preocupação em relação ao futuro. Considerando o estreito relacionamento entre o balanço energético e a busca pela sustentabilidade, e esta com a visão sistêmica de um sistema agrícola, convém avaliar de forma aprofundada todas as possibilidades de melhoria da eficiência energética, antes de utilizar tecnologias de energias renováveis, uma vez que estas se tornam menos dispendiosas (CAMPOS; CAMPOS, 2004).

Um sistema agrícola deve possuir estruturas físico-químicas que permitam operações produtivas, com a interação de minerais, compostos orgânicos, bactérias, sementes, água, fertilizantes e radiação solar. Esse conjunto de componentes possibilita haver um fluxo de materiais que irão interagir entre si e com os componentes do sistema, no sentido da geração de produtos que serão a energia produzida do sistema (FARIAS et al., 2007).

No sistema, ocorrem *inputs* de energia em diversas formas e meios. Ocorre na forma da radiação solar que incide sobre cultura, na mão de obra do agricultor, na utilização de combustíveis e anda incorporada a maquinaria, fertilizantes e corretivos, sementes, irrigação e defensivos agrícolas, que consumiram energia para sua obtenção (FERREIRA, 2010).

No sistema há uma cadeia de interações de materiais, que ao interagirem, realizam trabalho, e a energia inserida vai sendo dissipada e acumulada, gerando subprodutos que podem ser utilizados ou não, e gerando o produto cultivado.

Para a aplicação e análise da matriz energética de diferentes sistemas agrícolas, é necessário que haja conformidade na sequência a ser seguida e ótima qualidade dos dados utilizados.

A contabilidade energética identifica o nível de sustentabilidade de um sistema de produção, visto que a dependência de alguma fonte põe em risco tal sustentabilidade em função do consumo exaustivo de reservas de energia fósseis, com consequente elevação de preços (ROMANELLI; MILAN, 2005).

Segundo Oliveira et al. (2009) o balanço energético é um condicionante importante para avaliar-se a sustentabilidade ambiental e a rentabilidade da cultura agrícola. É um método que quantifica o fluxo de energia do sistema de produção, ou seja, a quantidade de energia utilizada para a produção de um bem e a energia produzida no final do processo. Atenua-se ainda, que esse instrumental permite a racionalização do uso de energia ao destacar em quais etapas do processo de produção o consumo de energia é maior. A operação visa adoção e/ou o aperfeiçoamento de tecnologias já existentes com vistas à redução dos custos de produção agrícola (diretamente ligado ao uso de matérias primas não renováveis).

Risoud (1999) chama atenção para as relações entre sustentabilidade e análises energéticas de explorações agrícolas, utilizando índices que captam o uso de energias renováveis nos sistemas. A análise de sustentabilidade proporciona uma compreensão do seu grau de dependência dos *inputs* de energia extrapropriedade, e o peso que essas entradas têm no processo de produção, tornando-se importante um aprofundamento de como, quando e onde isso ocorre (ALMEIDA, 2007).

Por outro lado, quando são avaliados os fluxos de energia que compõem o sistema, acrescenta-se um referencial que não está sujeito a mudanças

mercadológicas ou financeiras, não é limitado no tempo ou espaço, mas, antes, se submete às leis da natureza.

A análise energética de sistemas agrícolas permite, entretanto, não apenas a mensurar a energia inserida na obtenção de um produto agrícola, mas também a se compreenderem os fluxos de energia que compõem esse sistema, a se identificarem pontos de desperdícios energéticos e componentes que podem ser substituídos por outros que gerem maior eficácia energética, enfim, interferir no sistema no sentido de aprimorá-lo (SANTOS et al., 2010).

2.1.13 Subirrigação

O modelo de subirrigação é apontado como um dos sistemas de irrigação mais vantajosos, não somente por atender as necessidades hídricas da cultura em questão, mas também por garantir reduzidas perdas de nitrato e fertilizantes para águas subterrâneas, melhorando a qualidade da água para ingestão (ELMI et al., 2002).

A subirrigação é mais apropriada para terras baixas ou solos de várzeas e, por isso mesmo, funciona como drenagem controlada. Em várias condições, sistemas de drenagem subterrânea podem ser projetados tanto para a remoção do excesso de água existente no solo, como para o abastecimento de água, para satisfazer as exigências de evapotranspiração das culturas, pelo método chamado de subirrigação (FISHER et al., 1999) .

Os componentes do sistema de manejo do nível do lençol de água incluem uma combinação de poços de observação e drenos na subsuperfície. Estes sistemas de alterar o nível do lençol freático regulam o escoamento da drenagem para evitar drenagem excessiva (*over-drainage*). Água pode também ser injetada para elevar o nível do lençol freático com o intuito de fornecer água para a zona radicular (GAYNOR et al., 2001) .

A técnica de subirrigação está relacionada à manutenção do lençol freático a certa profundidade de forma que um fluxo vertical ascendente possa ser mantido, a água atinge as raízes das plantas por meio da ascensão capilar. Os sistemas de manejo do nível de lençol freático são mais adequados para campos que apresentam declividade de menos de 2%. Um selante natural, impermeável, deve existir abaixo da superfície a profundidade de no máximo 3 m. Esta situação

geralmente ocorre em áreas úmidas e subúmidas, em que períodos de água excessiva e de déficit de água do solo podem ocorrer dentro da mesma safra.

Em culturas de sequeiro cultivadas em solos de várzea, a produtividade agrícola está diretamente associada à manutenção da altura do lençol freático durante o ciclo de desenvolvimento das plantas. Diversos pesquisadores têm estudado a influência da altura do lençol freático na produção de culturas de sequeiro, para fins de dimensionamento de sistemas de subirrigação (MELO et al., 2010).

Durante os períodos de chuvas pesadas o nível da saída da drenagem pode ser abaixado para rápida drenagem e para reduzir o risco de dano às plantas. Sistemas que combinam subirrigação/drenagem podem ser economicamente exequíveis para certos solos nos quais sistemas individuais de irrigação podem não ser econômicos (GAYNOR et al., 2001).

Além disso, a subirrigação, por minimizar a utilização de água, tem sido apontada por muitos pesquisadores como um meio de promover a conservação de recursos hídricos e diminuir a poluição, sem afetar a produtividade agrícola (MEJIA et al., 2000). Este sistema de irrigação é comumente associado a um sistema de drenagem e, em condições satisfatórias, pode ser o método de irrigação de menor custo. A configuração construída, incluindo os drenos, o lençol freático, a zona radicular e o fluxo ascendente (Figura 1).

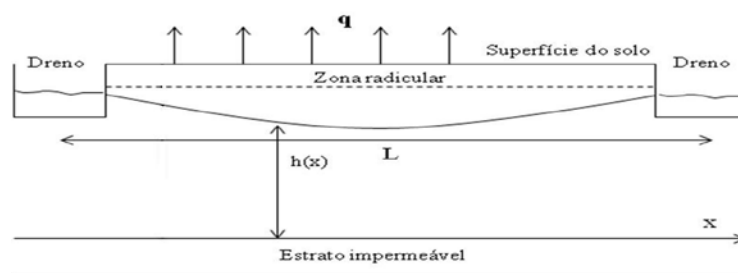


Figura 1 - Representação esquemática da subirrigação (MELO et al., 2010)

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Caracterização do cenário

O experimento foi conduzido, entre os meses de maio a setembro de 2011, localizada no município de Lagoa da Confusão, situado na região sudoeste do estado do Tocantins, Latitude $10^{\circ}47'49,90''\text{S}$ e Longitude $49^{\circ}37'55,60''\text{W}$, a uma altitude de 178 metros do nível do mar (Figura 2), em solo classificado como tipo Gley Pouco Húmico (EMBRAPA, 1999). O clima da região é o C2wA'a', clima úmido semiúmido, segundo classificação climática de Koeppen, temperatura média anual variando entre 24° e 28°C e as máximas ocorrem em agosto/setembro com 38°C . Em geral as precipitações são variáveis entre 1.500 a 2.100 mm, com chuvas de novembro a maio, com ausência de precipitações nos meses junho a outubro.



Figura 2 - Croqui da região de Lagoa da Confusão, Tocantins

A área total da propriedade da Fazenda é de 941,66 ha. A área do experimento vinha sendo cultivada a cinco anos em sistema de plantio convencional de sucessão de culturas. A predominância de cultivares precoces, semiprecoces e superprecoce inscritas no Registro Nacional de Cultivares, é mais comumente cultivada naquela região. A área utilizada na unidade para o cultivo da soja foi de 609 ha (Figura 3).

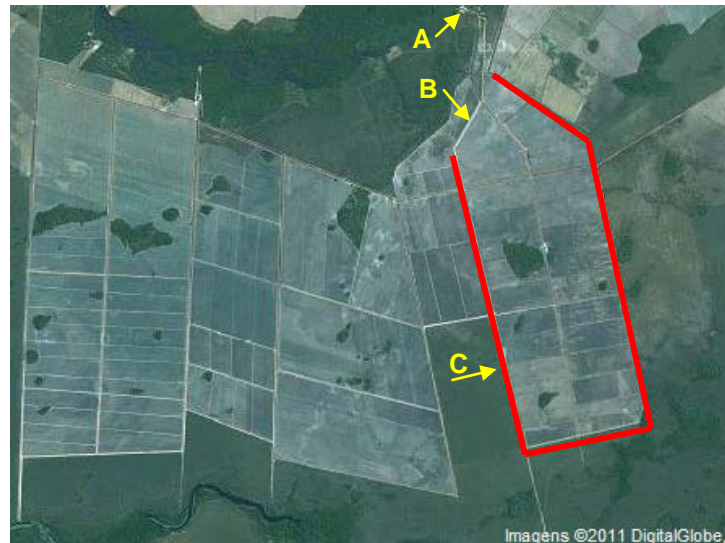


Figura 3 - Croqui da área da Fazenda Arco-Íris. (Foto: DigitalGlobe, 2011)

Onde:

A = Captação da água do Rio Urubu

B = Canais de irrigação

C = Área onde foi conduzido o experimento

2.2.2 Descrições do conjunto de operações

A pesquisa foi realizada em uma área cultivada com soja RR, no sistema de preparo reduzido do solo, fazendo-se uma análise do processo produtivo e os insumos de produção energética, destinada a quantificar todas as operações realizadas.

Os dados técnicos de produção no cenário são oriundos da prática realizada na propriedade, embasadas em recomendações técnicas feitas pela Embrapa (2003). Na cultura analisada assume-se que essas recomendações técnicas propiciam condições ideais de produção, e que, sendo atendidas tais recomendações, obtém-se uma produtividade acima da média regional.

A partir das exigências físicas dos fatores de produção utilizados, são consideradas como entradas, o trabalho humano, combustíveis, maquinaria, fertilizantes, sementes híbridas, irrigação e defensivos agrícolas.

São tomados como saída do sistema em estudo apenas os grãos colhidos. Todas as operações e insumos envolvidos foram dimensionados para uso por área

(ha). O tempo é determinado pelo ciclo natural da produção da cultivar que vai desde o preparo do solo para a semeadura, até a completa maturação do grão e sua colheita. São considerados como intrínsecos ao sistema de produção, o solo, a cultura e os subsistemas de invasoras, pragas e vetores de doenças.

A cada fluxo de material é associada sua dimensão física, originando assim o quantitativo que será multiplicado pelo respectivo índice de incorporação de energia sendo transformados em unidade de energia. Os dados convertidos a unidades energéticas são considerados pelo seu tipo ou composição, quantificando a energia dos fluxos do sistema.

Na determinação da energia utilizada pelo produtor no processo que caracterizam o conjunto de operações, utilizou-se a metodologia apresentada por Bueno (2002), Romanelli (2007) e Almeida (2007), com as seguintes variáveis: mão de obra, sementes, combustível, lubrificantes, máquinas e implementos, fertilizantes, defensivos e irrigação.

Foi sistematizada a mensuração de tempo demandado para cada operação agrícola em cada parcela, com isso foi levantado a capacidade de campo operacional para o total da área cultivada, com objetivo de determinar o índice das variáveis: mão de obra, sementes, fertilizantes, defensivos, máquinas e implementos, combustíveis e irrigação.

A constituição do conjunto de operações de produção da cultivar, foi caracterizada pelas operações agrícolas que são apresentados na Figura 4, que mostra a sequência de realização das operações desde o preparo do solo para semeadura até a operação de colheita dos grãos.

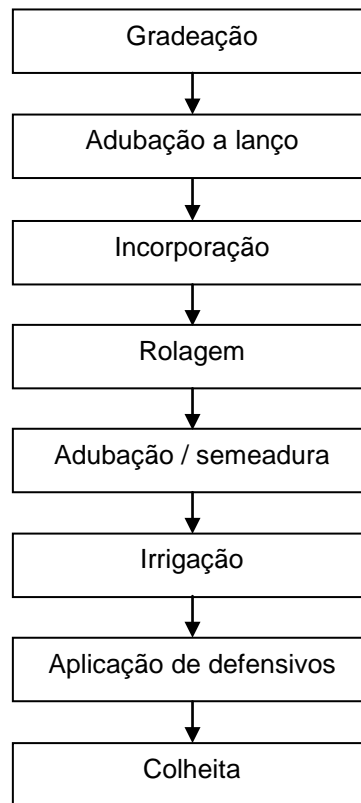


Figura 4 - Fluxograma das operações mecanizadas no sistema de produção avaliado

Entre essas operações, foi realizado o tratamento das sementes, como prevenção ao ataque de pragas e doenças no estágio de desenvolvimento inicial das plântulas, além da inoculação das mesmas.

Para as operações agrícolas foram utilizados os conjuntos motomecanizados por operação, conforme detalhado na tabela 5, bem como, informações pertinentes aos conjuntos, como massa, largura efetiva, rotação, marcha operada, dimensões etc.

Tabela 5 - Descrição dos conjuntos motomecanizados utilizados no sistema de produção

Operação	Trator			Implementos / máquinas			
	Potência (kW)	Tração	Massa (kg)	Implemento	Largura de Trabalho (m)	Massa (kg)	Nº disco bico
Gradagem	148	4x2 TDA	8.100	Grade niveladora	4,87	1.405	52
Gradagem	148	4x2 TDA	8.100	Grade niveladora	4,48	1.352	48
Gradagem	88,3	4x2 TDA	6.178	Grade niveladora	4,09	1.175	44
Fertilização	88,3	4x2 TDA	6.178	Distribuidor a lanço	18,00	260	02
Incorporação	148	4x2 TDA	8.100	Grade niveladora	4,87	1.405	52
Incorporação	148	4x2 TDA	8.100	Grade niveladora	4,48	1.352	48
Incorporação	88,3	4x2 TDA	8.100	Grade niveladora	4,09	1.175	44
Rolagem	88,3	4x2 TDA	8.100	Rolo compactador	5,40	3.000	
Semeadura	148	4x2 TDA	8.100	Semeadora-adubadora de precisão	6,70	6.000	13
Semeadura	148	4x2 TDA	8.100	Semeadora-adubadora de precisão	6,70	6.000	13
Aplicação	63	4x2 TDA	2.900	Pulverizador	18,00	2.120	
Colheita	209	4x2 TTA	14.590	Plataforma de corte	9,10	1.560	
Irrigação	183,8		1015	Bomba de água		569	

2.2.2.1 Gradagem

Os solos da região de várzea, em especial os aluviais, são anualmente preparados com grades niveladoras e destorroadora, visando à semeadura do arroz irrigado, cultura antecessora à semeadura da soja. Em razão da operação de colheita do arroz ser realizada com muita umidade no solo, a massa e o sistema de locomoção das colhedoras tornam a superfície do terreno muito irregular. Assim, nos cultivos de verão são necessárias duas ou mais gradeações para a uniformização da superfície, visando a semeadura das culturas sucessoras. Esses procedimentos são suficientes para revolver a terra e a destruir os torrões, quebrando a camada

compactada do solo, e, assim, garantir a eficiência da emergência das plantas (EMBRAPA, 2003).

Durante a operação agrícola foram tomados os tempos efetivo e total e a largura de trabalho, a velocidade de deslocamento do conjunto motomecanizado bem como o consumo de combustível e lubrificantes. Outras informações necessárias e não disponíveis na propriedade tais como: dados técnicos referentes aos conjuntos motomecanizados, modelo, massa, entre outros, foram obtidos nos manuais ou fornecidos pelos fabricantes das máquinas e implementos.

2.2.2.2 Fertilização a lanço

Foi realizada a correção dos níveis de macronutrientes no solo através da aplicação a lanço de 150 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio (KCl). Para efetuar-se a operação foi utilizado um distribuidor a lanço centrifugo de agregados montado em trator agrícola, conforme especificação na (Tabela 5).

2.2.2.3 Incorporação

Novamente foi executada a operação de gradagem, dessa vez com o intuito de fazer-se a incorporação do fertilizante aplicado ao solo. Para essa operação foram utilizados os mesmos conjuntos motomecanizados e mensurados os parâmetros citados na operação de gradagem.

2.2.2.4 Rolagem

Uma prática cultural muito utilizada na região em estudo é a rolagem do solo antes da operação de semeadura. Os produtores em safras anteriores perceberam que, ao se preparar o solo com grades niveladoras/destorroadora ocasiona uma inconformidade da porosidade capilar, que afeta a ascensão da água por subirrigação, prejudicando o processo de desenvolvimento das plântulas. A operação com o uso de rolos compactadores favorece a ascensão da água pela capilaridade do solo beneficiando assim, a movimentação da água e o estabelecimento da cultura. Nas culturas de soja, esta prática já foi incorporada na região.

2.2.2.5 Semeadura e adubação

Para instalação da cultura, as sementes foram da variedade Unigigel MY9144 RR de ciclo precoce na totalidade da área, com poder germinativo entre 95% e 98%, segundo o fabricante.

As sementes foram tratadas com inoculante na quantidade de 1,0 L ha⁻¹ com a bactéria específica para a soja, denominada *Bradyrhizobium japonicum*, além do fungicida na dosagem de 0,5 L ha⁻¹ com o princípio ativo Metalaxyl-M + Fluodioxonil.

Para a operação de semeadura da cultura, foi utilizada uma semeadora-adubadora de precisão acoplada a um trator agrícola. Empregou-se o sistema de disco de corte e haste para o rompimento do solo, juntamente com o sistema de distribuição do fertilizante e o processo de distribuição das sementes, a vácuo. A semeadora foi regulada para que distribuísse 11 sementes por metro linear, com um espaçamento entre linhas de 0,45 m. Foi utilizada como adubação de base inserida no sulco de semeadura uma taxa fixa de 300 kg ha⁻¹ do fertilizante P₂O₅. A deposição da semente foi regulada para a profundidade de 0,03 m, enquanto o fertilizante mineral foi regulado a deposição a profundidade de 0,06 m.

Para essa operação foram medidos todos os parâmetros já citados na operação de gradagem, diferenciando apenas a forma de mensuração da largura efetiva de trabalho, capacidade de campo operacional e dose de insumos aplicados.

2.2.2.6 Aplicação de defensivos

A cultura da soja compete com outras culturas por água, luz e nutrientes, principalmente nos trinta primeiros dias após a emergência da planta. Após esse período crítico, a soja apresenta um rápido desenvolvimento, o que por si só promove o controle das plantas invasoras (EMBRAPA, 2007).

Durante o ciclo da cultura, as operações que englobam a aplicação de defensivos, referem-se principalmente ao controle de insetos e pragas, como a lagarta e o ácaro, bem como a aplicação de fungicida para o controle preventivo da ferrugem asiática no estágio produtivo e reprodutivo da planta.

2.2.2.7 Colheita

Na operação de colheita, pode haver a perda de grãos, que, será pouco expressiva se alguns cuidados forem tomados na condução da cultura e na condução desta operação. Quanto às especificações de desempenho e qualidade do serviço de colheita, as máquinas operam a velocidades de 4,0 a 6,5 km h⁻¹ devido às restrições de relevo, todavia compatível com as recomendações de 3,0 a 7,0 km h⁻¹ para perdas inferiores a 60 kg ha⁻¹ proposto por Mesquita et al. (2001). Foi adotado considerando a capacidade de campo operacional de 0,5 ha h⁻¹ para uma produtividade média acima de 3.000 kg ha⁻¹. Evita-se assim, que haja perdas desnecessárias, uma vez que a maioria das perdas ocorre nos mecanismos de corte da plataforma.

Após a colheita, os grãos de cada parcela foram transportados ao silo secador da propriedade em carreta graneleira com capacidade para 27.000 kg, onde foram pesados, em uma balança eletrônica com capacidade de carga de 100.000 kg com precisão de 10 kg, sofrendo os processos de secagem, limpeza, classificação e certificação das sementes, sendo então os grãos armazenados.

A produção da cultura analisada foi determinada pela totalidade da colheita obtida, sendo dividida pela área das parcelas para obter-se sua produtividade. A produção em kg será multiplicada pelo valor energético da soja em MJ kg⁻¹, para ser obtido o equivalente energético. O índice foi baseado em Pimentel (1980), o qual atribuiu à semente da soja, o valor energético correspondente a energia fóssil aplicada em sua produção, ou seja, de 16,74 MJ kg⁻¹.

2.2.2.8 Subirrigação

Em relação à disponibilidade de água, a propriedade é abastecida pelo Rio Urubu, de acordo com as disponibilidades e oportunidades hídricas que o sistema de produção oferece. Foi construída uma baía na margem do rio para servir como reservatório de água, onde estão instalados a bomba de captação e os motores elétricos que abasteceram o sistema, onde a água é bombeada na vazão de 700 m³ h⁻¹, para os canais de irrigação em formato trapezoidal, dispostos ao longo das parcelas, formando o perímetro irrigado.

Para o manejo da irrigação na cultura a disponibilização de água é por gravidade ao longo das parcelas, com declividade total de 1,8%. A sistematização do solo é realizada em nível, facilitando a disposição em parcelas, onde é nivelada,

com planejamento no tocante a manutenção, entrada e saída de máquinas e tratos culturais.

O sistema apresenta como vantagem a irrigação uniforme com melhor suprimento de água, para satisfazer as exigências de evapotranspiração da cultura, redução da perda de nutrientes do solo, controle de pragas e doenças, e da temperatura do solo.

As informações, provenientes do uso de tecnologias alternativas de irrigação, de fácil implantação e baixos custos, propõem redução nas perdas das culturas anuais, causadas pelas estiagens em períodos críticos para a cultura, podendo aumentar o rendimento, prevenindo-se dos riscos e danos das intempéries climáticas (VIVAN, 2010).

2.3 Variáveis selecionadas para a produção de soja

As atividades que exigem consumo energético (input) na produção agrícola para a cultura de soja foram calculadas valores para as seguintes variáveis: mão-de-obra; sementes; fertilizantes; defensivos; combustíveis, máquinas e equipamentos, e irrigação.

2.3.1 Mão de obra

A energia despendida pela mão de obra é obtida pela Equação 1, a qual relaciona os dados da mão de obra, número de funcionários e a duração da jornada de trabalho, quantidade homem-hora em cada operação, desde o estabelecimento da cultura, manejo de fertilizantes e insumos, aplicação de defensivos, bem como a operação de colheita, por área, observando sempre o índice energético. Para as operações de cultivo da soja o tempo gasto com mão de obra normalmente prevalece as oito horas diárias, exceto nos períodos de semeadura e colheita, quando as atividades chegam a até doze horas diárias. O coeficiente energético utilizado para a mão de obra foi de $2,2 \text{ MJ h}^{-1}$ (SERRA et al., 1979).

$$E_o = \Sigma (h I_{mo}) \quad (1)$$

Em que:

E_{mo} = é o consumo total de energia por hectare para a mão de obra, ($MJ ha^{-1}$);

h = é o período de tempo trabalhado em um hectare, ($h ha^{-1}$);

I_{mo} = é o índice de gasto de energia, igual a $2,2 MJ h^{-1}$.

2.3.2 Sementes

Para a determinação da energia referente ao material de propagação, que relaciona a quantidade de semente utilizada, com a energia contida no grão. O índice energético adotado para conversão da massa das sementes em energia foi de $33,44 MJ kg^{-1}$ (Pimentel, 1973; Bueno, 2002), o qual possui valor do dobro do custo energético grão colhido (Equação 2).

$$E_s = q I_s \quad (2)$$

Em que:

E_s = é o consumo total de energia por hectare para a semente, ($MJ ha^{-1}$);

q = é a quantidade de semente utilizada em um hectare, ($kg ha^{-1}$);

I_s = é o índice de energia da semente, ($MJ kg^{-1}$).

2.3.3 Fertilizantes

A energia demandada pela taxa de aplicação de fertilizantes é fornecida através de recomendação técnica especificada, a taxa de aplicação (volume, massa, unidade) por área é obtida diretamente. Multiplicando-se cada insumo aplicado pelo seu respectivo valor energético, obtém-se a contribuição de cada insumo a entrada de energia na matriz energética. O valor da energia contido no insumo é em função da quantidade de energia acumuladas para sua extração, e processamento industrial do nutriente do fertilizante produzido. Foram adotados valores de

coeficientes energéticos adotados por Macedônio e Picchioni (1985) (CAMPOS et al., 1998; ZANINI et al., 2003).: N= 63,79 MJ kg⁻¹; P₂O₅ = 13,97 MJ kg⁻¹; KCl = 7,19 MJ kg⁻¹ (Equação 3).

$$E_f = \quad (3)$$

Em que:

E_f = é o consumo total de energia por hectare para os fertilizantes, (MJ ha⁻¹);

q_i = é a quantidade do insumo utilizado em um hectare, (kg ha⁻¹);

I_c = é o índice de energia, (MJ kg⁻¹);

n = é o enésimo fertilizante.

2.3.4 Defensivos

O herbicida recomendado para a cultura foi o glifosato, para o manejo de plantas invasoras que infestam a cultura da soja, na dosagem de 1,0 L ha⁻¹ por aplicação, do produto comercial Rondap®. Para o controle da lagarta foi realizadas três aplicações, sendo a primeira de inseticida fisiológico com princípio ativo Thiflumuron, na dosagem de 0,3 L ha⁻¹, juntamente com a aplicação de um inseticida sistêmico, com princípio ativo Metamidofós no início de enchimento de grãos, na dosagem de 1,0 L ha⁻¹, além do fungicida sequencial na dosagem 0,2 L ha⁻¹. Na segunda aplicação na maturação fisiológica para controle de percevejos, repetiu-se a dosagem inicial e, na terceira aplicação no estágio de início de enchimento de grãos aplicaram-se as quantidades de 0,3 L ha⁻¹ de fungicida sistêmico, com os seguintes princípios ativos: Azoxistrobina e Ciproconale e para a aplicação de inseticida piretróide utilizou-se de 0,2 L ha⁻¹ do princípio ativo Tiametozam e Lambda-cialotrina, para controle de doenças de final de ciclo. As atividades voltadas ao controle vetorial são consideradas em caráter preventivo, ou seja, aplicadas independente de focos de infestação.

Para a verificação da energia dos inseticidas, herbicidas e fungicidas gastos, que considera o volume do insumo e a energia embutida, utilizou-se a (Equação 4).

$$E_d = \quad (4)$$

Em que:

E_d = é o consumo total de energia por hectare para os defensivos, (MJ ha^{-1});

V = é o volume do insumo utilizado em um hectare, (L ha^{-1});

la = é o valor energético dos defensivos, (MJ L^{-1});

n = é o enésimo defensivo.

O herbicida utilizado para a cultura da soja foi o glifosato, na dosagem de $3,0 \text{ L ha}^{-1}$, com o coeficiente energético de $454,20 \text{ MJ kg}^{-1}$, adotado por Fluck e Baird (1982). Utilizaram-se os valores energéticos dos defensivos recomendados por Pimentel (1980), $364,15 \text{ MJ L}^{-1}$ para os fungicidas e $92,18 \text{ MJ L}^{-1}$ para os inseticidas.

2.3.5 Máquinas e equipamentos

Para a determinação da energia demandada por unidade de área nas máquinas e equipamentos é empregado o método da depreciação material proposto por Romanelli e Milan (2010), onde é relacionada à energia com a capacidade de campo operacional que desempenham nas operações mecanizadas (Equação 5).

$$D_{me} = \frac{M \cdot DEE}{V_u \cdot CcO} \quad (5)$$

Em que:

D_{me} = energia despendida pela depreciação energética de máquinas e equipamentos, (MJ ha^{-1});

M = massa de máquinas e de equipamentos, (kg);

DEE = demanda específica de energia para máquinas e equipamentos, (MJ kg^{-1});

V_u = vida útil de máquinas e equipamentos, (h);

CcO = capacidade de campo operacional, (ha h^{-1}).

Segundo Ulbanere (1988) a demanda específica dos dados da frota se diferenciam entre tratores e colhedoras autopropelidos, apenas por os mesmos

dependem da própria automotriz, o que não ocorre com implementos montados ou de arrasto. Sendo a demanda de energia para serem fabricadas de máquinas motoras é de $68,86 \text{ MJ kg}^{-1}$, enquanto para os outros equipamentos movidos, o valor é de $57,22 \text{ MJ kg}^{-1}$.

2.3.6 Combustíveis e lubrificantes

Para a determinação do consumo horário de combustível no conjunto motomecanizado, o reservatório de combustível do trator foi completado antes do início da operação agrícola na parcela analisada, com o trator posicionado em um plano de referência. Após o término da operação da parcela, o trator foi posicionado novamente no plano de referência e teve o seu reservatório completado com o uso de galão plástico com capacidade de 50 litros, graduado a cada 1 litro, com o auxílio de uma bureta graduada de 500 ml. Pela diferença encontrada entre o volume inicial e o final, obteve-se o volume de combustível demandado em cada operação. Os gastos referentes ao combustível foram contabilizados por área, incluindo todos os tratamentos culturais, que vão desde a adubação, semeadura, aplicação de defensivos, operações realizadas com o trator, até a operação de colheita do grão. Para a determinação da energia despendida pelo combustível foi utilizada a (Equação 6).

(6)

Em que:

E_C = é o consumo total de energia por hectare para os combustíveis, (MJ ha^{-1});

V = é o volume de combustível utilizado por área, (L ha^{-1});

P_{CC} = é o poder calorífico do combustível, (MJ L^{-1}).

Utilizaram-se os valores do poder calorífico do combustível, segundo o Balanço Energético Nacional, correspondente a $37,80 \text{ MJ L}^{-1}$, $35,94 \text{ MJ L}^{-1}$ e $39,00 \text{ MJ L}^{-1}$, respectivamente, para o óleo diesel, lubrificantes e graxas.

2.3.7 Subirrigação

Para o funcionamento do sistema de irrigação o mesmo é acionado por energia elétrica, a propriedade possui um contrato de demanda média das potências elétricas ativas ou reativas solicitadas ao sistema fornecedor, pelas cargas de consumo ligadas simultaneamente, durante um intervalo de tempo especificado, junto à companhia distribuidora de energia elétrica regional. É uma grandeza não cumulativa, ou seja, não representa um valor que pode ser discretizado pelo número de dias, para efeito de análise. Trata-se de uma grandeza com comportamento variável em função do regime de trabalho de cada unidade consumidora.

Assim, os conjuntos de motores elétricos e bombas, somente funcionam alimentando os canais de irrigação com água, nos meses críticos do ano (junho/setembro) onde não ocorrem precipitações nesse período, e respeitando-se o horário não recomendável de demanda de energia, entre 18 e 22 horas.

A irrigação foi conduzida de forma a manter o solo com umidade de aproximadamente 70% da capacidade de campo. Para a determinação da energia despendida emprega-se a (Equação 7).

$$\text{—————} \quad (7)$$

Em que:

E_{ir} = é o consumo total da energia por hectare para irrigação, (MJ ha^{-1}).

F_{ic} = fator de energia contida na energia na equação elétrica segundo Pimentel (1980), ($11,98 \text{ MJ kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$);

C_s = Consumo faturado na unidade medidora, (kWh);

A_{ir} = área irrigada total pelo sistema, (ha).

2.4 Determinação da energia consumida

Com base nos fluxos de energia de mão de obra, sementes, fertilizantes, defensivos, depreciação de máquinas e implementos, combustíveis e lubrificantes, e irrigação, determinamos o fluxo de energia consumida (EC) do sistema de produção de soja analisado (Equação 8).

(8)

Em que:

E_C = energia consumida no sistema, (MJ ha^{-1});

E_{mo} = energia despendida pela mão-de-obra empregada, (MJ ha^{-1});

E_s = energia demandada para a produção das sementes, (MJ ha^{-1});

E_f = energia demandada para a fabricação de fertilizantes, (MJ ha^{-1});

E_d = energia demandada para fabricação dos defensivos, (MJ ha^{-1});

D_{me} = energia para fabricação das máquinas e implementos depreciada ao longo da vida útil, (MJ ha^{-1});

E_c = energia demandada pelo consumo das máquinas, (MJ ha^{-1});

E_{ir} = energia demandada pelo uso do sistema de irrigação, (MJ ha^{-1}).

2.5 Determinação da energia produzida (EP)

A produtividade da cultura foi obtida considerando a produção física dos grãos colhidos, dividindo-se pela área analisada (kg ha^{-1}). Foi considerada como energia produzida (EP) (*outputs*), a produção obtida multiplicando pelo valor energético da cultura ($16,85 \text{ MJ Kg}^{-1}$). Índice sugerido por Pimentel (1980) (Equação 9).

(9)

Em que:

EP = energia produzida no sistema, (MJ ha^{-1});

$Prod$ = produtividade da colheita obtida, (kg ha^{-1});

Ind = valor energético correspondente, (MJ kg^{-1}).

2.6 Cálculo do balanço energético do sistema de produção agrícola

O Balanço Energético visa contabilizar os fluxos de energia dos insumos utilizados na cultura analisada, demandada ao longo da safra agrícola, onde se

mensurou o valor de produtividade dos grãos, identificando assim a energia produzida. Além do consumo de energia por área, identificado assim a energia consumida, que é a demanda total de todas as energias gastas incorporadas no processo de produção da soja, como: mão de obra, sementes, depreciação de máquinas e implementos, fertilizantes químicos, defensivos, combustível, lubrificantes e irrigação. A eficiência é refletida pelo ganho líquida e pela relação produção demanda, além da quantidade necessária para produzir ou processar determinado produto, possibilitando a construção de indicadores comparáveis entre si, que permitam a intervenção no sistema produtivo visando melhorar sua eficiência (ROMANELLI, 2007).

2.7. EROI

Define-se EROI (*energy return over investment*) (HALL, 2004) como a quantidade de energia que é gasta, para produzirmos uma determinada quantidade de energia. O EROI é um fator determinante do preço da energia, assim, fontes de energia que podem ser aproveitadas com custo relativamente baixo, permitirá que o preço permaneça baixo. À proporção que a fonte de energia diminui e se torna mais escassa, é mais difícil de extrair ou produzi-la, se torna mais alto.

Refere-se ao quociente entre energia disponibilizada/demandada em um processo produtivo, podendo ser associado como lucratividade energética. O índice que determina o ganho líquido de energia que o sistema estudado obtém durante seu processo de produção pela energia investida é calculado segundo (Equação 10).

$$\text{EROI} = \frac{\text{EP}}{\text{EC}} \quad (10)$$

Em que:

EROI = Retorno em energia sobre energia investida, adimensional;

EC = Energia consumida, em MJ ha⁻¹;

EP = Energia produzida, em MJ ha⁻¹.

2.8. Balanço de Energia (BE)

Define-se balanço de energia como atividade ou instrumento destinado a contabilizar as energias produzidas e as energias consumidas em determinado sistema de produção (BUENO et al., 2000). Para algumas culturas, é de interesse conhecer a taxa de conversão de energia, ou ganho energético total que o sistema gera. O índice que mede essa relação é a diferença entre a energia útil que é produzida no sistema (EP) (*output*) e a energia cultural que é consumida no mesmo (EC) (*input*). Esse índice é denominado balanço de energia (BE). Obtendo-se assim o ganho líquido por uma área cultivada (Equação 11).

(11)

Em que:

BE= balanço de energia, (MJ ha⁻¹).

2.9 Eficiência Cultural (EfC)

O índice mais utilizado na literatura em análise energética de culturas agrícolas (BUENO, 2002), é o que trata da razão entre as saídas úteis do sistema, na forma de energia, e os insumos culturais utilizados (todos os insumos, excluindo a energia solar), também na forma de energia. O EfC, nesse caso será sempre uma unidade a mais que o EROI, por considerar a relação entre a energia produzida bruta e a consumida.

Para obtermos o cálculo da eficiência cultural, seguimos a mesma metodologia executada no balanço energético, entretanto, dividem-se as saídas de energia pelas suas respectivas entradas. E, os resultados são identificados pelo retorno da unidade energética disponibilizada na produção agrícola. Esse índice é denominado "eficiência cultural", e é representado pela (Equação 12).

—

(12)

Em que:

EfC = Eficiência Cultural, adimensional.

2.10 Energia Incorporada (EI)

A modernização da agricultura está vinculada a diversos fatores, dentre eles a intensificação de produtos obtidos com alto conteúdo energético. Obtemos este índice, relacionando uma Energia incorporada por Unidade de o Produto obtido, ou seja, é a energia contida nos insumos culturais para produção de um bem ou produto em (MJ), em relação à quantidade de produto final obtido em quilogramas (kg) (Equação 13).

—

(13)

Em que:

EI = Energia incorporada, (MJ kg⁻¹);

Prod = Produtividade da colheita obtida, (kg ha⁻¹).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A construção da matriz energética da cultura da soja iniciou-se pela definição do período enfocado, detalhando-se as operações mecanizadas efetuadas e a sequência operacional. As variáveis que compõe a matriz energética física da cultura foram transformadas em coeficientes energéticos, conforme a metodologia adotada, seguindo-se as orientações referentes às transformações de unidades multiplicadas pelos respectivos índices de energia. A revisão bibliográfica considerou diversos estudos que focalizaram a abordagem de energia. Esta, diz respeito a relação dos fluxos de energia, constituindo-se em parâmetros fundamentais ao analisar a eficiência e sustentabilidade na produção de sistemas agrícolas.

A Tabela 6 apresenta os dados de vida útil e da massa dos conjuntos autopropelidos e implementos utilizados na produção de soja, onde esta determinada a depreciação de máquinas por área trabalhada (DM).

Tabela 6 - Depreciação do maquinário

Operação	Máquinas			Implementos			Depreciação do maquinário kg ha ⁻¹
	Potência	Vida útil	Massa	Implemento	Massa	Vida útil	
	kW	1000 h	kg	Tipo	kg	1000 h	
Gradagem	148,00	12	8.100	Grade	1.405	5	0,38
Gradagem	88,30	12	6.178	Grade	1.175	5	0,32
Fertilização lanço	88,30	12	6.178	Distribuidor	260	3	0,13
Incorporação	88,30	12	6.178	Grade	1.352	5	0,37
Rolagem	88,30	12	6.178	Rolo	3.000	3	0,28
Semeadura- adubação	148,00	12	8.100	Semeadora	6.000	3	0,88
Aplicação	63,00	12	2.900	Pulverizador	2.120	10	0,66
Irrigação	183,80	15	1.015	Bomba	569	3	0,29
Colheita	209,00	12	14.670	Plataforma	1.480	3	0,67

Foram realizadas medições contínuas dos fluxos de massa para um ciclo da cultura da soja modificada geneticamente. Os componentes do fluxo de energia quantificaram a energia diretamente consumida e a indiretamente utilizada nas variáveis previamente estabelecidas no sistema produtivo em estudo. As entradas energéticas foram classificadas por Tipo (direta e indireta), Fonte (biológica, fóssil e industrial), e Forma (mão de obra, sementes, combustíveis e lubrificantes, máquinas e implementos, fertilizantes, defensivos e irrigação) (Tabela 7).

Tabela 7 - Insumos da implantação e condução da soja na área experimental

Evento	Dosagem	Produto Comercial/Alvo
Semeadura 10/05 a 26/05		
MY9144 RR	11 sementes m ⁻¹	54 kg ha ⁻¹
Profundidade	0,03 m	
Espaçamento fileiras	0,45 m	
Tratamento de sementes	0,5 L ha ⁻¹	Metalaxyl-M + Fluodioxonil/semente
Inoculante:	1,0 L ha ⁻¹	Bradyrizobium Japonicum
Fungicida sequencial	0,4 L ha ⁻¹	Ferrugem asiática
Fungicida (sistêmico)	0,3 L ha ⁻¹	Azoxistrobina e Ciproconale
Fertilização	150 kg ha ⁻¹ + 300 kg ha ⁻¹	KCl + P ₂ O ₅
Herbicida	3,0 L ha ⁻¹	Glyphosate – Controle seletivo do complexo de invasoras da soja.
Inseticida (sistêmico)	2,0 L ha ⁻¹	Metamidofós / lagarta da soja.
Inseticida (piretróide)	0,2 L ha ⁻¹	Tiametozam e Lambda-cialotrina (<i>Euschistus heros</i> , <i>Piezodorus guildinii</i> e <i>Nezara viridula</i>)
Inseticida (fisiológico)	0,6 L ha ⁻¹	Thiflumuron (<i>Nebara viridula</i> , <i>Anticarsia gemmatalis</i> e <i>Pseudoplusia includens</i>).

Nas operações agrícolas para a produção da cultura, o tempo gasto com mão de obra foi de 6,5 h ha⁻¹, divididos em todas as etapas do processo. Prevaleram as jornadas de trabalho de oito horas diárias, com exceção da operação de colheita onde a atividade foi estendida até doze horas diárias. Nas demandas referentes o combustível foi mensurado os volumes e relacionados por área, em cada operação descrita no conjunto de operações, que totalizada, consumiram 48,4 L ha⁻¹. Conforme detalhamento das etapas descrito na Tabela 8.

Tabela 8 - Fluxo de material na produção de soja analisada

Operação	Combustível	DM	Mão de obra	Insumos		
	L ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	h ha ⁻¹	Tipo	Quantidade	Unidade
Gradagem	4,50	0,38	0,20			
Adubação	1,60	0,13	0,60	KCl	150	kg ha ⁻¹
Incorporação	4,50	0,37	0,20			
Rolagem	2,75	0,28	0,20			
Semeadura/ adubação	11,98	0,87	2,30	Semente + P ₂ O ₅	54 300	kg ha ⁻¹
Aplicação I	1,2	0,22	0,6	Agroquímicos ¹	2,50	L ha ⁻¹
Aplicação II	1,2	0,22	0,6	Agroquímicos ¹	2,50	L ha ⁻¹
Aplicação III	1,2	0,22	0,6	Agroquímicos ²	1,50	L ha ⁻¹
Colheita	19,5	0,67	1,2			
Irrigação		0,29				
Total	48,40	3,65	6,50			

¹ Thiflumuron (0,3 L ha⁻¹) + Metamidofós (1,0 L ha⁻¹) + Tiametozam e Lambda-cialotrina (0,2 L ha⁻¹)

² Azoxistrobina e Ciproconale (0,2 L ha⁻¹) + Tiametozam e Lambda-cialotrina (0,2 L ha⁻¹)

Os resultados dos componentes energéticos de entrada e saída de energia por área e a eficiência na produção de soja são apresentados na Tabela 9, a produção física da soja estudada teve a produtividade de 3.468,56 kg ha⁻¹. Através dos resultados obtidos, foi possível verificar uma grande variação entre os dados estimados e aqueles apresentados pelas publicações. Esta variação se torna ainda mais acentuada quando se compara o dispêndio energético.

Tabela 9 - Análise de energia do sistema de produção estudado

Insumo	Fluxo de material		Índice energético	Fluxo de energia	
	Quantidade	Unidade		MJ unid ⁻¹	MJ unid ⁻¹
	Unidade ha ⁻¹				
Combustível	48,40	L	37,80	1829,52	19,2
Graxa/lubrificante	0,22	L	7,19	7,97	0,08
Maquinas/Equipamentos	3,36	kg	63,15	228,77	2,40
Mão de obra	6,50	h	2,20	14,30	0,15
KCl	150	kg	7,19	1078,50	11,32
P ₂ O ₅	300	kg	13,97	1257,30	13,19
Herbicida	3,00	L	454,20	1362,60	14,30
Inseticida	3,30	L	92,18	304,20	3,19
Fungicida	0,70	L	364,15	254,90	2,67
Inoculante	1,00	L	691,48	691,48	7,26
Semente	54,00	kg	33,44	1805,76	18,94
Energia Elétrica	58,10	kWh	11,98	696,04	7,30
Energia Consumida (EC)		MJ ha ⁻¹		9.531,34	
Energia Produzida (EP)	3.468,56	kg	16,85	58.445,20	100%

Devido à importância do tema e do caráter individual de cálculo, por ser também instrumental integrante de parte das composições energéticas dos balanços, a discussão dos mesmos foi apresentada em dois momentos: inicialmente, foram feitas discussões entre a apresentação da matriz energética calculada com dados de publicações sobre a produção de soja, e outro, comparando a matriz energética estudada com os resultados obtidos por Romanelli et al. (2012).

Como a cultura estudada apresenta algumas características próprias, no que tange a implantação e condução de sua produção, com diferenças significativas principalmente na resposta a utilização de insumos e conseqüentemente na produtividade obtida, com épocas de semeadura e regiões utilizadas distintas, serão

apresentados os resultados, tanto de aspectos produtivos quanto energéticos, de forma comparativa.

A energia consumida pelo sistema estudado, para a produção de soja corresponde a $9,53 \text{ GJ ha}^{-1}$, enquanto que sua energia produzida, determinada através dos grãos colhidos, foi de $58,45 \text{ GJ ha}^{-1}$. Assim, o EROI resultante foi de 5,13.

Do ponto de vista energético, o balanço de energia que avalia a energia líquida, ou seja, a diferença entre a energia convertida e a energia consumida na produção resultante do processo produtivo foi de $48,91 \text{ GJ ha}^{-1}$, e a energia incorporada dos grãos colhidos de $2,75 \text{ MJ kg}^{-1}$ (Tabela10). Foram desconsiderados os restos culturais, no computo da produção física, pela sua usual incorporação ao solo e conseqüente reaproveitamento no processo.

Assenheimer et al. (2009), ao compararem o balanço energético na produção da soja em sistemas de produção orgânica e convencional no estado do Paraná, encontraram $41,68 \text{ GJ}$ e $113,82 \text{ GJ}$, respectivamente. A energia consumida pelo sistema para a produção de um hectare foi de $12,25 \text{ GJ}$ (orgânico) e $16,72 \text{ GJ}$ (convencional).

Entretanto, além desse tipo de análise energética, tem-se ainda o estudo da eficiência cultural, que atualmente tem despertado interesse pelo fato da soja ser matéria prima fundamental para a produção de biodiesel.

Tabela 10 - Índice de eficiência energética do sistema de produção estudado

Índice energético	Valor	Unidade
EROI	5,13	
EI	2,75	MJ kg^{-1}
BE	48,91	GJ ha^{-1}
E_{rc}	6,13	

Segundo Romanelli (2007), a quantidade líquida disponibilizada (BE) por fonte de energia e a lucratividade energética (EROI), são ambos importantes, porém o tempo do processo cultural não é contemplado. Sendo assim, os índices anualizados permite compararmos diferentes sistemas produtivos que excedam um ano de cultivo. Porém, superestimam as culturas anuais, as quais são cultivadas na maioria das vezes, nos meses mais propícios climaticamente do ano.

Resultados da eficiência cultural com índices superiores a um representam um ganho energético, ou seja, é gerada maior energia de saída do que de entrada na produção, sendo relativamente eficiente do ponto de vista termodinâmico. Resultados com índices inferiores a um representam uma perda energética, caracterizando uma produção termodinamicamente ineficiente, portanto tendencialmente insustentável.

A eficiência cultural encontrada para a produção agrícola de soja subirrigada é de 6,13 demonstrando que, para cada unidade de energia aplicada na produção, obtiveram-se um retorno de 5,13 unidades, subtraindo-se a unidade investida. Considerou-se favorável a eficiência cultural, pois, baseando-se em Schroll (1994), que sugere como sustentável os índices de eficiência energética acima de dois, o que caracteriza a produção desse sistema, como um sistema de sustentabilidade ecológica.

Segundo a FAO (2004), há necessidade urgente de se estudar o balanço de energia de todos os sistemas de produção de culturas no planeta, a fim de evitar ou mesmo substituir as culturas, com eficiência cultural menor do que um, bem como verificar e quantificar o “sequestro” de dióxido de carbono da atmosfera pelos ecossistemas naturais e pelos sistemas agrícolas.

Na verdade a eficiência cultural, quase que independe da produtividade obtida, entretanto, depende muito do nível tecnológico que estão sendo utilizados, em particular dos: fertilizantes químicos, defensivos, operações, entre outros (Odum e Barret, 2008). Ainda segundo os autores, alguns dos desafios da pesquisa agrícola são aumentar a produtividade da cultura e o teor de óleo do grão, bem como promover a utilização da adubação verde e fixação simbiótica como fonte de Nitrogênio.

É perceptível a predominância da energia do tipo indireta, mais a dos combustíveis de origem fósseis no sistema agrícola estudado. Isto demonstra a dependência do sistema de fontes de energia química providas de fertilizantes ($3,03 \text{ GJ ha}^{-1}$), defensivos ($1,92 \text{ GJ ha}^{-1}$), e óleo diesel ($1,80 \text{ GJ ha}^{-1}$).

Os valores energéticos referentes aos tipos de energia indireta e direta apresentam-se bem díspares. A energia indireta ($5,87 \text{ GJ ha}^{-1}$) representa mais de 60% da energia direta ($3,65 \text{ GJ ha}^{-1}$) utilizada no sistema, constando-se também, que as fontes energéticas utilizadas no sistema agrícola apresentaram-se pouco equilibradas.

A participação da energia de fonte industrial predominou sobre as energias fósseis e por sua vez, ambas predominaram sobre a fonte de energia biológica utilizada. Isto significa que a fonte biológica foi pouco expressiva, observando-se há pouca contribuição da força de trabalho humana no sistema agrícola estudado, demonstrando ser este um sistema agrícola bem tecnificado, e altamente mecanizado. Do total de energia gasto para a implantação desse cultivo com energia indireta, observou-se que gastos referentes à adubação são evidenciados para os fertilizantes, com ênfase no fósforo e potássio (27,46%) sendo os índices energéticos desses componentes considerados baixos, em relação ao nitrogênio que apresenta $63,79 \text{ MJ kg}^{-1}$. Elemento esse não utilizado no estudo em razão da cultura da soja ter baixa exigência de nitrogênio além de praticar a simbiose com as micorrizas do solo.

A participação das energias diretas e fontes biológicas verificadas no uso de sementes contemplam 21,23% do dispêndio total de energia consumida, o que representa 27,06% da energia indireta inserida no sistema agrícola. Resultado semelhante, de 24,73%, foi obtido por Comitê (1993), em sistema convencional de produção de soja.

O material de propagação híbrido (fonte biológica) apresenta um alto dispêndio energético no sistema, devida à elevada incorporação de energia na sua produção (PIMENTEL et al., 1973).

A tomada de decisão da quantidade de fertilizante a ser aplicada pelos produtores depende das análises de solo, mas principalmente do seu custo de aquisição. Este pode representar em até 30% do investimento total de produção, dependendo da região produtora e do ano/safra em questão (IEA, 2011).

Destaque também fica com os defensivos que são utilizados em pequeno volume, mas a grandes custos energéticos. Estes têm uma expressão de 20,16% da matriz energética. Foi mensurada a aplicação de herbicida com 14,3% do gasto energético, em decorrência do controle de invasoras, teoria amplamente adotada no sistema de plantio direto. Esta porcentagem significativa está relacionada ao fato do herbicida utilizado apresentar valor altamente energético (PIMENTEL, 1980).

Neste século, os herbicidas formulados com o princípio ativo glyphosate, tem ganhado expressão em virtude do crescimento na área semeada com culturas resistentes à molécula (RODRIGUES; ALMEIDA, 2005). O fungicida consumiu 2,67 e 3,19% referem-se ao uso de inseticida visando o combate dos principais insetos-

praga que atacam a cultura, como a vaquinha, os pulgões e o controle da lagarta desfolhadoras da soja, onde o ataque ao inseto possui amplo ciclo de reprodução. O que demonstra a dependência energética destes insumos para a condução da cultura.

Nos dispêndios com energia direta, verifica-se a importância da energia fóssil na produção. Sendo do total empregado com 19,29% foram provenientes do consumo de óleo diesel, utilizado nas máquinas agrícolas, com um consumo de 1.829,52 MJ ha⁻¹ para a produção da soja. Lubrificantes participaram com apenas 0,09%. Estes resultados reforçam a busca de diversos autores para a pesquisa de fontes alternativas de energia utilizáveis na agricultura.

Valor semelhante foi encontrado por Fernandes et al., (2008), que em pesquisa determinaram o custo energético das principais operações agrícolas mecanizadas em preparo reduzido e semeadura de milho, obtiveram uma demanda de 2004,5 MJ ha⁻¹.

Mesquita et al. (1982), ao compararem a demanda de óleo diesel em três sistemas de produção de soja no Paraná, encontraram 53,0% no sistema convencional, 48,3% no reduzido e 26,3% no plantio direto, verificando menor consumo do mesmo em plantio direto. Afirmam ainda os autores que as sementes consumiram 27,5% dos dispêndios totais, da energia consumida no experimento.

O custo da maquinaria agrícola, fundamentalmente o combustível, segundo Ibañez e Rojas (1994) varia entre 35 a 45% do custo total de produção. Entretanto várias pesquisas têm estabelecido que o consumo de combustível representa alta porcentagem do custo energético de produção na agricultura, em escala empresarial (FLUCK, 1979; FAO, 1990; ROMANELLI, 2007).

No Brasil, que é um país de dimensões continentais, o consumo de combustível nas operações agrícolas pode apresentar variação em uma mesma operação, pois depende dos fatores clima, relevo, tipo de solo, profundidade de trabalho, tamanho e forma da área de trabalho, habilidade do operador e outros (GAZZONI, 2006).

A análise de fluxo é uma ferramenta fundamental para a redução da utilização das máquinas, visando diminuir o gasto energético (SANTOS et al., 2000; ZANINI et al., 2003 e CAMPOS et al., 2004). Sendo o combustível um insumo indiretamente utilizado, ressalta-se assim a importância em se monitorar como os insumos são

aplicados e não apenas o quanto se aplica, como no caso dos fertilizantes utilizados diretamente nos sistemas produtivos.

Considerando-se simultaneamente fatores de produção e as operações mecanizadas quanto à demanda de energia, obtiveram-se componentes dos quais os 16% mais demandantes de energia consomem 90,15% da demanda total. Esses fatores de produção constituem o grupo que mereceria maior atenção na busca pela melhoria da eficiência do sistema produtivo enfatizando a necessidade de identificá-los para que os esforços em melhoria fossem concentrados nos principais causadores dos efeitos monitorados (ROMANELLI, 2007).

Quanto à mão de obra, embora tenha contribuído com pequena parcela de energia consumida com 14,3 MJ ha⁻¹ e 0,15% do total de energia consumida, fazendo correlação direta entre o baixo dispêndio energético comparado ao consumo de energia fóssil, evidenciando ser este sistema bem tecnificado e o elevado grau de intensidade da mecanização no sistema.

No presente estudo condicionaram-se as horas exclusivamente destinadas ao trabalho. O índice de mão de obra determinados única e exclusivamente pela demanda energética física do trabalhador.

Dado similar as estimativas de Lima (2004), que comparou a criação de postos de trabalho entre a agricultura empresarial e a familiar. Segundo o autor, em média, emprega-se um trabalhador para cada 100 ha cultivados na empresarial e 10 trabalhadores na familiar. Sachs (2004), estimou a quantidade de empregos diretos no setor agropecuário na produção de grãos em geral, em equivalentes 7 homem ano⁻¹.

Knowles e Bukantis (1980) calcularam o gasto de 8,6 h ha⁻¹ para a cultura de girassol e 7,1 h ha⁻¹ para a cultura de soja, considerando todas as etapas de produção.

3.1 Apresentação e discussão da matriz energética calculada em comparação com os cenários nacionais

A soja é a mais importante cultura do agronegócio brasileiro. Sendo assim é preciso levantar se os produtores de soja nos principais estados produtores estão utilizando seus recursos produtivos tecnicamente de forma eficiente.

Uma análise de sistema agrícola deve levar em consideração as características peculiares da região. Cabe lembrar que a modernização dos processos produtivos da agricultura no Brasil não se deu de maneira uniforme entre as diversas categorias de produtores e das culturas por eles cultivados, expandindo-se de forma desigual entre as cinco regiões brasileiras e mesmo quando se expandiu na mesma região, ocorreu em estados distintos. Tais diferenças ocorrem devido a fatores como distinção no manejo da cultura, produtores de diferentes localidades, diferentes entradas de insumos no processo, diferenças de escala, além de métodos e objetivos intrínsecos a cada estudo.

Essa expansão vem acontecendo não só em regiões essencialmente agrícolas, e provocou uma nova fronteira agrícola, que está se tornando cada vez mais promissora para regiões de baixas latitudes. O chamado “Mapitoba”, região do Bioma Cerrado que compreende as regiões produtoras do Maranhão, Piauí, Tocantins e Oeste Baiano. A alta produtividade nessas regiões ocorre devido as boas condições edafoclimáticas e a adoção de tecnologias no cultivo da cultura.

Os experimentos realizados pela Embrapa Soja tornou possível ao Brasil cultivar a soja em regiões climáticas completamente diversas como as do Sul e do Norte do País, o que possibilita, inclusive, a existência de dois ciclos distintos de cultivo da cultura no mesmo ano agrícola (EMBRAPA, 2007).

Romanelli et al. (2012) analisaram nove cenários de produção de soja distintos, representando os nove estados de maior representatividade onde a soja é produzida no Brasil. Quatro regiões foram abordados: região Sul, com os estados do Rio Grande do Sul (RS) e Paraná (PR), região Sudeste, com os estados de São Paulo (SP) e Minas Gerais (MG), região Nordeste, com os estados da Bahia (BA) e Maranhão (MA), Centro Oeste, com o estados de Mato Grosso do Sul (MS), Goiás (GO) e no estado de Mato Grosso (MT).

Os dados foram coletados em uma publicação de periodicidade anual focada no custo de produção agrícola (AGRIFNP, 2011), cuja a edição traz o custo de produção das principais culturas no Brasil na safra 2009/10, os dados são determinados pela quantidade de operações agrícolas realizadas, e os insumos inseridos no processo produtivo ($h\ ha^{-1}$, $kg\ ha^{-1}$, $L\ ha^{-1}$), e suas unidades em ($R\$ h^{-1}$, $R\$ kg^{-1}$, $R\$ L^{-1}$). Embora, os dados divulgados não enfoquem fluxos de materiais e de energia, fornecem subsídios para que seja possível suas determinações, afirmam os autores.

O sistema de plantio de soja analisado nos cenários foi o direto, e a análise da cultivar foi a geneticamente modificada (RR). Após o levantamento de todas as operações agrícolas, cada operação foi detalhada quanto às unidades energéticas de acordo com seus parâmetros, sendo elaboradas tabelas de suporte para cada cenário agrícola com os valores das variáveis analisadas na pesquisa em estudo, ou seja, mão de obra, sementes, fertilizantes, defensivos, máquinas e equipamentos, combustível e lubrificantes, além dos tempos de operações mecanizadas de preparo do solo, semeadura, aplicação de defensivos e colheita. Não foram levantados valores sobre a variável irrigação, pois em nenhum dos cenários analisados era efetivada a operação.

Para analisar com precisão a evolução energética de cada sistema agrícola é importante o conhecimento de quais os principais sistemas de produção existentes, mensurá-los e compará-los dentro de um mesmo ano agrícola, de modo a minimizar ao máximo a variação decorrente das escolhas das cultivares, zonas de manejo e principalmente influências climáticas (FREITAS, 2006).

Segundo Pimentel (1980), uma das formas mais adequadas para avaliar o nível de produção/consumo da agricultura de uma região estável é a análise de seus fluxos de energia associada as diversas atividades realizadas nos sistemas.

Para a avaliação dos cenários e melhor compreensão dos dados nessa comparação, utilizou-se o índice adaptado de Mello (1986), os resultados foram apresentados e discutidos a partir da estrutura de dispêndio energético, energia cultural e índice de eficiência energética do sistema soja, o indicador Eficiência Cultural, é um dos índices mais utilizados na literatura em análise energética de culturas agrícolas (BUENO, 2002).

O índice energético mais encontrado em pesquisas na área agrícola é o que trata da razão entre a saída produzida pelo sistema, na forma de energia, e os insumos culturais utilizados, também na forma de energia. Compreende-se por eficiência cultural a razão entre a energia útil que deixa o sistema agrícola e a energia total que é aplicada nesse processo (Figura 6).

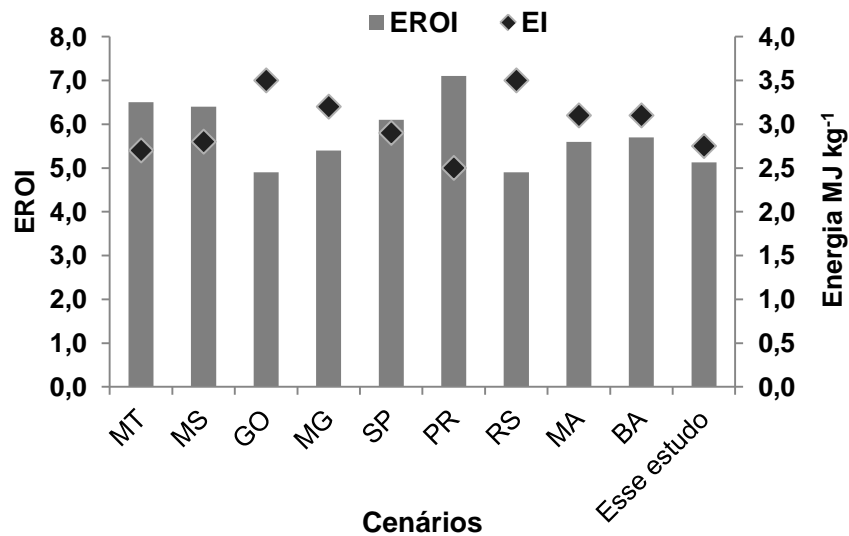


Figura 6 - Energia incorporada e EROI, no sistema de produção de soja
Adaptado de Romanelli et al. (2012)

Do ponto de vista energético, o conjunto de operações atingiu uma eficiência cultural de 6,13 unidades energéticas, no cenário estudado, ou seja, para cada unidade de energia aplicada no sistema, obteve-se mais de 5 unidades energéticas de retorno. O cenário com melhor desempenho foi na região Sul, o Paraná com 8,05 unidades energéticas. A região Nordeste a média da eficiência cultural foi de 6,65, na região Centro Oeste de 6,94, na região Sul de 6,95 e na região Sudeste foi de 6,75. A explicação está na diferença que representou as entradas de energia fóssil em cada cenário e na melhor eficiência cultural alcançado pelos produtores do cenário do Paraná.

A relação entre a energia contida nos alimentos e a energia contida nos insumos gastos para a sua produção é uma das alternativas para avaliar a sustentabilidade da agricultura (SCHROLLI, 1994). Esse valor é geralmente retirado de estudos específicos referentes ao ciclo de vida do produto. Seu objetivo principal é traduzir em unidades ou equivalentes energéticos os fatores de produção e os consumos utilizados, possibilitando a construção de indicadores comparáveis entre si, que permitam a intervenção no sistema produtivo visando melhorar sua eficiência (BUENO et.al., 2000).

Podemos concluir que no cenário do PR encontramos a soja com o menor índice de energia incorporada (2,5 MJ kg⁻¹), enquanto os cenários de GO e do RS obtiveram o pior índice (3,5 MJ kg⁻¹). Na hipótese do surgimento de uma crise no fornecimento, ou uma elevação dos custos dos fertilizantes, o cenário do PR

apresentaria condições para a produção da soja sem a aplicação de fertilizantes, por apresentar solos com elevados teores dos nutrientes, acumulados ao longo dos anos de plantio direto.

Sendo assim, os índices atingidos representam sistemas eficientes e sustentáveis energeticamente, pois os indicadores obtidos de eficiência cultural e energia incorporada foram superiores a um (RISOUD, 1999).

Os custos energéticos de produção entre os cenários analisados apresentaram uma diferença de 31,3 % maior no cenário do TO e 28,5% em GO, onde se gastaram 9.531,3 e 9.327 MJ para o cultivo de um hectare de soja respectivamente, enquanto nos cenários do MS e RS demanda foi de 7.260 MJ ha⁻¹, na região Sudeste em média 8.161 MJ ha⁻¹ e na região Nordeste 7.809 MJ ha⁻¹.

Por outro lado, houve diferenças entre as regiões para a variável Depreciação de Máquinas. Na região Sudeste, a sensibilidade a essas variáveis mostrou-se menos elevada, refletindo o maior nível tecnológico dos produtores dessa região em relação a conservação do solo, pois foram menos intensivos na utilização de máquina/implementos com essa finalidade, além do sistema de semeadura adotado. Nesse estudo, embora o sistema de preparo do solo foi o reduzido, obteve-se o menor índice de Depreciação de Máquinas (229 MJ ha⁻¹) entre os cenários analisados, seguido pelo cenário MA com 277 MJ ha⁻¹(Figura 7).

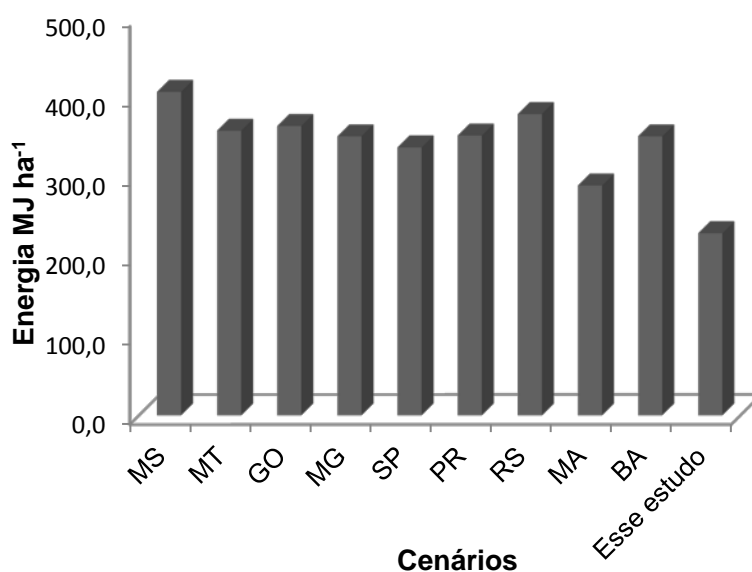


Figura 7 - Energia demandada pelo maquinário no sistema de produção de soja
Adaptado de Romanelli et al. (2012).

Segundo Romanelli (2007), de uma maneira geral dos fatores de produção a energia de origem fóssil, seja direta (óleo diesel) ou indireta (fertilizantes, produtos fitossanitários), representam quase a totalidade da demanda energética, sendo os fatores que devem ser primeiramente considerados para melhora da eficiência ambiental no tocante a demanda de energia.

Quanto aos tipos de energias despendidas no sistema, a energia indireta demandou 61,03% e apresentou uma diferença de 56,6% em relação a demanda de energia direta 38,97%, no cenário estudado. Na região Centro Oeste, a variação foi de 60,22 % (78,49% indireta e 18,29% direta), na região Sudeste a diferença foi de 55,99% (76,46% indireta e 20,47% direta), na região Sul 47,79%, com a utilização de energia indireta de 72,16% e direta 24,37%) e no Nordeste com 63,26% de diferença e demanda de energia (indireta 80,17% e direta 16,91%), evidenciando assim, um desequilíbrio entre as fontes de energias em todos os cenários analisados (Figura 8). A grande participação da energia indireta nos cenários foi proveniente a utilização da energia de fertilizantes, sementes e combustível.

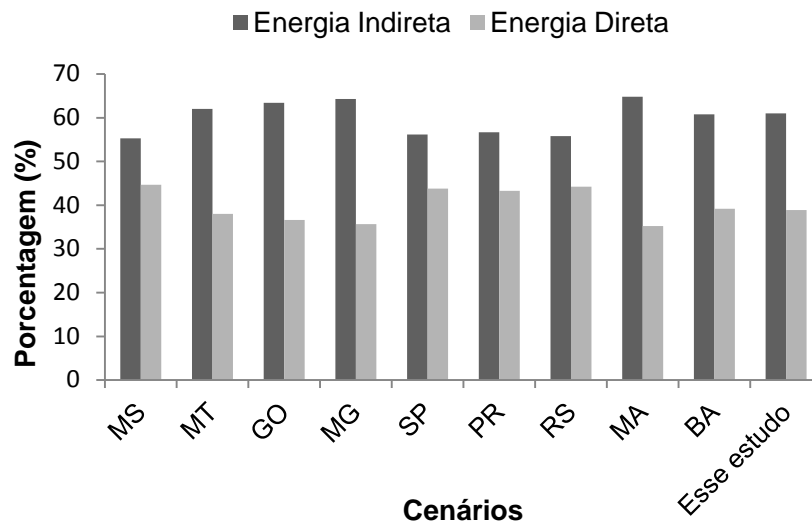


Figura 8 – Demanda de energias nos cenários analisados
Adaptado de Romanelli et al. (2012).

Os fertilizantes químicos tiveram também participações relevantes nos cenários de produção de soja, chegando a 31,76% no cenário estudado e a quase 40,00% na média nos cenários do Nordeste e Centro Oeste. Por suas características químicas, os solos dessas regiões demandam dosagens elevadas de corretivos e

fertilizantes que aumentam os custos energéticos de produção. Somente nos cenários da região Sul situou-se em média de 30% da demanda energética.

Porém, valores menores que o de Ulbanere (1988), para quem os nutrientes aplicados na fertilização representaram 49% da demanda energética. A partir da demanda de fertilizantes nos cenários analisados foi possível concluir que após vários anos de cultivo de soja nos cenários da região Sul, os solos obtiveram a sua base química construída desses macronutrientes, formando uma espécie de “poupança” dos mesmos nos solos, exigindo uma menor carga desses insumos.

Já nos cenários de agricultura mais recente, por suas características químicas e físicas, os solos das regiões demandam dosagens elevadas de fertilizantes e corretivos que aumentam os custos energéticos de produção, especialmente em solos de cerrado.

Os cenários da região Nordeste, Bahia e Maranhão apresentaram elevada acidez e os menores teores dos nutrientes no solo. O cenário GO apresentou elevada acidez, baixo teor de potássio e médio de fósforo. O Mato Grosso apresenta teor baixo de potássio e de fósforo e elevada acidez, ao contrário do cenário MS, com baixa acidez e médios teores de potássio e fósforo.

Esses mesmos insumos químicos e maquinários são os grandes vetores do aumento de produtividade, principalmente através da fertilização do solo, do uso de agroquímicos e da minimização do trabalho realizado. Porém, todos esses fatores implicam no incremento do dispêndio de energia no sistema.

Assim, os fertilizantes têm alto poder energético e têm grande importância nas matrizes energéticas nos sistemas de produção analisados, a contribuição da demanda energética dos fertilizantes químicos foi determinante para a elevada produtividade e consumo energético das dez matrizes energéticas, confirmando a tendência observada em outros trabalhos de pesquisa publicados (Figura 9).

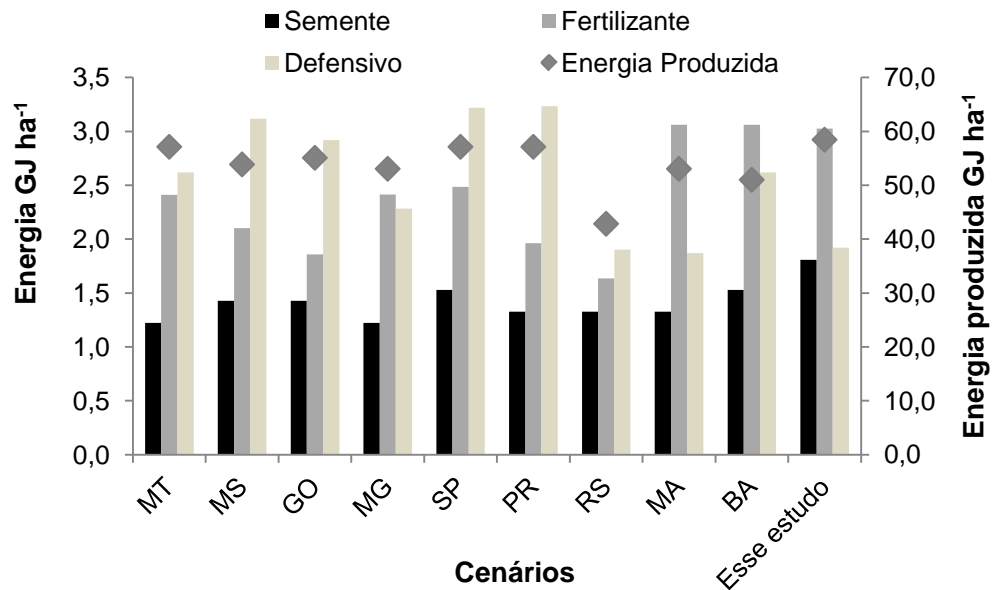


Figura 9 – Fontes de demanda e produção de energia em sistemas de produção de soja
Adaptado de Romanelli et al. (2012).

Analisando os valores da Figura 9, o sistema de produção de soja do cenário estudado a partir das operações agrícolas, apresentou uma produção de energia de $58,45 \text{ GJ ha}^{-1}$. Nas demais regiões, a produção média de energia foi de $53,35 \text{ GJ ha}^{-1}$ nos demais cenários, na região Sul foi de $49,98 \text{ GJ ha}^{-1}$, na Sudeste a média de $55,05 \text{ GJ ha}^{-1}$, na região Centro Oeste $57,01 \text{ GJ ha}^{-1}$ e na região Nordeste $52,01 \text{ GJ ha}^{-1}$. Tais resultados demonstraram que a região estudada produziu 9,55% de energia em média a mais que os demais cenários, quando se observa valores absolutos.

Aportes maiores de energia podem possibilitar aumento da produtividade, porém, não há uma relação direta entre esses dois fatores. Quando o aporte de energia é muito alto, o retorno deste investimento, frequentemente, é mínimo (GAZZONI et al., 2006). Essa afirmação pode ser comprovada analisando os cenários GO e MA, os aportes de fertilizantes foram $1,86$ e $3,06 \text{ GJ ha}^{-1}$, porém, as energias produzidas foram de $55,08$ e $53,04 \text{ GJ ha}^{-1}$, nos cenários PR e SP as energias produzidas foram iguais ($57,12 \text{ GJ ha}^{-1}$), porém a energia contida em fertilizantes foi de $1,92$ e $2,48 \text{ GJ ha}^{-1}$, em Biomassas semelhantes TO e BA, tiveram $58,44$ e $51,00 \text{ GJ ha}^{-1}$ de energia produzida e a mesma fertilização ($3,02 \text{ GJ ha}^{-1}$).

Esses valores comprovam a elevada produtividade das regiões de cerrado, superando a dos estados do sul e a expectativa de produtividade de 2.931 kg ha^{-1}

(IBGE, 2010). Em relação aos cenários, evidenciam que a produção de soja tende a se concentrar principalmente, nas regiões Centro-Oeste e Norte, que em 2006 responderam por 46,08% da área nacional cultivada com a oleaginosa. Adicionalmente, a área cultivada com soja representa apenas 2,68% da área agropecuária do Brasil (EMBRAPA, 2010).

Há pouca contribuição da energia de fonte biológica nos dez cenários, demonstrando serem estes sistemas agrícolas tecnificados, com pouca representatividade energética do item mão de obra, muito embora, o material de propagação híbrido (fonte biológica) apresente um alto dispêndio energético nas matrizes energéticas (Figura 10). Hipótese comprovada por Schlesinger et al., (2006), nessas grandes fazendas, geralmente em sistema de monocultura com uso intensivo de tecnologia e recursos externos não renováveis e abaixo média de empregos.

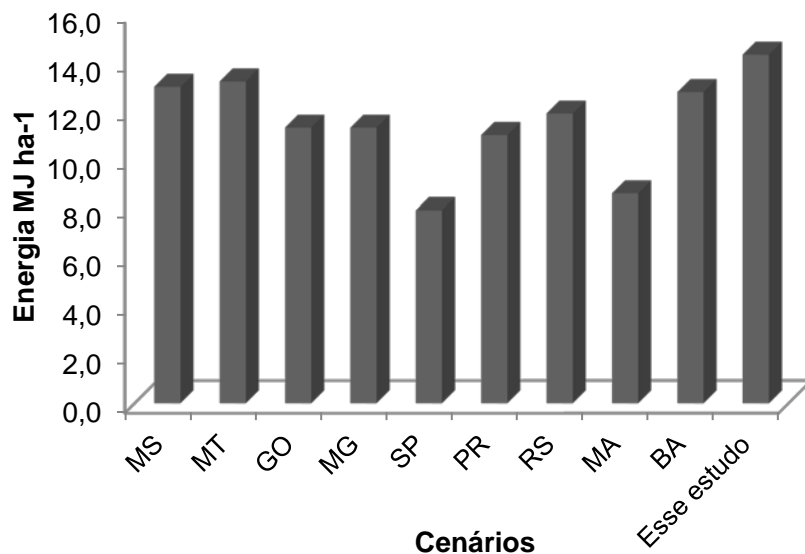


Figura 10 - Demanda de energia da mão de obra no sistema de produção de soja
Adaptado de Romanelli et al. (2012).

Com o desenvolvimento tecnológico no setor agrícola, esses poupadores demandam menos mão-de-obra nos sistemas de produção, ocasionando a redução do custo com as culturas e a diminuição do uso de mão de obra envolvida diretamente com a produção (EMBRAPA, 2007).

Atenta-se que, Pimentel (1973) citado em Carmo e Comitre (1991) afirmam que quanto maior o quociente entre a relação capital/trabalho humano, maior será o impacto ao meio ambiente e menor a sustentabilidade do processo, gerando desequilíbrios na natureza, impactos ao meio ambiente e a incorporação de altos valores de insumos, não tem surtido retorno na mesma proporção.

Diante da similaridade de dados nos cenários analisados, excetuando-se esse estudo, por conformidade de bioma, latitude, clima, cultura e sistemas de manejo, que seus dados são próximos dos cenários de MT, MA e BA. Porém, o único trato cultural que destoa entre cenários é a irrigação. Acreditamos ser esse o fator da elevada produtividade nesse cenário. O manejo da irrigação na agricultura deve propiciar ao produtor vantagens quanto ao uso da água, aumentando a produtividade das culturas, com redução dos custos de produção, potencializando seu uso sustentável (VIVAN, 2010).

4 CONCLUSÕES

Foi comprovada a importância da energia fóssil, seja direto ou indireto, configurando grande dependência e vulnerabilidade dos sistemas de produção. Os resultados demonstraram a dependência do sistema de plantio de fontes de energia industrial, provindas de insumos (31,76%) e defensivos (20,16%), e de energia fóssil do óleo diesel (19,27%).

Os valores energéticos da cultura analisada, referentes aos tipos de energia direta e indireta, apresentaram grandezas distintas, sendo que a energia indireta (61,03%) demandou quase 64% mais energia que a energia direta (38,97%), significando que as fontes energéticas utilizadas encontram-se pouco equilibradas.

A energia consumida em nosso estudo com plantio convencional e preparo reduzido com sucessão de culturas e nos cenários nacionais com sistema de plantio direto, praticamente foram às mesmas, 9,53 GJ ha⁻¹ para o preparo reduzido e 8,78 GJ ha⁻¹ no sistema de plantio direto, o que, por sua vez, demonstra que ambos os sistemas são energeticamente semelhantes.

Há pouca contribuição da energia de fonte biológica em ambos os sistemas, provando serem estes sistemas bem tecnificados, com pouca representatividade energética de mão de obra. Assim, para futuros estudos esse componente pode ser desconsiderado.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E COMBUSTÍVEL. **Anuário estatístico 2010**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?pg=31286>>. Acesso em: 25 ago. 2011.

ALMEIDA, L.C.F. **Avaliação energética econômica da cultura do milho em assentamento rural, Iperó-SP**. 2007. 133p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2007.

ALMEIDA, L.C.F.; BUENO, O.C.; I ESPERANCINI, M.S.T. Soberania energética na agricultura familiar: o caso do assentamento área III – Fazenda Pirituba II – Itaberá (SP). **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v.25, n.2, p. 105 – 120, 2010.

ASSENHEIMER, A.; CAMPOS, A.T.; GONÇALVES JUNIOR, A.C. Análise energética de sistemas de produção de soja convencional e orgânica. **Ambiência**, Guarapuava, v. 5, n. 3, p. 443-455, 2009.

BEBER, J.A.C. **Eficiência energética e processos de produção em pequenas propriedades rurais, Agudo, RS**. 1989. 295p. Dissertação (Mestrado em Extensão Rural) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1989.

BELDA, F.R.; SILVA, R.S. **Biocombustível e inteligência para o agronegócio**. Disponível em: <<http://www.ripa.com.br/index.php?id=1653>>. Acesso em: 20 nov. 2011.

BUENO, O.C. **Análise energética e eficiência cultural do milho em assentamento rural, Itaperá/SP**. 2002. 146p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2002.

BOERMA, H.R; ASHEEY, D.A. Irrigation, row spacing and genotype effects on late and ultra-late planted soybeans. **Agronomy Journal**, Dordrecht, v.74, n.6, p. 995 – 999, nov/dez. 1982.

CAMPBELL, C. The end of the first half of the age oil. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON OIL AND GAS DEPLETION. 4., 2005, Lisboa. Disponível em: <http://www.cge.uevora.pt/aspo2005/abstracts.php>. Acesso em: 15 maio 2011.

CAMPOS, A.T. **Balanco energético relativo à produção de feno de “coast-cross” e alfafa em sistema intensivo de produção de leite**. 2001. 236p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2001.

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

CAMPOS, A.T.; FERREIRA, W.A.; YAMAGUCHI, L.C.T. Balanço econômico e energético na produção de silagem de milho em sistema intensivo de produção de leite. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 9, n. 1, p. 10-20, 1998.

_____. Balanço energético na produção de silagem de milho em cultivos de verão e inverno com irrigação. *Avances en ingeniería agrícola*. Buenos Aires: Editorial Facultad de Agronomía, 2000. p. 483-488.

CAMPOS, A.T.; KLOSOWSKI, E.S.; SOUZA, C.V.; ZANINI, A.; PRESTES, T.M.V. Análise energética da produção de soja em sistema plantio direto. **Global Science and Technology**, Maringá, v. 2, n. 2, p. 38-44, maio/ago. 2009.

CAMPOS, A.T.; SAGLIETTI, J.R.C.; BUENO, O.C.; CAMPOS, A.T.; KLOSOWSKI, E.S.; GASPARINO, E. Balanços energéticos agropecuários: uma importante ferramenta como indicativo de sustentabilidade de agroecossistemas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1977-1985, nov./dez. 2004.

CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 183-188, 1995.

CARMO, M.S.; COMITRE, V. Evolução do balanço energético nas culturas de soja e milho no Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 29. 1991, Campinas. **Anais...** Brasília: Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural, 1991. p.131-149.

CARMO, M.S.; COMITRE, V.; DULLEY, R.D. Balanço energético de sistemas de produção na agricultura alternativa. **Agricultura em São Paulo**, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 87-97, 1988.

CASTANHO FILHO, E.P.; CHABARIBERY, D. Perfil econômico da agricultura paulista. **Agricultura em São Paulo**, São Paulo, v. 30, n. 2, p. 63-115, 1983.

CASTIGLIONI, V.B.R.; OLIVEIRA, M.F. Melhoramento do girassol. In: BORÉM, A. **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa: Ed. UFV, 2005. p. 134-155.

CAVALETT, O. **Análise do ciclo de vida da soja**. 2008. 206 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

CLEVELAND, C.J. The direct and indirect use of fossil fuels and electricity in USA agriculture, 1910-1990. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 55, n. 2, p. 111-121, 1995.

COMITRE, V. **Avaliação energética e aspectos econômicos da filière soja na região de Ribeirão Preto-SP**. 1993. 152p. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola/Planejamento Agropecuário) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.

- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira:** soja, segundo levantamento agosto de 2010. Brasília, 2010. Disponível em:
<<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/ecf76fd96889c63b1368be8085214377.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2010.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Séries históricas de produtividade de grãos.** Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 27 set 2011.
- COSTA, R.E. **Inventário do ciclo de vida do biodiesel obtido a partir do óleo de palma para as condições do Brasil e da Colômbia.** 2007. 137p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.
- DELEAGE, J.P. Eco-energetics analysis of an agricultural system: the French case in 1970. **Agro-ecosystems**, Amsterdam, v. 5, p. 345, 1979.
- ELMI, A.A.; MADRAMOOTOO, C.; EGEH, M.; DODDS, G.; HAMEL, C. Water table management as a natural bioremediation technique of nitrate pollution. **Water Quality Research Journal of Canada**, Toronto, v. 37, n. 3, p. 563-576, 2002.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.
- EMBRAPA. Instalação da Lavoura. In: Tecnologias de produção de soja: Paraná, 2003. Londrina: Embrapa Soja, 2002. p.11 -120. (Sistemas de Produção, 2).
- EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja Região Central do Brasil 2004.** Disponível em:<<http://www.cnpso.embrapa.br/producaosoja/SojanoBrasil.htm>>. Acesso em: 23 set. 2011.
- EMBRAPA SOJA. **Tecnologias de produção de soja:** região central do Brasil. Londrina, 2007 225 p.
- EMBRAPA SOJA. **Ata da XXXI Reunião de Pesquisa de Soja da Região Central do Brasil.** Londrina, 2010. 323 p.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional 2010:** ano base 2009. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em
<https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2010.pdf>. Acesso em: 21 out. 2010.
- FAO. **El estado mundial de la agricultura y la alimentación.** Roma, 1976. 158 p.
- _____. Energia para la agricultura mundial. In: _____. **Los flujos energéticos en la agricultura.** Roma: FAO, 1980. pt. 2, p. 43-94. (Colección FAO: Agricultura, 7).
- _____. **FAOSTAT.** 2004. p. 35-54. Disponível em:
<<https://www.fao.org.br/publicacoes.asp>>. Acesso em: 20 ago. 2011.

_____. **FAOSTAT**. 2005. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/faostat/collections>>. Acesso em: 01 jun. 2012.

_____. **FAOSTAT**. 2007. Disponível em: <<http://www.fao.org/>>. Acesso em: 15 out. 2011.

FARIAS, J.R.B.; NEPOMUCENO, A.L.; NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 9 p. (Circular técnica, 48).

FERGUSON, C.E. **Teoria microeconômica**. 11. ed. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 1988. 609 p.

FERNANDES, H.C.; SILVEIRA, J.C.M.; RINALDI, P.C.N. Avaliação do custo energético de diferentes operações agrícolas mecanizadas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1582-1587, set./out. 2008.

FERREIRA, F.F. **Análise da matriz energética e econômica das culturas de arroz, soja e trigo em sistemas tecnificados no Rio Grande do Sul**. 2010. 137p. Tese (Mestrado em Qualidade e Produtividade) - Faculdade de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

FERREIRA, W.A.; ULBANERE, R.C. Análise do balance econômico para a produção de milho no estado de São Paulo. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 4, n. 2, p. 8-18, 1981.

FISHER, M.J.; FAUSEY, N.R.; SUBLER, S.E.; BROWN, L.C.; BIERMAN, P.M. Water table management, nitrogen dynamics and yields of corn and soybean. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, p. 1786-1795, 1999.

FLUCK, R.C. Energy productivity: a measure of energy utilization in agricultural systems. **Agricultural Systems**, Essex, v. 4, n. 1, p. 29-37, 1979.

FLUCK, R.E.; BAIRD, C.D. **Agriculture energetic**. Westport. AVI Publishers, 1980. 192 p.

FLOSS, L.G. **Análise Agronômica, econômica e energética de sistemas de produção agrícola para a região Norte do Rio Grande do Sul**. 2008. 101 p. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2008.

FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO. **AGRIANUAL 2011**: anuário da agricultura brasileira. São Paulo, 2011. 545 p.

GAZZONI, D.L.; FELIPE, P.H.N.; CORONATO, R.M.S. **Balanco energético das culturas de soja e girassol para produção de biodiesel**. 2006. Disponível em: <<http://www.biodiesel.gov.br/docs/congressso2006/agricultura/BalancoEnergetico.pdf>>. Acesso em: 13 jun. 2009.

GAYNOR, J.D.; TAN, C.S.; DRURY, C.F.; NG, H.Y.F.; WELACKY, T.W.; VAN WESENBEECK, I.J. Tillage, intercrop, and controlled drainage-subirrigation influence on atrazine, metribuzin, and metolachlor loss. **Journal of Environmental Quality**, Quebec, v. 30, p. 561-572, 2001.

GLIESSMANN, S.R. **Agroecologia**: processos ecológicos em agricultura sustentável. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2000. 653 p.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia**: meio ambiente e desenvolvimento. 5. ed. São Paulo: EDUSP, 2008. 124 p.

GUERRERO, J.S.J. Dimensão teórica da energia, economia e sociedade: integração no desenvolvimento da humanidade. **Revista de Economia Rural**, São Paulo, v. 25, n. 3, p. 293-301, 1987.

GUIMARÃES, F.S.; REZENDE, P.M.; CASTRO, E.M.; CARVALHO, E.A.; ANDRADE, M.J.B.; CARVALHO, E.R. Cultivares de soja [*Glycine max* (L.) Merrill] para cultivo de verão na região de Lavras – MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 4, p. 1099-1106, 2008.

HALL, C.A.S. The myth of sustainability development personal reflection on energy, its relation to neoclassical economics and Stanley Jevons. **Journal of Energy Resource Technology**, New York, v. 126, n. 2, p. 85-89, June 2004.

IBAÑEZ, M.; ROJAS, E. **Costos de operación y producción por concepto de maquinaria agrícola**. Concepción: Universidad Concepción, 1994. 58 p.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/agric/default.asp?z=t&o=11&i=P>>. Acesso em: 27 set 2010.

IGREJA, A.C.M.; PACKER, M.F.; ROCHA, M.B. **A evolução da soja no Estado de Goiás e seu impacto na composição agrícola**. São Paulo: IEA, 1988. 20 p.

IGUE, K. Energia e agricultura. In: INSTITUTO AGRNÔMICO DO PARANÁ. **Manual agropecuário para o Paraná**. Londrina, 1980. v. 3, cap. 9, p. 217-228.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/default.shtm>>. Acesso em: 23 set. 2011.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. Disponível em: <http://ciagri.iea.sp.gov.br/bancoiea/Precos_Medios.aspx?cod_sis=5>. Acesso em: 28 abr. 2011.

JUNQUEIRA, A.A.B.; CRISCUOLO, P.D.; PINO, F.A. O uso da energia na agricultura paulista. **Agricultura em São Paulo**, São Paulo, v. 29, t. I/II, p. 55-100, 1982.

KNOWLES, P.F.; BUKANTIS, R. Energy inputs and outputs for crop systems, field crops. In: PIMENTEL, D. (Ed.). **Handbook of energy utilization in agriculture**. Boca Raton: CRC Press, 1980. p. 131-132.

LAZZAROTTO, J.J.; HIRAKURI, M.H. **Evolução e Perspectivas de Desempenho Econômico Associadas com a Produção de Soja nos Contextos Mundial e Brasileiro**. Embrapa Soja, Londrina, PR, p.45. 2010.

LIMA, P. C. R. **Medida provisória no 214**: a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira. Brasília, Consultoria Legislativa da Câmara dos Deputados. 2004. 40 p.

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. 95 p.

MALASSIS, L. **Economie agro-alimentaire**. Paris: Cujas, 1973. t. 1: Economie de la consommation et de la production agro-alimentaire, 154 p.

MEJIA, M.N.; MADRAMOOTOO, C.A.; BROUGHTON, R.S. Influence of water table management on corn and soybean yields. **Agricultural Water Management**, London, v. 46, p. 73-89, 2000.

MELLO, R. **Análise energética de agroecossistemas**: o caso de Santa Catarina. 1986. 138 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1986.

MELO, T.M.; WOTTRICH, I.; LOUZADA, J.A.; HELFER, F. Avaliação do atendimento da demanda hídrica da cultura do milho através da subirrigação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 4, n. 4, p. 226–233, 2010.

MESQUITA, C.M.; ROESSING, A.C.; GAZZIERO, D.L.P. Consumo de energia e avaliação técnica-econômica de sistemas de produção de soja. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PESQUISA DE SOJA, 2., 1981, Brasília. **Anais...** Londrina: Centro Nacional de Pesquisa de Soja/EMBRAPA, 1982. v. 1, p. 525-538.

MME. **Balanco energético nacional**. Brasília, 2009. 274p.

MME. **Balanco energético nacional**. Brasília, 2010. 276 p.

MME. **Balanco energético nacional**. Brasília, 2011. 49 p.

MOURAD, A.L. **Avaliação da cadeia produtiva de biodiesel obtido a partir da soja**. 2008. 111 p. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

MUNDSTOCK, C.M.; THOMAS, A.L. **Soja: fatores que afetam o crescimento e rendimento de grãos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005. 31 p.

MUSSA, M.A. Global growth rebound: how strong for how long? **Institute for International Economics**, Sept. 2003. Disponível em: <www.iie.com/publications/papers/mussa0903.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2012.

ODUM, E.P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1996. 434 p.

ODUM, E.P.; BARRET, G.W. **Fundamentos de ecologia**. São Paulo: Cengage Learning, 2008. 612 p.

OLIVEIRA, S.V. de; DALCIN, D.; TROIAN, A. O desenvolvimento produtivo do biodiesel de soja no Rio Grande do Sul: uma análise estatística. **Revista Congrega Urcamp**, São Paulo, v. 5, n. 5, p. 1 - 4, Nov. 2009.

PANESAR, B.S.; FLUCK, R.C. Energy productivity of a production system: analysis and measurement. *Agricultural Systems*. Florida, v. 43, n. 4, p. 415-437, 1993.

PATUSCO, J.A.M. **Eletricidade no balanço energético nacional**. 1998. Disponível em: <<http://ecen.com/eee11/eletrben.htm>>. Acesso em: 26 dez. 2011.

PELLIZZI, G. Use of energy and labour in Italian agriculture. **Journal of Agriculture and Engineering Research**, Silsoe, v. 52, p. 11-119, 1992.

PELUZIO, J.M.; AFFÉRI, F.S.; MONTEIRO, F.J.F.; MELO, A.V. de; PIMENTA, R.S. Adaptabilidade e estabilidade de cultivares de soja em várzea irrigada no Tocantins. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 3, p. 427-434, jul./set. 2010.

PETRY, M.T. **Interação solo-planta e disponibilidade de água no solo às plantas de sorgo e soja**. 2000. 127 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.

PIMENTEL, D. et al. Food production and the energy crises. **Science**, Washington, v. 182, p. 443-9, 1973.

PIMENTEL, D. (Ed.). **Handbook of energy utilization in agriculture**. Boca Raton: CRC Press, 1980. 475 p.

PIMENTEL, D.; HALL, C.W. **Food and energy resources**. Orlando: Academic Press, 1984. 270 p.

PIMENTEL, D.; PATZEK, T.W. Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; biodiesel production using soybean and sunflower. **Natural Resources Research**, New York, v. 14, n. 1, p. 65-76, 2005.

PIMENTEL, D.; HURD, L.E.; BELLOTTI, A.C.; FORSTER, M.J.; OKA, Y.N.; SHOLES, O.D.; WHITMAN, R.J. Food production and the energy crises. **Science**, New York, v. 182, p. 443-449, 1973.

RAMBO, L.; COSTA, J.A.; PIRES, J.L.F.; PARCIANELLO, G. & FERREIRA, F.G. Estimativa do potencial rendimento por estrato do dossel da soja, em diferentes arranjos de plantas. **Ciência Rural**, v. 34, n.1, p. 33 – 40. 2004.

RISOUD, B. Développement durable et analyse énergétique de exploitations agricoles. *Économie Rurale*, n. 252, p. 16-27, 1999.

RODRIGUES, B.N.; ALMEIDA, F.S. **Guia de herbicidas**. 5. ed. Londrina: Grafmarke, 2005. 591 p.

ROMANELLI, T.L. **Modelagem do balanço energético na alimentação suplementar para bovinos**. 2002. 110p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

_____. **Sustentabilidade energética de um sistema de produção da cultura de eucalipto**. 2007. 107 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

ROMANELLI, T.L.; MILAN, M. Energy balance methodology and modeling of supplementary forage production for cattle in Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 1, p. 1-7, 2005.

_____. Material flow determination through agricultural machinery management. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, n. 4, p. 375-495, 2010.

ROMANELLI, T.L.; NARDI, H.De S.; SAAD, F.A. **Material embodiment and energy flows as efficiency indicators of soybean (*Glycine max*) production in Brazil**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 32, n. 2, p. 261-270, março/abril. 2012.

SANTOS, H.P.; IGNACZAK, J.C.; LHAMBY, J.C.B.; BAIER, A.C. Conversão e balanço energético de sistemas de rotação de culturas para triticales, sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 1, p. 43-48, 2000.

SANTOS, H.P. dos; TOMM, G.O.; SPERA, S.T.; ÁVILA, A.I. Efeito de práticas culturais na conversão e no balanço energético. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 2, 2007. Disponível em < <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/908/90866214.pdf> > Acesso em: 24 jul. 2010.

SACHS, I. **Redescoberta e invenção do Brasil rural**. Disponível em: <http://www.cndrs.org.br/documentos/texto_sachs_capitulo_iii.doc>. Acesso em: 22 abr 2012.

SCHLESINGER, S.; LASCHEFSKI, K.; ASSIS, W.F.T.; RODRIGUES, D.; ORTIZ, L. **Agroenergia + agronegócio**: impactos cumulativos e tendências territoriais da

expansão das monoculturas para a produção de bioenergia. 2006. Disponível em: <http://boelllatinoamerica.org/download_pt/Agronegocio_e_biocombustiveis_PORT.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2011.

SCHROLL, H. Energy-flow and ecological sustainability in Danish agriculture. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 5, p. 301-310, 1994.

SEGATELLI, C.R. **Produtividade da soja em semeadura direta com antecipação da adubação fosfatada e potássica na cultura**. 2004. 57p. Tese (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

SERRA, G.E.; HEEZEN, A.M.; MOREIRA, J.R.; GOLDENBERG, J. **Avaliação da energia investida na fase agrícola de algumas culturas**. Brasília: Secretaria de Tecnologia Industrial, 1979. 86 p.

SILVA, M.S. **Avaliação do efeito da irrigação e da adubação de manutenção na soja em solo de fertilidade corrigida**. 1984. 84p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande, 1984.

SIQUEIRA, R.; GAMERO, C.A.; BOLLER, W. Balanço de energia na implantação e manejo de plantas de cobertura do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 19, n. 1, p. 80-89, 1999.

SWEENEY, D.W.; GRANADE, G.V. Effect of a single irrigation at different reproductive growth stages on soybean planted in early and late june. **Irrigation Science**, v.21, n.2, p. 69-73, fev. 2002.

TECNOLOGIAS de produção de soja: região central do Brasil 2006. Londrina: Embrapa Soja; Embrapa Cerrados; Embrapa Agropecuária Oeste, 2005. 220 p. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 9).

_____: região central do Brasil 2009 e 2010. Londrina: Embrapa Soja; Embrapa Cerrados; Embrapa Agropecuária Oeste, 2008. 262 p. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 13).

ULBANERE, R.C. **Análise dos balanços energéticos e econômicos relativa a produção de grão de milho no Estado de São Paulo**. 1988. 127p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Botucatu, 1988.

ULBANERE, R.C.; FERREIRA, W.A. Análise do balanço energético para a produção de milho no estado de São Paulo. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 4, n. 1, p. 35-42, 1989.

UNITED STATES Department of Agriculture. 2010. Disponível em: <<http://www.usda.gov>>. Acesso em: 12 jun. 2011.

_____. Disponível em: <<http://www.fas.usda.gov/psdonline/psdQuery.aspx>>. Acesso em: 27 set. 2010.

URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R.; BOODEY, R.M Produção de biocombustíveis: a questão do balanço energético. **Revista de Política Agrícola**, 2005. Disponível em < http://www.agronegocios-e.com.br/agr/down/artigos/Pol_Agr_1_2005_Art06.pdf >. Acesso em: 24 jul. 2011.

VENCATO, A.Z. Anuário brasileiro da soja 2010. **Gazeta Santa Cruz**, Santa Cruz do Sul, v. 5, n. 137, p. 144, 2010.

VIVAN, G.A. **Resposta da irrigação suplementar em diferentes cenários para a cultura da soja na microrregião de Passo Fundo, RS**. 2010. 78 p. Dissertação (Mestrado Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

WHITE, D.J. Energy in agricultural systems. **The Agricultural Engineer**, Bedford, v.30, n.3, p.52 -58, 1975.

WILSON, P.N; BRIGSTOCKE, T.D.A. Energy usage in British Agriculture; A Review of future prospects. **Agricultural Systems**, Barking, v.5, n.1, p. 51 – 70, 1980.

ZANINI, A.; CAMPOS, A.T.; PRESTES, T.V.M.; DALMOLIN, M.F.; CAMPOS, A.T. de; KLOSOWSKI, E.S. Análise do consumo de energia na produção de silagem de milho em plantio direto. **Acta Scientiarum**. Animal Sciences, Maringá, v. 25, n. 2, p. 249-253, 2003.

ZUCCHETTO, J.; JANSSON, A.M. Total energy analysis, of Gotland's Agriculture: a northern temperature zone case study. **Agro-ecosystems**, Amsterdam, v. 5, p. 339-344, 1999.

APÊNDICES

Apêndice A – Índice de energia incorporada a alguns fertilizantes

Insumo	Unidade	Índice de energia Incorporada MJ unidade ⁻¹	Fonte
N	kg	63,79	Macedônio e Picchioni (1985)
Ureia	kg	78,04	Ferraro Junior (1999)
P ₂ O ₅	kg	13,97	Macedônio e Picchioni (1985)
Super fosfato simples	kg	9,79	Ferraro Junior (1999)
Super fosfato triplo	kg	22,11	Ferraro Junior (1999)
K ₂ O	kg	9,79	Macedônio e Picchioni (1985)
KCl	kg	7,19	Macedônio e Picchioni (1985)
Sulfato de potássio	kg	3,35	Ferraro Junior (1999)
Calcário	kg	1,67	Ferraro Junior (1999)

Apêndice B – Índice de energia dos fertilizantes formulados

Insumo	Unidade	Índice de energia Incorporada MJ unidade ⁻¹
00-20-10	kg	3,18
00-30-15	kg	4,77
04-20-20	kg	6,81
04-30-10	kg	7,40
05-20-10	kg	6,88
06-30-10	kg	8,88

Obs: Determinados através dos índices de N, P₂O₅ e K₂O de Macedônio e Picchioni (1985)

Apêndice C – Índice de energia para defensivos agrícolas

Defensivo	Unidade	Índice de energia Incorporada MJ unidade ⁻¹	Fonte
Glifosate	L	454,20	Fluck & Baird (1982)
Fungicida	L	364,15	Pimentel (1980)
Inseticida	L	92,18	Pimentel (1980)
Outros Químicos	kg	184,70	Pimentel (1980)