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

**Demanda de energia no sistema de produção do pinhão-manso
(*Jatropha curcas* L.) irrigado**

Adriano Valentim Diotto

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Área de concentração: Irrigação e
Drenagem

Piracicaba
2013

Adriano Valentim Diotto
Engenheiro Agrônomo

Demanda de energia no sistema de produção do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) irrigado

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **MARCOS VINÍCIUS FOLEGATTI**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências. Área de concentração: Irrigação e
Drenagem

Piracicaba
2013

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

Diotto, Adriano Valentim

Demanda de energia no sistema de produção do pinhão-mansô (*Jatropha curcas* L.)
irrigado / Adriano Valentim Diotto. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr
6018 de 2011. - - Piracicaba, 2013.
99 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Balanço de energia 2. Biocombustíveis 3. Índice energético 4. Irrigação 5. Pinhão
mansô 6. Sustentabilidade I. Título

CDD 633.85
D595d

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

Aos meus pais:

Alcides Diotto (*in memoriam*),

Dirce Montini Diotto,

Pelo incentivo incondicional e apoio em todas as etapas de minha vida.

Dedico

Aos meus Irmãos:

Maria Lúcia Diotto Pedro,

José Alcides Diotto

Joice Vanessa Diotto,

Pelo companheirismo e amizade em todos os momentos,

Ofereço

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, acredito ser necessário agradecer a todos os educadores que passaram pela minha vida. Como poderia ser injusto esquecendo o nome de algum, gostaria de homenagear a todos, citando a minha primeira Professora e hoje grande amiga, Maria Neide Montini, e o último até aqui, o Professor Dr., Orientador e também grande amigo, Marcos Vinícius Folegatti. Em uma das aulas do programa de aperfeiçoamento do ensino, apresentou-se o significado da palavra educar como levar pela mão, por isso, a todas estas mãos que me conduziram e que continuam me guiando, o meu muito obrigado.

Ao amigo e Professor Dr. Thiago Libório Romanelli, tenho muito que agradecer pela coorientação neste trabalho, mesmo que informalmente, auxiliando em todas as etapas, desde seu início até a finalização.

À ESALQ/USP pelas oportunidades concedidas desde a minha graduação até o doutorado. Nesta escola nascida no monte, aprendi não só com as aulas, mais também com a convivência com os amigos e professores.

À Fundação de Apoio a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão da bolsa de doutorado, que viabilizou a elaboração deste trabalho (Processo 2010/11960-7).

Ao Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ/USP, que tem me acolhido desde a época de estagiário, fornecendo infraestrutura e apoio. E também aos técnicos e funcionários deste departamento, que hoje tenho com muito orgulho como meus amigos.

Às empresas, Biocapital Consultoria Empresarial e Participações S.A. e Irrigabras Irrigação do Brasil Ltda, pelo apoio, fornecendo informações que foram indispensáveis para a realização deste trabalho.

Às secretárias, Davilmar e Ângela, pelo apoio e ajuda nas horas burocráticas e à Beatriz, que com sua extrema competência é capaz de resolver os mais difíceis problemas sem deixar a simpatia e o sorriso de lado. E a bibliotecária Eliana Maria Garcia, pela revisão do trabalho.

Agradeço aos meus pais, Alcides (*in memoriam*) e Dirce, por me fornecer os princípios básicos da vida, sempre mostrando o caminho do amor, da perseverança e da bondade. Agradeço também aos meus irmãos, Maria Lúcia, José Alcides e Joice, e aos demais familiares, por sempre estarem presentes em minha vida e pela felicidade familiar de que sempre pude usufruir.

Gostaria de agradecer também a todos os amigos, em especial, aqueles que estiveram mais presentes, seja na sala dando apoio e incentivo ou nos carnavais comemorando a amizade. Assim, agradeço aos amigos: Acácio, Bruno, Cícero, Cornélio, Danilton, Edécio, Everaldo, Fábio, Janaína, Jefferson, João Paulo, Jussálvia, Lígia, Marcos, Rafael, Renato, Ronaldo, Roberto, Ricardo e Rodrigo.

As demais pessoas que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho.

“A vida vem lá de longe, é como se fosse um rio,
Pra rio pequeno canoa, pros grandes rios navios,
E bem lá no fim de tudo, começo de outro lugar,
Será como Deus quiser, como o destino mandar,
No rastro da lua cheia, se chega em qualquer lugar!

Ah! o tempo faz, tempo desfaz
E vai além sempre...”

Trecho de “No Rastro da Lua Cheia” - Almir Sater

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS.....	15
LISTA DE TABELAS	17
1 INTRODUÇÃO.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 A planta de pinhão-manso.....	21
2.2 Produtividade real e produtividade potencial	23
2.3 Necessidade de irrigação na cultura do pinhão-manso	25
2.4 Potencialidade da cultura para produção de biocombustíveis	28
2.5 Avaliação por meio da análise do fluxo de energia.....	29
2.6 Características agronômicas do sistema de produção	31
2.6.1 Produção de mudas.....	33
2.6.2 Preparo de solo e plantio	33
2.6.3 Controle de plantas daninhas	34
2.6.4 Poda	34
2.6.5 Adubação	35
2.6.6 Controle de pragas e doenças.....	36
2.6.7 Colheita	37
3 MATERIAL E MÉTODOS	39
3.1 Base de dados para o fluxo de material	39
3.2 Incorporação de energia.....	43
3.2.1 Energia incorporada por máquinas e implementos agrícolas	44
3.2.2 Energia incorporada pelos insumos aplicados	44
3.2.3 Energia incorporada pelo consumo direto de combustíveis	45
3.2.4 Energia incorporada pela mão de obra.....	46
3.2.5 Energia incorporada pelo acionamento da irrigação.....	46
3.2.6 Energia incorporada pelos materiais dos sistemas de irrigação	48
3.2.6.1 Bombeamento.....	49
3.2.6.2 Adutora	50
3.2.6.3 Filtragem.....	55
3.2.6.4 Equipamento de irrigação	55
3.2.7 Energia de saída.....	56

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1	Incorporação de energia do sistema de produção	59
4.2	Incorporação de energia dos sistemas de irrigação	66
4.2.1	Bombeamento	67
4.2.2	Adutora	68
4.2.3	Filtragem	72
4.2.4	Equipamentos de irrigação	73
4.2.5	Consumo de energia direta pelo sistema de irrigação	79
4.3	Balanco de energia	81
4.3.1	Energia de entrada	81
4.3.2	Energia de saída	83
5	CONCLUSÕES	85
	REFERÊNCIAS	87
	ANEXOS	95

RESUMO

Demanda de energia no sistema de produção do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) irrigado

Impulsionados pelo crescente aumento no consumo de energia e pela pressão às fontes de combustíveis fósseis causada por este aumento, vem crescendo também o interesse por culturas bioenergéticas, buscando substituir, pelo menos em parte, a matriz energética mundial por uma mais sustentável. Dentre as várias opções de oleaginosas disponíveis, tem se apresentado o pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) como uma planta promissora na produção de biocombustíveis, apesar da baixa disponibilidade de informação sobre esta planta como cultura comercial. Juntamente com esse aumento de interesse nas culturas destinadas a produção de energia, vem aumentando também, o interesse em métodos de análises multicritérios, que seja capaz de apresentar indicativos não só econômicos, mas também de sustentabilidade. Neste contexto, a análise dos fluxos de energia vem sendo muito utilizado para avaliar e comparar diferentes sistemas de produção, quanto ao seu balanço de energia, ou seja, a entrada e saída de energia de um sistema. Realizou-se, portanto, um estudo dos componentes de produção da cultura do pinhão-manso, em seis áreas de produção no estado de São Paulo, onde se determinou a demanda de energia do sistema de produção na condição de sequeiro, e o efeito da inclusão da irrigação via gotejamento e pivô central neste sistema. Na condição de sequeiro, o ponto de equilíbrio entre a incorporação e produção de energia, foi atingido com as produtividades de $1,5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, sem considerar o aproveitamento dos resíduos e $1,3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ se estes forem aproveitados na cogeração. O fator que mais influenciou a incorporação de energia foi a utilização intensiva de insumos como fertilizantes e agroquímicos para controle de pragas e doenças, representando cerca de 65% do total de energia incorporada no sistema de produção de sequeiro. Para a condição de irrigação avaliada, as produtividades mínimas para se iniciar a viabilidade energética foram de 4,27 e $3,60 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ respectivamente, para irrigação via pivô central e gotejamento, sem o aproveitamento dos resíduos na cogeração de energia e de 3,88 e $3,27 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ quando se considera os resíduos na avaliação. O consumo direto de energia na pressurização do sistema foi o fator de maior influência na incorporação total do sistema de produção irrigado, representando em média 55%.

Palavras-chave: Irrigação; Índice energético; Biocombustível; Sustentabilidade; Balanço de energia

ABSTRACT

Energy input in the production systems of physic nut (*Jatropha curcas* L) with irrigation

The increase in the energy consumption and the pressure on the fossil fuel sources have increased the interest in the bioenergy crops, in order to have more sustainable options in the world energy matrix. Among the oilseeds available, *Jatropha curcas* L. is taken as a promising oil provider to biofuel production. As the interest in bioenergy crops increases, the interest in advanced analysis methods also increases, being able to evaluate the production systems not only economically, but also regarding sustainability. In this context, the analysis of energy flows has been widely used to evaluate and to compare different production systems, determining its input and output energy flows. A study about the inputs required to produce *Jatropha* in six areas in the state of São Paulo was done. It was determined the energy demand of the production system in dryland condition, and also the effect of drip and center pivot irrigation. In dryland conditions, the feasibility breakeven point between input and output was achieved with yields of $1.5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, without waste recovery and of $1.3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ if wastes are utilized in cogeneration. The factor that most influenced the energy embodiment was the intensive use of inputs such as fertilizers and pesticides, which accounted about 65% of the total embodied energy in the dryland systems. With irrigation, minimum yields to achieve the energy feasibility were 4.27 and $3.60 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ respectively, for center pivot and drip, without using wastes in the energy cogeneration and 3.88 and $3.27 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ when considering wastes in the evaluation. The direct energy consumption in the pressurization system was the most important factor in the irrigated production system, representing 55% on average.

Keywords: Energy index; Biofuels; Sustainability; Energy balance

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Níveis de produtividades estimadas para a cultura do pinhão-mansó	25
Figura 2 – Estágios do desenvolvimento da cultura do pinhão-mansó	32
Figura 3 – Localização dos seis municípios do estado de São Paulo onde estão localizadas as propriedades do estudo.....	41
Figura 4 – Perfil esquemático da linha piezométrica de uma adutora hipotética, com desnível H ascendente (J =perda de carga unitária $m\ m^{-1}$ e H =desnível unitário $m\ m^{-1}$).....	53
Figura 5 – Diferentes fontes de entrada de energia no ano de implantação da cultura para as seis diferentes propriedades.....	61
Figura 6 – Distribuição percentual da entrada de energia no sistema, no ano de implantação	61
Figura 7 – Distribuição da energia de entrada ao longo do ciclo de produção para as cinco propriedades	62
Figura 8 – Distribuição da incorporação de energia proveniente do consumo direto de combustíveis no ano da implantação e ao longo dos anos de produção para as cinco propriedades.....	63
Figura 9 – Distribuição da incorporação de energia proveniente da depreciação de máquinas e implementos no ano da implantação e ao longo dos anos de produção para as cinco propriedades.....	64
Figura 10 – Distribuição da incorporação de energia proveniente da utilização de mão de obra no ano da implantação e ao longo dos anos de produção para as cinco propriedades	64
Figura 11 – Distribuição percentual da incorporação de energética média dos anos de produção para as áreas um a cinco.....	66
Figura 12 – Correlação entre a incorporação de energia oriunda do sistema de bombeamento e a potência do conjunto motobomba	68
Figura 13 – Superfície de resposta que correlaciona a massa de tubo de PVC por metro (w) em função do diâmetro nominal (D) e da classe de pressão (CP)	69
Figura 14 – Superfície de resposta que correlaciona a massa de tubo de aço galvanizado por metro (w) em função do diâmetro nominal (D) e da classe de pressão (CP)	69

Figura 15 – Correlação entre incorporação de energia por metro de adutora em função da vazão transportada.....	71
Figura 16 – Incorporação de energia do sistema de filtragem em função da vazão .	72
Figura 17 – Incorporação de energia da parcela de irrigação por gotejamento em função da área para a condição de 4 m de espaçamento entre linhas e 0,65 mm de espessura de parede de tubo gotejador.....	75
Figura 18 – Incorporação de energia do sistema de cotejamento para diferentes espaçamentos entre linhas e duas espessuras de parede do tubo gotejador.....	75
Figura 19 – Incorporação de energia da parcela de irrigação por pivô central em função da área	77
Figura 20 – Evapotranspiração potencial da cultura e necessidade de irrigação para os anos de 1970 a 2009.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Necessidade de nutrientes na cultura do pinhão-manso durante os quatro primeiros anos de cultivo	35
Tabela 2 – Relação das propriedades a serem avaliadas para a elaboração do fluxo de energia na cultura do pinhão-manso	40
Tabela 3 – Tubos utilizados na simulação das adutoras	53
Tabela 4 – Distribuição da energia de entrada no ano de implantação da cultura, nas seis propriedades avaliadas	60
Tabela 5 – Energia de entrada (MJ ha^{-1}) nos anos de produção e média por propriedade e ano de avaliação	62
Tabela 6 – Projetos de gotejamento analisados para levantamento de consumo de material e incorporação de energia	74
Tabela 7 – Coeficiente de cultivo (K_c) utilizados no balanço hídrico para os anos de produção da cultura do pinhão-manso	80
Tabela 8 – Distribuição das entradas de energia no sistema de produção de pinhão-manso irrigado via pivô central	82
Tabela 9 – Distribuição das entradas de energia no sistema de produção de pinhão-manso irrigado via gotejamento.....	82

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento populacional mundial em taxas maiores que o aumento da oferta de alimentos, têxteis e energia, é indiscutível a necessidade de medidas de controle para equilibrar essa equação. Neste sentido, existem varias frentes de atuação, uma delas é o controle do próprio crescimento populacional, outra é a ampliação da produtividade das culturas, seja por desenvolvimento de novas técnicas de produção ou até mesmo pela introdução de novas fontes. Esse aumento da produtividade, porém, não deve ser vista como um simples aumento de massa produzida por área, e sim levar em consideração a eficiência produtiva do ponto de vista da sustentabilidade econômica e ambiental. Considerando a questão energética, tem-se buscado alternativas, que possam substituir, pelo menos em parte, a dependência dos combustíveis fósseis. A utilização de culturas bioenergéticas tem se intensificado, e com isso, novas plantas tem se apresentado como opções na produção de biocombustíveis.

A cultura do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L) é uma das que teve um aumento considerável nos estudos que buscam avaliar a sua viabilidade. Várias considerações, portanto, devem ser feitas quando se pretende avaliar a viabilidade de uma cultura. Além da avaliação econômica, é preciso buscar outros indicadores que possam de alguma maneira incorporar a questão referente à sustentabilidade do sistema de produção. A afirmação de que a cultura não vai concorrer com a produção de alimentos porque não é utilizada para tal finalidade, não considera que existe a possibilidade de concorrência por recursos, como por exemplo, os recursos hídricos disponíveis em determinada região.

Uma metodologia que vem sendo utilizada para avaliar o desempenho do ponto de vista de produção de energia, para culturas bioenergéticas, é a análise do fluxo de energia, ou seja, a contabilização da energia de entrada e de saída de um sistema de produção. Essa metodologia incorpora a energia total envolvida no processo, seja consumida diretamente, ou incorporada indiretamente através de equipamentos, insumos e mão de obra. É uma análise que pode ser utilizada para comparar diferentes sistemas de produção, bem como diferenciar pontos do sistema que necessitam de maior atenção, visando um aumento na eficiência ou a busca de uma sustentabilidade energética.

Os sistemas de produção que fazem uso de irrigação são criticados do ponto de vista do uso de recursos, tanto hídrico quanto energético. Porém, as áreas irrigadas que representam 28% da área de mundial cultivada, responde por 45% do total produzido. Sistemas de irrigação, portanto, devem ser bem analisados do ponto de vista do balanço energético, buscando identificar as possibilidades de melhoria na eficiência energética desta prática.

Diante do exposto, realizou-se um estudo, com objetivo principal de avaliar os componentes envolvidos no sistema de produção da cultura do pinhão-mansão, determinando a incorporação de energia envolvida no processo, nas condições de sequeiro e irrigada via gotejamento e pivô central. Para tanto, houve a necessidade de determinação de um objetivo específico que foi o desenvolvimento de um índice de incorporação de energia para os sistemas de irrigação estudados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A planta de pinhão-mansão

Apresentando-se como uma das várias espécies do gênero *Jatropha*, e parte integrante da diversa família *Euphorbiaceae*, o pinhão-mansão (*Jatropha curcas* L), é uma planta ainda pouco estudada, tendo o interesse aumentado recentemente com a possibilidade de sua utilização na produção de óleo destinado a biocombustíveis. Esta planta, denominada popularmente no Brasil como pinhão-mansão, purgueira ou pinha de purga, possui uma maior diversidade na América Central e do Sul e é possivelmente originária da América Central (SATURNINO et al., 2005; BRITTAINE; LUTALADIO, 2010). Sua distribuição natural se dá desde a orla marítima até os 1.000m de altitude, sendo seu cultivo mais indicado em regiões que apresentam entre 500 e 800 m. Nos terrenos de encosta, áridos e expostos ao vento, desenvolve-se pouco, não ultrapassando 2 m de altura (CORTESAO, 1955).

A dispersão da espécie, segundo (BRITTAINE; LUTALADIO, 2010), foi promovida pelos navegantes portugueses, que foram os responsáveis pela distribuição a partir de sua região de origem. Atualmente, a planta se encontra mundialmente difundida, podendo ser encontrada ao longo de toda a região intertropical (ACHTEN et al., 2008; MAES et al., 2009).

Dependendo das condições de clima e disponibilidade de nutrientes, a planta pode atingir até 10 m de altura, principalmente em casos de plantas isoladas. Em plantios comerciais, se apresenta como um arbusto de crescimento rápido com altura variando entre dois a três metros, possui raízes curtas, caule liso, de lenho mole e medula desenvolvida, mas pouco resistente e floema com longos canais que se estendem até as raízes. O Tronco dividido desde a base, em compridos ramos, com numerosas cicatrizes produzidas pela queda das folhas (OPENSHAW, 2000; ACHTEN et al., 2008; BRITTAINE; LUTALADIO, 2010). Trata-se de uma planta perene, a qual geralmente leva de quatro a cinco anos para atingir a maturidade, mas possui expectativa de vida em torno de 50 anos (DRUMOND et al., 2010).

O fruto é capsular trilocular e ovoide com diâmetro de 1,5 a 3,0 cm e comprimento de 2,5 a 4,0 cm. Apresenta uma semente em cada cavidade, formado por um pericarpo ou casca dura e lenhosa, indeiscente, inicialmente verde, passando a amarelo e depois preto. Na maturação contém de 53 a 62% de

sementes e de 38 a 47% de casca, pesando cada uma de 1,53 a 2,85 g (HELLER, 1996; SATURNINO et al., 2005).

Para a cultura do pinhão-mansão, ainda são poucos os trabalhos que trazem informações a respeito do sistema radicular. A maioria das informações disponíveis levam em conta apenas observações de natureza botânica, não se aprofundando no que diz respeito a sua distribuição espacial no solo e muito menos a caracterização das zonas de maior atividade. Devido à natureza dinâmica da distribuição do sistema radicular, reconhece-se que sua caracterização é de extrema importância para a determinação dos parâmetros de manejo da aplicação de água, como a profundidade efetiva das raízes, que define a camada de solo a ser umedecida, bem como a profundidade de instalação dos sensores de controle e monitoramento de umidade. Sousa e Guerra (2012), avaliando o crescimento inicial de plantas de pinhão-mansão, observaram efeito significativo sobre a massa de raiz com a variação na aplicação de nitrogênio e quantidade de água. Krishnamurthy et al. (2012), encontraram em um plantio de um ano de idade, na Índia, raízes até a profundidade de 1,4 m, porém, a maioria do sistema radicular se encontrava até a profundidade de 0,3 m. Estes autores salientam a importância deste tipo de distribuição de sistema radicular para a função de controle de erosão, e ainda comentam sobre a relação inexistente entre este tipo de distribuição e a resistência a seca, característica atribuída a esta planta. Esta última característica, eles atribuem mais a sua capacidade de controle da perda por evaporação por meio de queda de folhas e dormência, do que a capacidade de extração de água pelo sistema radicular.

O teor de óleo na semente é tido como um dos grandes atrativos desta cultura, apresentando variações de 27 a 40% (HELLER, 1996; OPENSHAW, 2000; ARRUDA et al., 2004; ACHTEN et al., 2008).

Uma característica muito peculiar, perante as culturas tradicionalmente cultivadas é o fato de se tratar de uma planta caducifolia, ou seja, perde praticamente todas as suas folhas no final da época seca ou durante a estação mais fria (MAES et al., 2009). Esta característica não deve ser negligenciada no planejamento de tratamentos culturais como poda, controle de doenças e pragas e até mesmo na irrigação.

De acordo com Salé (2008), para assegurar uma boa relação custo/benefício da produção em alta escala de pinhão-mansão, há algumas questões a serem resolvidas, como:

- Criação de programas de coleta e seleção de germoplasma;
- Estabelecimento de áreas de cultivo para multiplicação dos materiais selecionados e garantir a distribuição justa deste material;
- Criar uma rede de teste em diferentes locais, com diferentes condições climáticas, para obter dados para previsões econômicas mais representativas de cada localidade;
- Desenvolvimento de programas de transferência de tecnologia;
- Calcular a real demanda hídrica da cultura;
- Compreender o balanço energético da cultura;
- Avaliar a cultura levando em consideração os aspectos socioeconômicos e também ambientais.

2.2 Produtividade real e produtividade potencial

A produtividade de uma cultura é conhecidamente regida pela expressão de seu genótipo em determinada condição de ambiente. Sendo assim, não só a condição local onde se encontra instalada a cultura, mais também sua predisposição genética são as responsáveis pela produtividade. No caso do pinhão-manso, a variabilidade genética passível de ser encontrada é considerada grande, vários autores como: Guerrero Pinilla et al. (2011); Kanchanaketu et al. (2012); Kumar et al. (2012); Rafii et al. (2012) e Shabanimofrad et al. (2013), elaboram estudos com diferentes números de acessos e em diferentes locais fora do Brasil, e na maioria dos trabalhos, encontrou-se variabilidade entre as plantas estudadas, e alguns trabalhos, o coeficiente de variação genotípica foi o mais elevado para a produção de semente seguido de produção de óleo por hectare, com herdabilidade maior que 63,5%, demonstrando a importância e a potencialidade do melhoramento genético para esta cultura. Guerrero Pinilla et al. (2011), estudando a variabilidade da coleção de germoplasma existente na Colômbia, conseguiu diferenciar 18 grupos distintos dentro de 246 acessos, avaliando 27 características quantitativas e qualitativas.

Para as plantas encontradas no Brasil, alguns trabalhos tem mostrado uma base genética estreita, que para alguns autores evidencia uma ancestralidade comum. Nucci (2011), avaliando 29 acessos conseguiu a diferenciação de apenas 4 grupos, o que, segundo este autor, revela a necessidade de se adicionar o maior número de acesso possível de outras regiões e países, para se implementar um

programa de melhoramento. Esta mesma conclusão de necessidade de adição de novos acessos também foi apontada por Oliveira et al. (2010), ao avaliar a variabilidade genética em áreas experimentais em Sergipe.

Com relação à resposta da cultura às diferentes condições climáticas e de manejo, encontra-se vários trabalhos que demonstram a influência destes fatores na produtividade. Yamada (2011), em estudo sobre zoneamento agroclimático para o pinhão-manso, apresentou com base em diferentes autores, algumas exigências climáticas para esta cultura, dentre elas: alta capacidade de adaptação a condições de disponibilidade de luz; desenvolvimento em diferentes condições de temperatura, com variação de temperatura média de 18 a 25,5 °C, não suportando temperaturas inferiores a -3 °C, porém capaz de resistir geadas mais fracas com a derrubada das folhas; com relação à exigência hídrica, apresenta grande variação de aptidão, podendo sobreviver desde regiões áridas até em locais com altos índices pluviométricos.

Em muitos países da América do Sul e Central, África e Ásia há programas oficiais ou iniciativas particulares incentivando o plantio de pinhão-manso, mas em nenhum deles esta cultura é tradicional, nem existem lavouras bem estabelecidas (com mais de 5 anos) onde se possa confirmar sua produtividade e rentabilidade (SEVERINO et al., 2007).

Fact (2010) indica valores de produtividade (Figura 1) que variam de 1,5 a 10,0 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, apresentando como principal problema para as baixas produtividades atuais, a pouca ou nenhuma seleção genética e limitações de água e nutrientes. Apresenta também uma produtividade potencial teórica da cultura.

Heller (1996), em levantamento feito de diferentes autores, encontrou produtividade variando de 0,1 a 8,0 Mg ha⁻¹. Esta divergência, segundo o autor, pode ter diferentes explicações, inicialmente estes dados são de locais diferentes, além de serem gerados, em alguns casos, pela extrapolação da produção de plantas isoladas. Outra informação que também deve ser considerada é a idade das plantas, que neste caso variam de 1 a 9 anos. Openshaw (2000) apresenta também uma grande variação nos dados de produção, 0,4 a 12,0 Mg ha⁻¹, apresentando como justificativa para este intervalo, a variação de precipitação. Arruda et al. (2004), citando diferentes autores, apresenta uma produção variando 0,5 a 2,0 Mg ha⁻¹, porém as plantas com maiores produção chegaram a produzir 6,37 Mg ha⁻¹.

1 - Produtividade atual - Fatores atuantes: Pragas doenças e pouca ou nenhuma seleção genética;

2 - Variação do potencial comercial - Com controle dos fatores água e nutrientes;

3 - Produtividade potencial teórico para a cultura.

Figura 1 – Níveis de produtividades estimadas para a cultura do pinhão-manso

Fonte: adaptado de (FACT, 2010)

2.3 Necessidade de irrigação na cultura do pinhão-manso

Encontrado naturalmente em uma vasta gama de regimes pluviométricos, variando de 200 a mais de 2500 mm por ano. O pinhão-manso tem gerado uma série de colocações contraditórias com relação a sua necessidade ou não de irrigação. Muitos autores o citam como planta resistente à seca, porém, se referem apenas à manutenção da sobrevivência da planta e não a manutenção de uma produtividade mínima para viabilizá-lo comercialmente como planta produtora de óleo. Achten et al. (2008), em trabalho sobre produção e uso de biodiesel de pinhão-manso, menciona a necessidade de irrigação para garantir alta produtividade nas regiões áridas e semiáridas.

Yamada (2011), em trabalho realizado para determinar o zoneamento agroclimático da cultura do pinhão-manso em algumas regiões do Brasil, determinou as faixas de aptidão quanto à deficiência hídrica e quanto ao excedente. Com relação à deficiência anual, encontrou como apta, regiões com deficiência menor que 360 mm, e inaptas regiões com deficiência maior que 760 mm, ficando como marginais as regiões que se encontram entre estes dois valores. Também

apresentou valores para o excedente hídrico anual, sendo apto menor que 1200 mm, inapto maior que 2500 mm e marginais as regiões entre estes valores. Estes dados de deficiência podem ser um bom indicativo de necessidade ou não de irrigação para algumas regiões do país. A região nordeste brasileira, por exemplo, onde o uso do pinhão-manso foi muito preconizado, apresenta a maior parte do seu território como marginal, e uma área como inapta devido à deficiência hídrica, especificamente no semiárido nordestino.

Algumas respostas à aplicação de irrigação são encontradas na literatura, dentre elas a possibilidade de um melhor controle do florescimento por meio de manejo adequado, conciliando um período de estresse hídrico seguido de uma irrigação. Em contrapartida, encontra-se também um aumento excessivo da parte vegetativa com a utilização de irrigação muito constante. Segundo Carnielli (2003) o pinhão-manso é uma planta oleaginosa viável para obtenção de biodiesel, produz no mínimo duas toneladas de óleo por hectare, podendo chegar a 3,5 toneladas mesmo sem irrigação. Para condições de cultivo melhores, incluindo boas práticas de manejo, boa fertilidade do solo e boa disponibilidade hídrica (entre 900 e 1200 mm ano⁻¹), acredita-se que a produtividade passa atingir 5 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (TEWARI, 2009). Arruda et al. (2004), também citam produtividades neste nível, desde que sejam adotadas práticas de manejo adequadas, como adubação equilibrada e irrigação para suprir a necessidade hídrica.

Muitos trabalhos têm estudado o efeito da irrigação sobre a cultura do pinhão-manso, seja isoladamente ou em conjunto com outros fatores, porém, como já mencionado anteriormente, os estudos são considerados recentes, pois se trata de uma cultura perene que necessitaria de vários anos de acompanhamento para uma conclusão mais segura. Os seguintes autores: Achten et al. (2010); Drumond et al. (2010); Nidhi et al. (2010); Sarhan et al. (2010); Arcoverde et al. (2011); Evangelista et al. (2011) e Horschutz et al. (2012), apresentaram em seus trabalhos, dentre outras avaliações, correlações entre crescimento e ou produção da cultura do pinhão-manso, com níveis de irrigação. Porém, em sua maioria, foram trabalhos realizados com plantas jovens, no primeiro ou segundo ano de cultivo. Nestes trabalhos, podemos observar uma resposta sempre positiva à irrigação para esta primeira fase de cultivo, quando comparado à produção com restrições hídricas. O que mostra que mesmo sendo uma cultura considerada por muitos, como muito

pouco exigente em fertilidade e resistente a seca, quando sem sofrer estas restrições, pode responder positivamente.

Com relação aos diferentes métodos de aplicação de água, pode se considerar esta cultura como sendo de grande adaptabilidade. Apesar de não se encontrar trabalho específico de comparação entre os métodos e a resposta da cultura, o que se tem observado é que existem relatos de áreas em produção com todos os métodos, seja por superfície, aspersão ou localizada (ABOU KHEIRA; ATTA, 2009). No caso da aspersão, se optado pelo uso do pivô central, é indispensável a utilização de podas para se controlar a altura das plantas. Porém, a poda também pode ser necessária em outros sistemas, uma vez que pode facilitar a condução e a colheita.

A soma das áreas irrigadas no Brasil, por aspersão via pivô central e por irrigação localizada já ultrapassaram a marca de 1.200.000 ha (CHRISTOFIDIS, 2008). E as áreas irrigadas por estes dois tipos de irrigação vem sofrendo constante aumento no Brasil, diferentemente de outros países como Estados Unidos que já tem sua área irrigada estabilizada (COELHO, 2007). O conhecimento, portanto, da demanda específica de energia, ou índice de incorporação de energia do sistema de irrigação, é de suma importância para a avaliação da utilização racional destes sistemas, principalmente quando se fala em culturas destinada a produção de biocombustíveis.

Salé (2008) e Rajagopal (2008), expressam preocupação com o fato de que a produção de matéria prima, com o intuito de fabricação de biocombustível, tem grandes possibilidades de se tornar uma cultura de grande escala, como o que já acontece com a cana-de-açúcar. Nesta situação, quase sempre nos deparamos com a utilização de irrigação, em maior ou menor escala, o que pode promover um aumento na pressão pela utilização dos recursos, sejam eles hídricos e ou energéticos.

2.4 Potencialidade da cultura para produção de biocombustíveis

Considerando somente os aspectos ambientais, como emissão de gases poluentes e balanço de carbono, é notável a grande vantagem da utilização de biodiesel de pinhão-mansão em relação ao diesel originado de combustível fóssil. Pode-se obter uma redução de 55% na emissão de fuligem e de 35% na liberação de hidrocarboneto. Além disso, o gás carbônico gerado na queima é consumido no processo de fotossíntese realizado nas lavouras e devolvido à atmosfera como oxigênio, criando um ciclo fechado de produção sem sobras poluentes (CARNIELLI, 2003).

O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), pela Instrução Normativa No. 4, de 14 de janeiro de 2008, autorizou a inscrição no Registro Nacional de Cultivares da espécie *Jatropha curcas* L. (pinhão-mansão), o que abre caminho para a sua exploração comercial no Brasil. Depois desta iniciativa do Programa Brasileiro de Biodiesel, o pinhão-mansão foi incluído como uma alternativa de matéria-prima, baseando-se na expectativa de que a planta possua alta produtividade de óleo e tenha baixo custo de produção. Porém, a pesquisa com a cultura do pinhão-mansão está em fase inicial no Brasil (SATURNINO et al., 2005).

Na Índia, pesquisas iniciais foram coordenadas pelo National Oilseeds & Vegetable Oil Development Board (NOVOD Board) em 21 estados, consistindo na seleção de plantas mais produtivas, multiplicação das sementes e melhorias no sistema de produção. A Sardar Krushinagar Dantiwada University, no estado de Gujarat, e outras universidades indianas, vêm desenvolvendo pesquisas, mas ainda sem resultados muito conclusivos com relação à viabilidade econômica da cultura (SEVERINO et al., 2007).

Com relação à utilização do óleo produzido a partir de sementes de pinhão-mansão, para a produção de biocombustível, podemos encontrar basicamente dois produtos. O primeiro e mais conhecido é o biodiesel, que pode ser utilizado em substituição ao diesel de origem fóssil (ACHTEN et al., 2008). Porém, existe uma segunda alternativa, que até o momento só foi utilizada em pequena escala, que é o bioquerosene, que pode ser utilizado em substituição ao querosene na aviação. Alguns testes, neste sentido, como voos experimentais, já foram até realizados por companhias aéreas e se mostraram muito satisfatórios com relação à viabilidade técnica do biocombustível.

O biodiesel a partir de óleo de pinhão-mansão apresenta características químicas e físicas que são muito satisfatórias para a sua comercialização, tanto no Brasil, quanto na maioria dos outros países. Achten et al. (2008) apresenta uma compilação de valores de diferentes análises químicas e físicas, que demonstram que o biodiesel obtido a partir de óleo de pinhão-mansão, atendem as principais normas de qualidade, sendo elas a Europeia (EN14214:2003), a Alemã (DIN V 51606) e a Americana (ASTM D6751). Estes resultados apontam um horizonte promissor ao pinhão-mansão, frente outras culturas, como a soja, por exemplo, que não consegue atender algumas das exigências de qualidade, apesar de apresentar melhores resultados quando se avalia a disponibilidade de tecnologia e pacotes de produção definido.

Porém, assim como acontece com outras culturas para fins energéticos, o aproveitamento dos resíduos da produção pode ser muito importante do ponto de vista de geração de energia. A queima do bagaço da cana e a geração de biogás em biodigestores são bons exemplos da transformação de resíduos em energia. Na cultura do pinhão-mansão, também temos resíduos. Podemos aproveitar a própria matéria seca originada de poda, bem como os resíduos da parte colhida, seja a casca do fruto ou a torta restante do processo de extração do óleo. Gunaseelan (2009), avaliando o potencial de produção de energia das diferentes partes da planta, concluiu que existe um potencial de aumento de 10% na produção final de energia.

2.5 Avaliação por meio da análise do fluxo de energia

A avaliação utilizando-se dos fluxos de energia como medida de eficiência de um sistema agrícola deve ser vista como complementar a outras análises como a econômica e a social. Buscando identificar nessa avaliação, a sustentabilidade energética da produção. Assim, com o conhecimento de como os sistemas demandam e disponibilizam energia, é possível a definição de políticas de estímulo à adoção de determinadas técnicas que proporcionem a melhoria das áreas já implantadas e orientem na instalação de novas áreas. Compreendendo o fluxo da energia no sistema é possível alterá-lo, buscando medidas que tragam maior efetividade nos resultados econômicos e de sustentabilidade (STANHILL, 1984).

Nos fluxos de energia consideram-se como energia de entrada não somente as fontes de energia empregadas diretamente, como por exemplo, a eletricidade e os combustíveis, mas também a energia demandada nos processos de fabricação e obtenção de outros insumos e serviços. No caso de um sistema agrícola, além da energia diretamente utilizada como o óleo diesel, usado nas operações mecanizadas, e a eletricidade, nos sistemas de irrigação, contabiliza-se também a energia incorporada pelos insumos como maquinário, fertilizantes, defensivos, sementes e demais insumos empregados no processo de produção (SOUZA; MILANEZ, 1990). O sistema de irrigação, portanto, é responsável por duas entradas distintas de energia no sistema. Uma é a energia direta consumida para a pressurização e outra a energia incorporada pelo próprio equipamento.

A energia incorporada por um insumo ou equipamento pode ser contabilizada com a utilização de um índice de incorporação de energia. Pimentel (1980) apresenta esse índice como sendo o conteúdo energético de determinado insumo ou equipamento, expresso pela unidade adotada. Este índice quando multiplicado pela quantidade de insumo utilizado no processo, vai resultar diretamente na quantidade de energia incorporada ao sistema. No caso de equipamentos como máquinas e implementos, inclusive os sistemas de irrigação, a incorporação de energia vinda do material deve ser depreciada ao longo de toda a sua vida útil.

Diferentemente dos tratores e implementos, entre os sistemas de irrigação, têm-se uma distribuição de materiais bem mais heterogênea. Podemos ter sistemas como o de aspersão via pivô central onde a predominância é de elementos de origem metálica (estrutura do próprio pivô e muitas vezes também a adutora), e os sistemas de gotejamento, onde geralmente, a maioria dos componentes é de derivados de petróleo (BATTY et al., 1975). Boustead (1979) apresenta índices energéticos para diferentes materiais, dentre eles: $110,66 \text{ MJ kg}^{-1}$ para tubo de PVC, $104,07 \text{ MJ kg}^{-1}$ para tubo de aço galvanizado e $107,32 \text{ MJ kg}^{-1}$ para tubo de polietileno linear de baixa densidade (material geralmente utilizado na fabricação de tubos gotejadores para irrigação). Considerando a vida útil destes materiais dentro de um sistema de irrigação, que de acordo com Marouelli e Silva (2011) é de 20 anos para os tubos de PVC e aço galvanizado e 10 anos para o tubo gotejador, obtemos os seguintes índices de incorporação anuais: $5,33 \text{ MJ kg}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o tubo

de PVC; $5,23 \text{ MJ kg}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para tubo de aço e $10,73 \text{ MJ kg}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para o tubo gotejador.

Frigo et al. (2008) mencionam a necessidade do desenvolvimento de estudos que venham a mensurar os processos de fabricação de máquinas, implementos e sistemas de irrigação no intuito de se obter informações com maior rigor e que possibilitem uma análise mais confiável da viabilidade energética/econômica do sistema de produção de biodiesel na cultura do pinhão-mansão.

A irrigação é apontada por muitos como a principal consumidora de energia direta em sistemas onde está presente. Pellizzi (1992) apresenta a irrigação como consumidora de até 50% da energia direta envolvida no processo em um sistema de produção de soja. Frigo et al. (2008), trabalhando exatamente com a cultura do pinhão-mansão também encontrou valores nessa ordem de grandeza, mais precisamente 52,35%. Nesse sentido, a racionalização do consumo de energia pelos diferentes sistemas deve ser sempre considerada numa análise para aumentar sua eficiência energética. Sistemas que operam com distribuição da água parcelar por gravidade, como o que acontece com os sulcos, por exemplo, pode reduzir o consumo de energia em até 78%, comparado à irrigação por aspersão (TOPAK et al., 2005). Outras diferenças também podem ser encontradas na comparação entre irrigação por gotejamento, aspersão convencional e pivô central. Novas tecnologias de irrigação e de economia de energia devem ser sempre consideradas. Neste sentido, até mesmo a substituição de emissores antigos de um pivô central, por modelos novos que trabalham com pressões menores, podem representar uma considerável redução na incorporação anual de energia.

2.6 Características agronômicas do sistema de produção

Diferente de outras culturas, que já se encontram com o processo de implantação, condução e colheita bem estabelecidos, o pinhão-mansão ainda apresenta alguns pontos a serem definidos.

O conhecimento das diferentes operações, bem como o consumo de diferentes insumos pelo sistema de produção é de suma importância tanto para uma avaliação econômica, quanto para uma avaliação da sustentabilidade do sistema, seja ela, social, ambiental ou energética. Para a avaliação via balanço de energia,

quando se utiliza o fluxo de material, é muito importante a quantificação dos processos, seja a quantidade de material empregada ou o tempo gasto em cada etapa com mão de obra (PIMENTEL, 1980).

Heller (1996); Openshaw (2000); Brittain e Litaladio (2010) e Fact (2010), já apresentam em suas publicações, uma série de parâmetros que nos permitem estabelecer ao menos alguns critérios básicos do sistema de produção da cultura do pinhão-mansão.

Na Figura 2, podemos observar a distribuição dos estágios de desenvolvimento da cultura do pinhão-mansão, onde a primeira fase é a de implantação ou estabelecimento, vem desde o plantio da muda no campo até o início das primeiras flores. A segunda fase, indução floral ou florescimento é a uma das fases mais delicadas, onde ocorrem influências das condições climáticas como temperatura, radiação e precipitação para que se inicie o aparecimento das flores. Com a polinização dá-se início a terceira fase que é a frutificação, passando em seguida para a quarta fase que é o enchimento e maturação dos frutos. O tempo entre a indução floral e a maturação para a colheita é de aproximadamente três meses. A quinta fase, conhecida como dormência ocorre geralmente após a colheita dos frutos. Esta última fase pode ou não ocorrer, dependendo de condições estressantes, porém, o mecanismo controlador desta dormência ainda não é totalmente conhecido (FACT, 2010).

Figura 2 – Estágios do desenvolvimento da cultura do pinhão-mansão

Fonte: adaptado de (FACT, 2010)

Uma característica das plantas cultivadas até o momento é que a indução floral, frutificação e enchimento dos frutos não ocorrem distintamente no tempo, provocando o aparecimento de flores e frutos em diferentes graus de maturação ao mesmo tempo na planta. Isso faz com que o processo de colheita, por exemplo, não possa ser concentrado em um único período. Tem-se buscado, portanto, por meio de melhoramento genético e até mesmo de técnicas de produção, a concentração

destas fases de desenvolvimento, visando à redução principalmente dos custos de colheita, que com a desuniformidade de maturação, fica difícil de ser mecanizada (BRITTAINE; LUTALADIO, 2010).

2.6.1 Produção de mudas

Apesar de ser possível o plantio de sementes diretamente no campo, o processo mais usual para a propagação de plantas de pinhão-manso ainda é a utilização de mudas produzidas previamente. Vários estudos têm mostrado a possibilidade de utilização de mudas advinda de sementes ou de estacas, porém, as mudas produzidas a partir de estacas não apresentam uma raiz pivotante central, o que pode reduzir a capacidade de resistência a seca (MAES et al., 2009; ACHTEN et al., 2010).

Paulino (2011b) avaliando a produção de mudas em casa de vegetação, com diferentes recipientes, encontrou como melhor opção a utilização do tubetes de 290 cm³ e um consumo médio de água em torno de 1,4 litros em todo o ciclo.

2.6.2 Preparo de solo e plantio

O preparo de solo para o plantio consiste na limpeza da área com a remoção de plantas daninhas que possam vir a competir com as mudas recém plantadas. O plantio geralmente é feito em covas, e o espaçamento entre plantas tem variado de 2 x 2 metros até 3 x 4 metros, dependendo das características do sistema a ser utilizado. Sistemas que utilizam maior mecanização têm optado por espaçamentos maiores, utilizando-se do espaço vazio no período inicial para a produção de alguma outra cultura intercalar (FACT, 2010).

Em solos com problemas de compactação aconselha-se a subsolagem ou pelo menos o aprofundamento das covas para melhorar o desenvolvimento do sistema radicular das plantas. As covas devem ter 0,30 m de diâmetro e pelo menos 0,45 m de profundidade. Podem ser abertas manualmente com cavadeira ou com auxílio de brocas acopladas a um trator (BRITTAINE; LUTALADIO, 2010).

2.6.3 Controle de plantas daninhas

O controle de plantas daninhas na área de produção deve ser empregado sempre que houver possibilidade de concorrência entre as ervas daninhas e a planta. Mesmo não conseguindo eliminar a planta de pinhão-manso, as ervas daninhas promovem uma diminuição expressiva no seu crescimento. A capina manual é o controle mais comum, principalmente em plantios novos, causando um aumento considerável no consumo de mão de obra. O controle químico com uso de herbicidas ainda é pouco estudado, não possuindo nenhum registro de produto para a cultura até o momento. Rocha et al. (2010), estudando a utilização de herbicidas pré-emergentes, encontrou resposta variada até mesmo entre genótipos de pinhão-manso, com relação a efeito de toxidez de herbicida às plantas.

Uma opção de controle após passada a fase de estabelecimento da cultura é a manutenção da área por meio de roçagem do mato. Esta operação é bem menos onerosa que a capina manual, e ainda auxilia na manutenção de uma cobertura do solo, melhorando o controle de erosão e a manutenção da umidade.

2.6.4 Poda

Vários trabalhos têm mostrado que a poda pode ser um processo benéfico a cultura. Melo et al. (2008) encontrou melhora significativa na produtividade individual de plantas de pinhão-manso, e também uma concentração na florada e produção dos frutos. Este autor menciona a poda como sendo uma ferramenta de manejo muito útil para uma possível colheita mecanizada, tanto pela concentração da produção no tempo como pela manutenção da arquitetura da planta.

Árvores isoladas de pinhão-manso podem atingir até 10 m de altura (HELLER, 1996). Esta altura em plantios comerciais causaria problemas sérios na hora da colheita e nos tratos culturais como controle de pragas e doenças. Outra condição que também exige controle de altura é quando as plantas são cultivadas com irrigação via pivô central.

Fact (2010) indica uma primeira poda entre 3 a 6 meses para melhorar a ramificação das plantas recém estabelecidas, fazendo uma redução da altura da planta para 0,3 a 0,4 m. Esta prática, portanto, não precisa ser realizada se a planta já apresentar boa ramificação inicial. A segunda poda deve ser realizada no segundo

ciclo de produção, reduzindo os ramos secundários e terciários a um terço de seu tamanho. Esta poda pode ser repetida a cada dois ciclos. Uma poda drástica, com recepa total a uma altura de cerca de 0,45 m pode ser feita depois de um longo período de produção (8 a 10 anos) para a renovação do plantio. Se a planta estiver bem estabelecida, com sistema radicular desenvolvido, a rebrota tende a ser bem vigorosa e em pouco tempo se tem a retomada da produção.

2.6.5 Adubação

Embora a planta de pinhão-mansinho seja muito resistente, capaz de manter sua sobrevivência em solos com baixos índices de fertilidade, para se garantir um nível de produtividade satisfatório, é necessária a adubação tanto na implantação da cultura quanto na manutenção ao longo dos anos de produção. Na tabela 1 encontra-se uma recomendação básica da necessidade de nutrientes durante os quatro primeiros anos de cultivo, sendo que está sendo considerado neste caso um solo com boa fertilidade, sendo capaz de suprir 50% da necessidade da planta. Em um solo com baixa fertilidade estes valores deveriam ser ampliados (FACT, 2010).

Tabela 1 – Necessidade de nutrientes na cultura do pinhão-mansinho durante os quatro primeiros anos de cultivo

Nutriente	1	2	3	4	Total
	kg ha ⁻¹ ano ⁻¹				
N	23	34	69	103	229
P ₂ O ₅	7	11	21	32	71
K ₂ O	34	50	101	151	336

Fonte: adaptado de (FACT, 2010)

A colheita de uma tonelada de frutos (casca + sementes) extrai os seguintes valores médios: 24,3; 3,85 e 22,95 kg dos nutrientes, nitrogênio, fósforo e potássio respectivamente. A casca e a torta resultantes do processo de extração do óleo pode ser retornada ao campo, devendo ser descontado destes valores de extração os seus respectivos montantes. Porém, estudos já vêm sendo conduzidos e apontando como melhor utilização para este material a queima para a cogeração de energia, trabalhando num sistema integrado, similar ao que acontece com a cana de açúcar (GUNASEELAN, 2009). Outra possibilidade para a torta, ou farelo, é a

utilização na ração animal, desde que sejam sanados os problemas com a toxicidade do material.

2.6.6 Controle de pragas e doenças

Seguindo a tendência do que acontece com plantas isoladas que passam a ser cultivadas em maior escala, as plantas de pinhão-mansó, inicialmente não apresentavam grandes problemas com pragas e doenças. Porém, vêm se multiplicando as publicações com descrição de novos ataques. Algumas pragas apresentam importância variada conforme a região, como vários besouros que ocorrem mais na região da África e os percevejos que ocorrem mais nas Américas e Ásia (FACT, 2010).

Na Índia existe grande preocupação com um vírus que tem se espalhado rapidamente. E também com a possibilidade de transferência de um vírus da mandioca africana para o pinhão-mansó. Heller (1996) não aconselha o plantio de pinhão-mansó juntamente com mandioca (*Manihot esculenta*). Da mesma maneira não é aconselhável o plantio de feijão (*Phaseolus vulgaris*) juntamente com o pinhão-mansó, pois o feijão é suscetível a um vírus do pinhão-mansó que é transmitido pela mosca branca.

Como medida de controle, tem-se utilizado muito a aplicação de produtos químicos baseados no controle das mesmas pragas ou doenças que ocorrem em outras culturas. Existe a necessidade, portanto, de novos estudos para se estabelecer definições de controle e aplicação para a cultura do pinhão-mansó.

Medidas preventivas como seleção de plantas sadias como matrizes, desinfecção de ferramentas de poda, cuidado com danos realizados às plantas, entre outros, podem ajudar no controle e na manutenção dos níveis de danos (FACT, 2010). O controle químico é feito sempre com pulverizações que podem ser via pulverizadores costais manuais ou acoplados a tratores, lembrando que a utilização de tratores e implementos deve ser considerada na hora da escolha do espaçamento de plantio.

2.6.7 Colheita

A colheita tem sido considerada como a maior demanda de mão de obra da cultura. Algumas tentativas de mecanização com a adaptação de uma colhedora de café já foram feitas, porém, a desuniformidade de maturação tem-se mostrado como o principal entrave para esta prática. A arquitetura da planta também pode ser um empecilho, portanto, com a utilização de técnica de poda este fator pode ser contornado (BRITTAINE; LUTALADIO, 2010). A colheita feita manualmente faz com que o seu custo na cultura do pinhão-manso seja maior que em outras oleaginosas. Dentre os principais problemas podemos citar:

- A produção se estende por um longo período, fazendo com que seja necessária a coleta durante vários meses no ano;
- No mesmo cacho é possível encontrar frutos em diferentes estados de maturação (secos, verdes e amarelos);
- Como o fruto é pequeno e está distribuído por toda a planta, o processo de coleta é lento;

A eficiência de colheita está relacionada também com a produtividade da planta, quanto maior a produção de fruto por planta, menor o espaço percorrido para se acumular o mesmo peso de fruto colhido. O que se tem observado nos trabalhos sobre eficiência de colheita manual de pinhão-manso é que existe uma variação muito grande entre os diferentes locais e diferentes sistemas de plantio. (FACT, 2010) apresenta uma série de dados de colheita, onde se pode observar esta variação. Como média de eficiência deste processo, este autor apresenta 20-30 kg por pessoa por dia para áreas com baixa produtividade e 40-70 kg por pessoa por dia para áreas com produtividades maiores.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Base de dados para o fluxo de material

Para o levantamento de uma base de dados que possa dar suporte a análise dos fluxos de energia da cultura, foram avaliadas cinco propriedades que possuem produção de pinhão-mansó em parceria com a empresa de biodiesel Biocapital Consultoria Empresarial e Participações S.A. (Tabela 2). As áreas destinadas à produção de pinhão-mansó dentro destas propriedades são bastante reduzidas, porém possuem uma base de dados, referente às operações de campo, muito detalhada, o que subsidia a análise. Possuem também, diferentes níveis de mecanização, o que pode ser interessante para visualizar a influência desse parâmetro na determinação da energia demandada. Por serem áreas de interesse da empresa produtora de biocombustíveis, estas foram mantidas sempre sem restrições quanto a necessidades nutricionais e com controle de pragas e doenças bastante intensivo.

Como as cinco áreas de produção são conduzidas sem irrigação, foi utilizada uma sexta área que se encontra implantada na área experimental do departamento de Engenharia de Biossistemas, da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo (ESALQ – USP), no município de Piracicaba-SP. Na Figura 3, é apresentada a localização das seis propriedades avaliadas. Podemos observar que as áreas se encontram distribuídas por todo o estado de São Paulo, o que as torna interessante do ponto de vista de representatividade das diferentes condições climáticas do estado.

Com relação à energia agregada na produção de mudas de pinhão-mansó, parâmetro importante a ser considerado no balanço de energia do sistema de produção, utilizou-se dos valores apresentados por Paulino (2011a), que foi de 2,30 MJ por muda.

Tabela 2 – Relação das propriedades a serem avaliadas para a elaboração do fluxo de energia na cultura do pinhão-mansão

Nome da propriedade	Área		Área cultivada
	Nº	Local	
Fazenda Santa Emília	1	Marília SP	7,5 ha
Sítio São Francisco	2	Motuca SP	2,5 ha
Sítio Gerônimo	3	Jacupiranga SP	1,6 ha
Fazenda Virginia	4	General Salgado SP	2,3 ha
Sítio Catú	5	Charqueada SP	4,0 ha
Fazenda Areão	6	Piracicaba SP	2,0 ha

Como o objetivo do projeto não é a determinação da influência da irrigação na produtividade, e sim na análise de fluxos de energia, essas áreas serviram de base de comparação para a inclusão da irrigação e determinar assim, qual foi o incremento mínimo de produtividade necessária para viabilizar a produção irrigada por pivô central e gotejamento.

Quando se considera somente a incorporação energética oriunda do sistema de irrigação, está se referindo ao índice energético do sistema de irrigação em questão, já quando se contabiliza também o consumo de energia para o acionamento e manutenção deste sistema, está se tratando do índice energético da operação irrigação como um todo.

Figura 3 – Localização dos seis municípios do estado de São Paulo onde estão localizadas as propriedades do estudo

Na propriedade um, com 7,5 ha, foi possível a obtenção de quatro anos de informação sobre a cultura do pinhão-manso, sendo iniciada a atividade no ano safra 2007/2008 e seguindo até 2010/2011. Uma característica dessa propriedade foi a utilização, sempre que possível, da mecanização para a elaboração das tarefas como pulverização e controle de mato com roçadeira. Somente nas operações onde não era possível a utilização de máquinas, como marcação das covas, controle localizado de formiga e colheita, fez-se uso de operação totalmente manual.

A propriedade dois, com apenas 2,5 ha, iniciou seu plantio na safra 2008/2009, e possui por tanto apenas três anos de dados disponíveis. Em virtude do tamanho reduzido da área, optou-se neste caso pela utilização de tratores somente no preparo da área e operações de plantio. As demais operações que ocorreram ao longo dos três anos, foram manuais ou com uso de implementos portáteis com a roçadeira e pulverizador costal.

Apresentando a menor área analisada, a propriedade de número três, com apenas 1,6 ha, iniciou suas atividades com o pinhão-manso em 2007/2008, possuindo, portanto, quatro anos de dados disponíveis para análise. Nessa área, assim como na área dois, já apresentada, também se optou pela utilização de tratores apenas nas operações de plantio.

A propriedade quatro, com 2,3 ha, teve suas atividades iniciadas em 2008/2009, e apresenta apenas três anos de dados disponíveis, assim como a área dois. Porém, ao contrário desta, optou pela utilização de tratores e implementos sempre que possível.

Com 4,0 ha, a quinta propriedade avaliada, também fez uso de tratores e implementos sempre que possível e possui quatro anos de dados para análise, iniciando suas atividades em 2007/2008.

A sexta área de estudo, localizada dentro da área experimental do departamento de Engenharia de Biossistemas – ESALQ/USP, apesar de apresentar apenas um ano de dados para a análise, ano de implantação da cultura, vai ser de grande importância para a introdução da irrigação na análise de energia, uma vez que as demais áreas são conduzidas em condição de sequeiro. Pretende-se, portanto, utilizar os dados da área seis para estudar a incorporação advinda do sistema de irrigação, enquanto que nas demais áreas, se avalia a incorporação advinda do sistema de produção.

As diferentes áreas do estudo utilizaram diferentes tipos e potência de tratores, variando de 47,84 kW até 88,32 kW. Porém, como o consumo direto de combustível pela máquina agrícola foi calculado em função da potência do motor, como será apresentado adiante, optou-se pela padronização do trator. Como as áreas são pequenas, utilizou-se o trator de 47,84 kW como padrão, sendo que este é o suficiente para as atividades elaboradas em todas as propriedades.

Algumas áreas, como a um e a cinco, apresentavam plantio em dois espaçamentos diferentes, porém, os dados de atividade de campo não foram coletados separadamente, o que impede a diferenciação dessa variável nas atividades. O número médio de plantas por hectare variou de, aproximadamente, 833 até 1100.

3.2 Incorporação de energia

Para a determinação do fluxo de material do sistema de produção agrícola do pinhão-mansão foi utilizada a metodologia apresentada por Romanelli e Milan (2010), onde se considerou a determinação do fluxo de materiais dos insumos diretamente aplicados e a determinação do fluxo de materiais dos insumos indiretamente aplicados, que envolve o consumo de combustível, a depreciação de maquinário e a mão de obra.

Foram utilizados dados levantados na própria área experimental, assim como dados da literatura e de levantamento feito nas áreas de produção apresentados na Tabela 2.

Depois de obtido o fluxo de material, foi possível calcular o fluxo de energia com a multiplicação das quantidades de cada elemento pelo seu índice de incorporação de energia (PIMENTEL, 1980).

Para a determinação dos índices de energia dos sistemas de irrigação utilizados, ou seja, pivô central e gotejamento, foi realizado um estudo para a quantificação da utilização de cada tipo de material dentro de cada sistema em função da área ocupada por ele. Este estudo se fez necessário uma vez que a literatura apresenta somente índices de energia pouco detalhados para os sistemas de irrigação.

O balanço de energia (BE) de um sistema pode ser expresso pela diferença entre a quantidade de energia que entra no sistema (EE) e quantidade de energia que sai (ES) ou produzida pelo sistema como apresentado na eq.(1) (SIQUEIRA et al. 1999). Outra forma de se avaliar seria com o retorno energético do investimento (EROI = Energy Return Over Investment – eq.(2) (HALL, 2004).

$$BE = ES - EE \quad (1)$$

$$EROI = \frac{ES - EE}{EE} \quad (2)$$

As entradas de energia no sistema podem ser divididas em energia de entrada indireta, que não mudam com a variação de elementos da produção e manejo como a produtividade, incidência de doenças e pragas e lâmina de irrigação

a ser aplicada e energia de entrada direta que por sua vez são dependentes dos fatores de produção e manejo.

3.2.1 Energia incorporada por máquinas e implementos agrícolas

A depreciação de máquinas e implementos é a partição da energia intrínseca ao processo de fabricação desses produtos, distribuídas durante toda a sua vida útil, considerando sua plena utilização.

Para máquinas e implementos é possível a utilização de um índice direto em função da massa total depreciada ao longo da vida útil como apresentado na eq.(3) Esse índice só é passível de utilização porque representa uma média de avaliações já feitas para diferentes máquinas e implementos. Ulbanere (1988) apresenta como índice energético de máquinas e implementos agrícolas, a demanda de energia para a sua fabricação, sendo o valor de 68,86 MJ kg⁻¹.

$$E_M = \frac{\left[\left(\frac{M_m}{Vu_m} + \frac{M_i}{Vu_i} \right) \times H_m \times IE_{mi} \right]}{Ac} \quad (3)$$

Em que:

E_M - Energia proveniente de maquinário e implemento (MJ ha⁻¹ ano⁻¹);

M_m - Massa da máquina envolvida na operação (kg);

Vu_m - Vida útil da máquina envolvida na operação (h);

M_i - Massa do implemento (kg);

Vu_i - Vida útil do implemento (h);

H_m - Horas máquinas gasto na operação durante o ano (h ano⁻¹);

IE_M - Índice energético para máquinas e implementos (MJ kg⁻¹);

Ac - Área cultivada (ha).

3.2.2 Energia incorporada pelos insumos aplicados

A energia proveniente dos insumos aplicados pode ser dividida em energia dos insumos líquidos (Eil) como inseticidas e herbicidas, e insumos sólidos (Eis) como fertilizantes, calculadas pela eq. (4) e eq. (5), respectivamente (ROMANELLI; MILAN, 2005):

$$E_{il} = \frac{(ind_l) \times (ia) \times (Vp)}{Va} \times Q \quad (4)$$

$$E_{is} = Qt \times ind_s \quad (5)$$

Em que:

E_{il} - Energia contida nos insumos líquidos (MJ ha⁻¹ ano⁻¹);

Ind_l - Índice de energia contida nos insumos líquidos (Anexo B) (MJ L⁻¹);

Vp - Volume do produto comercial aplicado no ano (L ano⁻¹);

Va - Volume da calda (L);

ia - Concentração do princípio ativo (decimal);

Q - Taxa de aplicação da calda (L ha⁻¹);

E_{is} - Energia contida nos insumos sólidos (MJ ha⁻¹);

$Inds$ - Índice de energia contida nos insumos sólidos (Anexo A) (MJ kg⁻¹);

Qt - Quantidade de insumos sólidos aplicados por hectare no ano (kg ha⁻¹ ano⁻¹).

3.2.3 Energia incorporada pelo consumo direto de combustíveis

A entrada de energia no sistema, proveniente da utilização de combustíveis pode ser representada pela eq. (6), onde se apresenta o consumo anual por unidade de área.

$$E_c = \frac{Cb \times fcb \times Hm}{Ac} \quad (6)$$

Em que:

E_c - Energia proveniente do consumo de combustível (MJ ha⁻¹ ano⁻¹);

Cb - Consumo horário de combustível (L h⁻¹), calculado pela eq.(7);

fcb - Fator de energia contida no combustível (Diesel), (Anexo C) (MJ L⁻¹);

Hm - Número de horas máquinas gastos na operação durante o ano (h ano⁻¹);

Ac - Área cultivada (ha).

O consumo horário de combustível pode ser obtido no campo com a avaliação direta do consumo da máquina agrícola, ou ser estimado em função de um fator de consumo específico em função da potência da máquina motriz utilizada.

$$C_b = P \times f_{ce} \quad (7)$$

Em que:

C_b - Consumo horário de combustível ($L\ h^{-1}$);

P - Potência bruta do trator ou máquina motriz utilizada (kW);

f_{ce} - Fator de consumo específico por potência - igual a $0,163\ (L\ kW^{-1}\ h^{-1})$, (MOLIN; MILAN, 2002).

3.2.4 Energia incorporada pela mão de obra

De acordo com Serra (1984) o gasto energético horário de um homem é de 2,2 MJ. O cálculo do gasto energético é dado pela eq.(8).

$$E_{MO} = \frac{Hh \times f_{mo}}{Ac} \quad (8)$$

Em que:

E_{MO} - Energia proveniente da mão de obra ($MJ\ ha^{-1}\ ano^{-1}$);

Hh - Número de horas trabalhadas durante o ano ($h\ homem^{-1}\ ano^{-1}$);

f_{mo} - Fator de consumo energético pela mão de obra ($MJ\ h^{-1}\ homem$);

Ac - Área cultivada (ha).

3.2.5 Energia incorporada pelo acionamento da irrigação

Os sistemas de irrigação considerados, seja por gotejamento ou pivô central, necessitam de energia para pressurização e distribuição da água na área a ser irrigada. Com relação ao tipo de energia utilizada pelo sistema, esta pode ser via energia elétrica ou por meio de motor diesel. Atualmente a energia elétrica é a responsável pelo acionamento da maioria dos equipamentos, devido principalmente ao seu menor custo. Porém, com o aumento da utilização dos biocombustíveis,

pode-se no futuro ter mais opções de diesel e uma oferta mais atraente deste combustível. Seja com o uso da energia elétrica (9) ou uso de diesel (10) (ROMANELLI; MILAN, 2005), a energia total consumida está em função da potência total instalada e do fator de energia contido na fonte a ser utilizada.

$$E_{irr_{el}} = \frac{fee \times Pot \times Ud \times ND}{Ai} \quad (9)$$

Em que:

$E_{irr_{el}}$ - Energia consumida pela irrigação com acionamento elétrico ($MJ ha^{-1} ano^{-1}$);

Pot - Potência nominal do motor (kW);

fee - Fator de energia contida na energia elétrica (Anexo C) ($MJ kW^{-1} h^{-1}$);

Ud - Uso diário da irrigação ($h dia^{-1}$);

ND - Número de dias de irrigação durante o ano ($dia ano^{-1}$);

Ai - Área irrigada (ha).

O consumo total de diesel de um motor pode ser definido pela eq. (7) já apresentada, ficando a eq. (10) como a que define a energia consumida pela irrigação quando acionada por motor diesel.

$$E_{irr_{ds}} = \frac{Cb \times fcb \times Ud \times ND}{Ai} \quad (10)$$

Em que:

$E_{irr_{di}}$ - Energia consumida pela irrigação com acionamento diesel ($MJ ha^{-1} ano^{-1}$);

Cb - Consumo horário de combustível ($L h^{-1}$) (eq. (7));

fcb - Fator de energia contida no combustível (Diesel), (Anexo C) ($MJ L^{-1}$);

Ud - Uso diário da irrigação ($h dia^{-1}$);

ND - Número de dias de irrigação durante o ano ($dia ano^{-1}$);

Ai - Área irrigada (ha).

3.2.5.1 Energia incorporada pelos materiais dos sistemas de irrigação

A maioria dos trabalhos sobre análise energética envolvendo culturas irrigadas, utilizam o índice energético para o sistemas de irrigação apresentado por Pimentel (1980). Este autor por sua vez se utiliza de um trabalho de Batty et al. (1975), que fez uma determinação da demanda energética de diferentes sistemas de irrigação, baseado em um fluxo de material. A característica principal deste trabalho é a utilização de um módulo de área fixo, onde foram simulados diferentes tipos de sistemas de irrigação. Não se considerou, portanto, a possibilidade da influência da área irrigada no consumo de material dos diferentes sistemas de irrigação, e muito menos a influência da distância da área irrigada até a fonte de água, ou seja o comprimento da adutora.

A energia demandada na fabricação dos sistemas de irrigação pode ser determinada com a utilização de um índice que expresse o consumo de energia da fabricação de cada material em função da área por ele irrigada conforme a eq. (11). Este índice pode variar de um sistema para outro, bem como dentro do mesmo sistema em função da área irrigada. Um sistema de pivô central, por exemplo, tem um aumento significativo da área irrigada com o aumento de uma única torre devido a sua distribuição radial. O Incremento da área irrigada não é proporcional ao incremento de material utilizado neste sistema de irrigação, o que já não ocorre com os sistemas de gotejamento e microaspersão que tem material distribuído por toda área.

$$I_{irr} = \frac{\sum_a^n (a \times ind_a + b \times ind_b + \dots + n \times ind_n)}{Ai \times Vu} \quad (11)$$

Em que:

I_{irr} - Índice energético do sistema de irrigação ($MJ \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$);

a, b,... n - Massa do material a até n encontrado no sistema de irrigação (kg);

$Ind_{(a,b,n)}$ - Índice de energia contida nos componentes a até n (Anexo D) ($MJ \text{ kg}^{-1}$);

Vu - Vida útil do sistema de irrigação (ano);

Ai - Área irrigada (ha).

Para a determinação do consumo de material dos sistemas de irrigação a serem estudados, gotejamento e pivô central, optou-se pela separação do sistema em seus subsistemas constituintes. Algumas partes dos sistemas de irrigação como a adutora, sofrem influência direta do seu comprimento e da vazão no que diz respeito ao seu consumo de material. Outras partes como o sistema de filtragem, sofrem influência praticamente só da vazão total do sistema. O consumo de material em um sistema de bombeamento, por sua vez, é bastante influenciado pelo tamanho do motor instalado, ou seja, a potência instalada. A potência instalada pode ser considerada uma variável que incorpora indiretamente a vazão e a pressão do sistema. Esta mesma variável também será utilizada para o cálculo do consumo de energia para acionamento da irrigação, como apresentado na eq. (9).

Para efeito de cálculos será considerado as seguintes divisões do sistema:

- Bombeamento – Conjunto motobomba mais as peças correspondentes nas ligações de sucção e saída de bomba;
- Adutora – Tubulação que liga o sistema de bombeamento até a entrada da parcela de irrigação para o gotejamento ou até o centro do pivô;
- Filtragem – Conjunto de filtros de areia que poderão estar instalados no início ou final da adutora. Somente será considerado sistema de filtragem no sistema via gotejamento.
- Equipamento de irrigação – No caso do pivô central é o próprio equipamento, ou seja, as torres e a própria linha lateral do pivô. No caso de gotejamento é todo o material distribuído na área irrigada, linhas laterais, linhas de derivação e secundárias e também os cavaletes de controle com suas válvulas e acessórios.

3.2.5.2 Bombeamento

Será considerado como sistema de bombeamento o conjunto motobomba e será utilizado um fator de correlação entre peso e potência do conjunto motobomba (f_{pot}) a ser extraído de informações de catálogos de fabricantes. Por se tratar também de uma máquina, o cálculo da energia incorporada pelo sistema de bombeamento pode ser realizado analogamente ao apresentado pela eq. (3), porém, com algumas alterações para a inclusão da potência instalada como variável.

$$E_b = \frac{\text{Pot} \times f_{\text{pot}} \times IE_b}{Vu_b \times Ai} \quad (12)$$

Em que:

E_b - Energia proveniente do conjunto motobomba ($\text{MJ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$)

Pot - Potência do conjunto motobomba instalado (kW);

f_{pot} - Fator de correlação entre peso e potência instalada (kg kW^{-1});

Vu_b - Vida útil do conjunto motobomba (anos);

IE_b - Índice energético para conjunto motobomba (MJ kg^{-1}) – 84 MJ kg^{-1} (BATTY et al., 1975);

Ai - Área irrigada (ha).

A simplificação da eq.(12) poderia ser feita utilizando-se de um consumo específico de energia por área, ou seja, a utilização de valores médios de potência instalada por hectare irrigado. Existem alguns levantamentos neste sentido, e também vários trabalhos que buscam a melhoria na eficiência do consumo de energia pelos sistemas de irrigação.

3.2.5.3 Adutora

No caso de uma adutora para condução de água, a incorporação de material, que é a principal fonte de incorporação de energia, apresenta dois elementos que devem ser considerados na composição do índice de incorporação energética: o primeiro é o comprimento adotado para a adutora e o segundo é a sua vazão. Dessa maneira, esse índice, quando multiplicado pela quantidade de insumo utilizado, ou seja, metros de adutora e a vazão transportada por ela, resultará diretamente na quantidade de energia incorporada.

Em adutoras destinadas a irrigação, é comum a utilização de apenas um diâmetro em toda sua extensão, e o fator que interfere nas características hidráulicas como perda de carga é função do diâmetro interno do tubo. Porém, quando se fala em fluxo de material, ou incorporação material em uma adutora, é necessária também a utilização do diâmetro externo, para se conseguir o cálculo do volume, e consequentemente a massa de material utilizado em determinada adutora, como se pode observar na eq. (13).

$$W = \left[\frac{\pi}{4} (D_e^2 - D_i^2) \right] \times L \times \gamma \quad (13)$$

Em que:

W - Massa da adutora (kg);

D_e - Diâmetro externo do tubo de PVC (m);

D_i - Diâmetro interno do tubo de PVC (m);

L - Comprimento da adutora (m);

γ - Massa específica do PVC (kg m^{-3}).

Na determinação do diâmetro interno, um dos métodos utilizados no dimensionamento de adutoras é a escolha do diâmetro mais econômico, ou seja, aquele que apresenta o menor custo total, incluindo os custos fixos e variáveis. Dentre as formulas utilizadas para este cálculo, a eq. (14), conhecida como equação de Bresse, é uma das mais conhecidas para tubulações que trabalham em regime contínuo. É uma equação que utiliza como variável a vazão do sistema e um coeficiente que varia em função do custo de bombeamento e do custo do material, ou seja, custos fixos e variáveis da adutora. Zocoler et al. (2006), em trabalho comparando as diferentes situações de fonte e tarifação de energia, encontraram valores da ordem de 0,9 a 1,2 para o coeficiente da equação. Para este trabalho, será utilizado um valor de coeficiente igual a 1.

$$D_0 = K\sqrt{Q} \quad (14)$$

Em que:

D_0 - Diâmetro que apresenta o menor custo total (m);

Q - Vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

K - Constante que depende basicamente, da relação entre o custo para bombeamento e custo linear do tubo (utilizado $K=1$).

Encontrado o diâmetro ótimo econômico, elegeu-se o diâmetro comercial mais próximo e, a partir deste diâmetro, calculou-se a perda de carga unitária do tubo comercial, utilizando-se da eq. (15), conhecida como fórmula de Darcy-Weisbach ou fórmula universal.

$$hf = f \frac{LV^2}{D_i 2g} \quad (15)$$

Em que:

hf - Perda de carga contínua de energia (mca) (1 mca = 9,8 kPa);

f - Coeficiente de atrito (adimensional);

L - Comprimento total da adutora (m);

D_i - Diâmetro interno da tubulação (m);

g - Aceleração da gravidade ($m\ s^{-2}$);

V - Velocidade do fluido ($m\ s^{-1}$).

Para a determinação do diâmetro externo do tubo, há que se considerar o fato de se utilizar, para uma mesma adutora, tubos com diferentes classes de pressão, ou seja, com diferentes espessuras de parede, gerando diferentes diâmetros externos. Esta prerrogativa se dá pela busca do custo inicial ótimo de aquisição da adutora, mas acaba gerando situações onde se podem encontrar diferentes pesos por metro dentro de uma mesma adutora.

A utilização de determinada classe de pressão dentro de uma adutora está correlacionada à pressão máxima em cada ponto. A pressão de serviço em um ponto n qualquer da adutora é dependente dos seguintes fatores: pressão de entrada no início da adutora (P_i), perda de carga do ponto inicial até o ponto n (JL_n), diferença de cota do ponto inicial até o ponto n (HL_n) e pressão final necessária (P_f), como pode ser observado na Figura 4. Na eq. (17) temos o comprimento de tubo necessário para se atingir a pressão n dentro da adutora, a partir do qual poderá ser feita a sua substituição por um tubo de outra classe de pressão. Na Tabela 3 se apresentam os tubos que foram utilizados na simulação, para a variação do consumo de material dentro da adutora.

Tabela 3 – Tubos utilizados na simulação das adutoras

Tubos	Pressão de serviço
Tubo PVC DeFoFo PN 60*	600 kPa
Tubo PVC DeFoFo PN 80*	800 kPa
Tubo PVC DeFoFo PN 125*	1250 kPa
Tubo aço galvanizado Flangeado PN10**	1000 kPa
Tubo aço galvanizado Flangeado PN16**	1600 kPa
Tubo aço galvanizado Flangeado PN25**	2500 kPa

* Série DeFoFo (diâmetro interno de ferro fundido) segundo norma NBR14311/99;

**Tubo em aço galvanizado com junção flangeada segundo normas NBR5590 e DIN1615.

Na Variação da pressão ao longo da adutora ocasionada pela perda de carga;

Variação da pressão ao longo da adutora ocasionada pela variação do nível;

Variação total da pressão ao longo da adutora ocasionada pela soma da perda de carga e desnível;

Figura 4, por meio de semelhança de triângulos, podemos extrair a relação apresentada na eq. (16).

Figura 4 – Perfil esquemático da linha piesométrica de uma adutora hipotética, com desnível H ascendente (J =perda de carga unitária $m\ m^{-1}$ e H =desnível unitário $m\ m^{-1}$)

$$\frac{L}{L_n} = \frac{P_i - P_f}{P_i - P_n} \quad (16)$$

Assim,

$$L_n = \frac{L(P_i - P_n)}{(P_i - P_f)} \quad (17)$$

Em que:

L_n - Comprimento necessário para se atingir a pressão n (m);

L - Comprimento total da adutora (m);

P_i - Pressão inicial da adutora (kPa);

P_n - Pressão n , da classe de pressão na qual se deseja fazer a troca de tubo (kPa);

P_f - Pressão no final da adutora (kPa).

Foi utilizada a eq. (17) para variar a classe dos tubos dentro de uma adutora, encontrando as correlações entre a vazão e consumo de material. Dentro de uma mesma vazão, variou-se o comprimento e/ou o desnível, até que a pressão máxima no início da adutora chegasse a máxima pressão de serviço admissível, 1250 kPa para PVC e 2500 kPa para o tubo de aço galvanizado.

Para a determinação da massa de tubo por metro linear, elaborou-se uma correlação entre esta variável, o diâmetro e a classe de pressão. Ajustou-se essas variáveis a uma superfície de resposta, para se conseguir uma equação que pudesse ser utilizada nas simulações das adutoras.

A transformação da massa de tubo em incorporação energética foi realizada por intermédio da multiplicação da massa pelos índices energéticos do PVC e do aço galvanizado, sendo estes respectivamente, 110,66 MJ kg⁻¹ e 104,70 MJ kg⁻¹, extraído de Boustead (1979). A vida útil dos tubos de PVC e aço galvanizado, considerada no trabalho foi de 20 anos, apesar de se ter referências que citam uma vida útil muito maior. Esta vida útil adotada visa corresponder à vida útil do projeto de irrigação como um todo.

3.2.5.4 Filtragem

Para a determinação do peso de material utilizado no sistema de filtragem, foi avaliado separadamente, por meio de consulta a catálogos de fabricantes de filtro de areia, o consumo de material da carcaça do filtro e o consumo de areia. Correlacionando o consumo de material dos filtros com a vazão do sistema, analogamente ao feito com o conjunto motobomba e a potência instalada. Foram considerados separadamente os materiais que compõe a carcaça do filtro e a areia, isso se fez necessário porque estes apresentam uma incorporação de energia específica muito distinta. A areia, por exemplo, é um material com índice energético muito baixo, devido a sua característica de ser um material extrativo e passar por poucas transformações.

$$E_{fil} = \frac{Q \times f_{fil} \times IE_{fil}}{Vu_{fil} \times Ai} \quad (18)$$

Em que:

E_{fil} - Energia proveniente do sistema de filtragem ($MJ\ ha^{-1}\ ano^{-1}$);

Q - Vazão do sistema ($m^3\ h^{-1}$);

f_{fil} - Fator de correlação entre massa e vazão da filtragem ($kg\ m^{-3}\ h$);

Vu_{fil} - Vida útil do sistema de filtragem (ano);

IE_{fil} - Índice energético para sistema de filtragem ($MJ\ kg^{-1}$);

Ai - Área irrigada (ha).

3.2.5.5 Equipamento de irrigação

Com relação aos equipamentos internos às áreas irrigadas, chamados aqui apenas de equipamento de irrigação, é de se esperar dois comportamentos bem distintos entre os sistemas de gotejamento e pivô central quando se pensa na correlação deste parâmetro com a área irrigada. No pivô central a variação do consumo de material em função da área sofre uma alteração muito grande, pois quando se acrescenta uma torre ao pivô, se aumenta o material linearmente e a área potencialmente de forma quadrática, resultando num consumo de material por hectare decrescente com o aumento da área irrigada.

O levantamento do consumo de material do pivô central foi obtido de informações de catálogo e diretamente com o fabricante de pivôs Irrigabras. Foi determinado separadamente o peso da torre central e da torre móvel, bem como do vão móvel e do balanço. Com o peso destes componentes foi possível a simulação de diferentes tamanhos de pivô, alterando o número de torres móveis, para se correlacionar indiretamente a variação da incorporação de energia e a área irrigada.

Para o gotejamento, foi utilizada uma base de dados composta por 12 projetos, onde se avaliou projetos de diferentes tamanhos, determinando o consumo dos diferentes materiais dentro de cada projeto. Foram avaliados 12 projetos com tamanhos variando de 5 a 215 hectares. Determinando desta forma uma correlação entre área e consumo de material e indiretamente a correlação entre a área e a incorporação de energia.

A transformação do material consumido em incorporação energética foi feita com a utilização dos índices energéticos dos diferentes materiais envolvidos, como PVC, polietileno, ferro fundido e aço galvanizado (Anexo D).

3.2.6 Energia de saída

Existem diferentes maneiras de se considerar a energia de saída (ES) de um sistema. No caso de culturas destinadas à produção energética, pode se considerar o quanto de energia vai ser gerada com a transformação da produção em energia. Por exemplo, quantos megajoules serão gerados com o biodiesel gerado com o óleo de pinhão-manso ou com o álcool da cana de açúcar. O que não se pode esquecer nestas considerações é a potencialidade de energia oriunda de subprodutos e ou resíduos. A cana de açúcar é um grande exemplo de aproveitamento deste potencial, o bagaço que muito tempo foi considerado somente um resíduo, hoje em dia é tido como fonte de energia tanto para a própria usina quanto para a venda de energia para o sistema. Esta energia, portanto, não pode ser desconsiderada no balanço energético da cultura.

A cultura do pinhão-manso, também apresenta seus resíduos, como a torta que na maioria das vezes é utilizada somente como fertilizante, já que sua utilização na ração animal ainda é muito questionada devido a problemas de toxicidade. A casca do fruto, por sua vez, possui uma potencialidade para utilização como combustível por meio da queima.

Quando se trata de um fruto como é o caso da soja ou do pinhão-manso, uma possibilidade de avaliação é a determinação do valor energético do material em diferentes situações, seja ela pré-processada ou na situação de colheita (fruto fresco). Openshaw (2000) determinou o valor energético do fruto inteiro de pinhão-manso (com casca e com 8% de umidade) como sendo $21,2 \text{ MJ kg}^{-1}$, e para o fruto fresco, com 43% de umidade, o valor de $12,8 \text{ MJ kg}^{-1}$. Será considerada também a possibilidade de aproveitamento dos resíduos, com o aumento de 10% na produção de energia (GUNASEELAN, 2009).

Os dados fornecidos pelas propriedades parceiras da empresa de biocombustíveis (Tabela 2) não continham a informação da produtividade da cultura, não sendo possível, portanto, a determinação da energia de saída real das propriedades. O que será determinado é a produtividade mínima necessária para se iniciar a viabilidade energética da cultura, e também, o aumento necessário na produtividade para a viabilidade energética com a introdução da irrigação no sistema de produção.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Incorporação de energia do sistema de produção

A incorporação de energia no sistema de produção foi diferenciada em: consumo direto de combustível pelos tratores e roçadoras costais mecanizadas; mão de obra utilizada nas operações, seja na capina manual ou na operação dos tratores e outras máquinas; Insumos, ou transformado cada insumo utilizado em função do seu índice de incorporação de energia; e depreciação de máquinas e implementos.

Por ser uma cultura perene, que apresenta ciclos de produção definidos (Figura 2), é necessária a separação do primeiro ano, uma vez que este se diferencia dos demais pela maior necessidade de operações como limpeza da área, preparo das covas, plantio e controle mais rigoroso de daninhas, pragas e doenças. Na Tabela 4 podemos observar o total de energia incorporada ao sistema no primeiro ano de cultivo. Na média das seis propriedades obteve-se uma incorporação de $19.820,46 \text{ MJ ha}^{-1}$ (ou $19,8 \text{ GJ ha}^{-1}$), com um desvio padrão de $3430,16 \text{ MJ}$.

Para a inclusão do ano de implantação na análise de toda a vida útil do sistema de produção, podemos considerar que este valor médio se diluirá ao longo dos 20 anos, resultando por tanto, num acréscimo médio de $978,47 \text{ MJ ha}^{-1}$ em cada ano de produção subsequente.

A propriedade um foi a que apresentou menor incorporação na implantação da cultura e a que apresentou a maior incorporação de energia foi a cinco. Essas duas áreas apresentam uma característica comum, que é o uso intensivo de máquinas e implementos.

Tabela 4 – Distribuição da energia de entrada no ano de implantação da cultura, nas seis propriedades avaliadas

Propriedade	Energia de entrada (MJ ha ⁻¹)
1	15677,00
2	17535,70
3	22673,54
4	18499,36
5	24967,61
6	19569,45
Média	19820,46
Desvio padrão	3430,16

Na Figura 5 podemos observar que a propriedade cinco se diferenciou das demais, principalmente no consumo direto de combustíveis. Porém, a propriedade um, que também faz uso intensivo de tratores, não apresentou um consumo de combustível tão elevado, isto ocorreu devido ao plantio que foi realizado em uma área onde já se cultivava anteriormente, não sendo necessário, portanto, as operações de preparo de solo, como subsolagem, aração e gradagem. Este preparo de solo, por outro lado, foi realizado na área cinco.

Outra observação a respeito da energia de entrada no ano da implantação é a participação expressiva dos insumos. Sendo o item de maior influência em todas as áreas. Neste primeiro ano, os insumos mais utilizados foram a adubação para a correção do solo e os inseticidas para controle de pragas como formigas e cupins. Na média, para as seis propriedades avaliadas, os insumos responderam por mais de 65% da entrada de energia no sistema, seguido pelo consumo de combustíveis, mão de obra e depreciação de máquinas e implementos (Figura 6).

Figura 5 – Diferentes fontes de entrada de energia no ano de implantação da cultura para as seis diferentes propriedades

Figura 6 – Distribuição percentual média da entrada de energia no sistema, no ano de implantação

A partir do segundo ano, os dados se referem apenas as propriedades de um a cinco (Tabela 2), e somente três das cinco áreas (1, 3 e 5) tinham quatro anos de cultivo, as outras (2 e 4) se restringiram a três anos, pois iniciaram suas atividades um ano mais tarde.

Na Tabela 5 podemos observar que existe uma variação considerável, quando se compara a incorporação de energia dentro de uma mesma propriedade

ao longo dos anos e também quando se compara a variação dentro do mesmo ano, nas diferentes áreas. A propriedade um é a que apresenta a menor média, seguida pelas áreas dois, cinco, quatro e três. A área três, no terceiro ano de produção apresentou o maior valor de energia de entrada, fazendo com que o desvio padrão deste ano aumentasse consideravelmente. Esse aumento foi ocasionado pelo uso de adubações nitrogenadas feitas com ureia, que apresenta o maior índice de incorporação de energia dentre os fertilizantes, $78,04 \text{ MJ kg}^{-1}$ (ULBANERE, 1988). Esta propriedade sempre se apresentou acima das demais no quesito insumos, como pode ser observado na Figura 7.

Tabela 5 – Energia de entrada (MJ ha^{-1}) nos anos de produção e média por propriedade e ano de avaliação

Propriedade	Ano de produção			Média
	1º	2º	3º	
1	11621,00	11305,56	14785,49	12570,68
2	16361,42	16611,72	*	16486,57
3	21555,20	19841,56	28040,42	23145,73
4	25591,83	16278,23	*	20935,03
5	23734,96	18137,27	13379,73	18417,32
Média por ano	19772,88	16434,87	18735,21	
Desvio padrão	5718,96	3196,46	8089,14	4078,95

* Áreas que ainda não chegaram ao terceiro ano de produção

Figura 7 – Distribuição da energia de entrada ao longo do ciclo de produção para as cinco propriedades

Com relação à incorporação de energia proveniente do uso direto de combustíveis, pode-se observar pela Figura 8, que a partir do primeiro ano de produção, existe uma clara diferenciação das propriedades dois e três com relação as demais. Este fato está correlacionado a opção ou mesmo da necessidade destas propriedades, em se conduzir a cultura sem a utilização expressiva de máquinas, o que resulta também na baixa participação da incorporação proveniente da depreciação destas máquinas e implementos (Figura 9 e Figura 11).

Com a redução na utilização de máquinas no sistema de produção agrícola, existe um aumento da utilização de mão de obra nestas áreas (Figura 10). Porém, como o índice de incorporação de energia da mão de obra é pequeno, $2,2 \text{ MJ h}^{-1}$ trabalhada (SERRA, 1984), esse aumento não se torna tão evidente na totalização de energia incorporada. Os valores da participação da mão de obra no total de energia variaram de 1,55 a 3,57% (Figura 11). Oliveira et al. (2008), trabalhando com culturas oleaginosas no estado de São Paulo, também encontraram pouca influência da mão de obra no computo final da incorporação de energia, variando de 0,1 a 0,3 % do total.

Figura 8 – Distribuição da incorporação de energia proveniente do consumo direto de combustíveis no ano da implantação e ao longo dos anos de produção para as cinco propriedades

Figura 9 – Distribuição da incorporação de energia proveniente da depreciação de máquinas e implementos no ano da implantação e ao longo dos anos de produção para as cinco propriedades

Figura 10 – Distribuição da incorporação de energia proveniente da utilização de mão de obra no ano da implantação e ao longo dos anos de produção para as cinco propriedades

Utilizando-se da energia média incorporada no processo de implantação, mais a média dos anos de produção avaliados, chegamos a uma incorporação de energia do sistema de produção na condição de sequeiro de 19289,54 MJ ha⁻¹ ano⁻¹ (ou 19,29 GJ ha⁻¹ ano⁻¹). Estes valores estão acima dos encontrados por Salla et al. (2010) que trabalhou com a cultura da mandioca, encontrando 6401,3 MJ ha⁻¹ ano⁻¹ e abaixo do encontrado por Romero et al. (2006) que trabalhou com a cultura do algodão, que é conhecidamente exigente em insumos, e chegou a 37138,59 MJ ha⁻¹

ano⁻¹. Oliveira et al. (2008) avaliando oleaginosas cultivadas em plantio direto no estado de São Paulo, encontrou valores de 15408, 12515 e 8096 MJ ha⁻¹ ano⁻¹ respectivamente para as culturas do milho, girassol e soja. Pimentel (2009), comparando a produção de milho na Indonésia e nos Estados Unidos, encontrou os respectivos valores de incorporação de energia 17031 e 29527 MJ ha⁻¹ ano⁻¹, mostrando a influência do aumento do consumo de insumos no sistema de produção de países mais desenvolvidos. Mrini et al. (2001) comparando a energia envolvida no sistema da beterraba açucareira e cana de açúcar, encontrou valores de incorporação de 33790 MJ ha⁻¹ ano⁻¹ para a beterraba e 59330 MJ ha⁻¹ ano⁻¹ e 35650 MJ ha⁻¹ ano⁻¹ respectivamente para a cana de primeiro ano e para a primeira soca.

Figura 11 – Distribuição percentual da incorporação de energética média dos anos de produção para as áreas um a cinco

4.2 Incorporação de energia dos sistemas de irrigação

A elaboração de um índice energético para um determinado equipamento ou sistema, nada mais é do que um inventário do fluxo de material incorporado na sua fabricação. Como já apresentado, para possibilitar uma maior flexibilidade de utilização dos valores encontrados, optou-se pela divisão do sistema em partes.

Primeiramente encontrou-se um índice para o sistema de bombeamento, e em seguida para a adutora, que são componentes comuns a todos os sistemas e têm suas peculiaridades. A adutora considerada poderá ser tanto em PVC quanto em aço carbono, e o seu índice será expresso em energia por comprimento e tempo ($\text{MJ m}^{-1} \text{ano}^{-1}$), em função da vazão transportada. A parte interna da área irrigada, chamada aqui de parcela de irrigação foi considerado como sendo toda área que se encontra após o início da área irrigada para o sistema de gotejamento e após o ponto central para o sistema de pivô e seu índice será expresso em $\text{MJ ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$.

Para o sistema de gotejamento, também se encontrou um índice para a filtragem, que neste estudo foi considerado como sendo feita por filtro de areia. Sua unidade será a mesma que a da adutora.

4.2.1 Bombeamento

Na Figura 12 temos a correlação entre a incorporação de energia oriunda do sistema de bombeamento em função da potência do conjunto motobomba (kW). Foi considerado a vida útil de 20 anos para o sistema de bombeamento, por ser esta também a vida útil considerada para o sistema de irrigação. Diferentemente da análise econômica, não se considera nenhum valor residual ao final da vida útil. Com esta informação podemos determinar facilmente qual será a contribuição do conjunto de bombeamento na incorporação total do sistema por meio de parâmetros básicos do projeto como lâmina de irrigação e desnível total a ser vencido pelo sistema motobomba.

Os dados referentes à massa e potência necessários para a correlação foram extraídos dos catálogos dos fabricantes, Grundfos, KSB e Thebe. O índice de energia utilizado para o conjunto motobomba foi o de 84 MJ kg^{-1} , extraído de Batty et al. (1975).

Figura 12 – Correlação entre a incorporação de energia oriunda do sistema de bombeamento e a potência do conjunto motobomba

Podemos considerar que o sistema de bombeamento, promove uma incorporação de energia, independente da intensidade do uso da irrigação, de 7,62 MJ ano⁻¹ para cada unidade de potência instalada (eq. 19). Se considerarmos um valor médio de potência instalada por hectare irrigado, podemos transformar o valor encontrado e deixa-lo em função da área, ou seja, MJ ha⁻¹ ano⁻¹. Essa aproximação pode ser interessante na hora de concluirmos um índice final de incorporação da irrigação.

$$E_B = 7,62 \times P \quad (19)$$

Em que:

E_B – Energia Incorporada pelo sistema de bombeamento (MJ ano⁻¹);

P - Potência instalada (kW).

4.2.2 Adutora

Nas Figura 13 e Figura 14, podem-se observar as superfícies de resposta obtida da correlação entre a massa de tubo por metro (W) em função do diâmetro nominal (D) e da classe de pressão (CP). Estas superfícies podem ser descritas pelas eq. (20) e (21), que facilita o trabalho de obtenção da massa de tubo por metro

de adutora. Conforme apresentado na Tabela 3, foram utilizados somente tubos de PVC da linha comercialmente conhecida como DeFoFo (diâmetro externo de ferro fundido) e tubos de aço galvanizado com conexão via flange. Estes dois tipos de materiais foram escolhidos por representarem uma grande parte das adutoras instaladas para irrigação.

Figura 13 – Superfície de resposta que correlaciona a massa de tubo de PVC por metro (w) em função do diâmetro nominal (D) e da classe de pressão (CP)

Figura 14 – Superfície de resposta que correlaciona a massa de tubo de aço galvanizado por metro (w) em função do diâmetro nominal (D) e da classe de pressão (CP)

$$W_{pvc} = e^{\{-8,714+[1,911 \times \ln(D_n)]+4,53E-7 \times CP^2\}} \quad (20)$$

$$W_{aço} = e^{\left\{0,3423+\left[0,121 \times (\ln D_n)^2\right]-\left(\frac{99,806}{CP}\right)\right\}} \quad (21)$$

Em que:

w_{pvc} - Massa de tubo em PVC ($kg\ m^{-1}$);

$w_{aço}$ - Massa de tubo em aço galvanizado ($kg\ m^{-1}$);

D_n - Diâmetro nominal do tubo (mm);

CP - Classe de pressão, kPa (Tabela 3).

Com a variação do comprimento e/ou desnível da adutora, encontraram-se valores mínimos, máximos e médios de incorporação energética por metro de adutora, em função da vazão transportada. Na Figura 15 pode-se observar a correlação entre a vazão e a incorporação média de energia proveniente do material da adutora. Os degraus no gráfico são causados pela mudança de um diâmetro nominal para outro, uma vez que comercialmente não possuímos uma gama de diâmetros muito variada. Vale salientar que a incorporação está apresentada por metro de adutora, deixando como variáveis independentes o comprimento e a vazão. Encontraram-se como valor médio de incorporação de energia as equações (22) e (23), que são resultado de uma regressão linear válida para o intervalo de vazão [10;400], cuja análise estatística revelou significativa ($p < 0,01$).

Figura 15 – Correlação entre incorporação de energia por metro de adutora em função da vazão transportada

$$E_{ADPVC} = (0,2065 \times Q + 3,8094) \times L \quad (22)$$

$$E_{ADAÇO} = (0,7242 \times Q + 54,642) \times L \quad (23)$$

Em que:

E_{ADPVC} – Energia Incorporada pela adutora em PVC (MJ ano⁻¹);

$E_{ADAÇO}$ – Energia Incorporada pela adutora em aço galvanizado (MJ ano⁻¹);

Q – Vazão da adutora (m³ h⁻¹);

L – Comprimento da adutora (m).

As equações (22) e (23) representam a incorporação apenas oriunda do material envolvido; não está inclusa a instalação, ou seja, a abertura e fechamento de valetas e a montagem da adutora. Essa entrada de energia, proveniente da instalação, deve ser calculada individualmente, pois existe uma grande variação nas máquinas passíveis de serem utilizadas, como retroescavadeiras e valetadeiras, além de haver grande influência do solo onde vai ser executada a instalação.

Pode-se observar que a incorporação de energia quando se utiliza PVC é muito menor que quando se utiliza aço galvanizado. Porém, devemos considerar que, com a utilização do aço galvanizado permite-se trabalhar com maiores

pressões, chegando a 2500 kPa para os tubos utilizados neste estudo. Uma alternativa para a redução da incorporação de energia na adutora é a construção de adutoras mistas, utilizando-se aço para os trechos de maiores pressões e PVC para os trechos com pressões abaixo de 1250 kPa.

4.2.3 Filtragem

Se o sistema em questão exigir filtragem, pode-se considerar como incorporação de energia referente ao sistema de filtragem os valores apresentados na Figura 16. Onde está correlacionada a incorporação de energia dos filtros, em função da vazão a ser filtrada. Os dados utilizados na elaboração da correlação foram obtidos juntamente aos catálogos de filtros da empresa Amiad, e na eq.(24) podemos observar o coeficiente de correlação entre a vazão e a incorporação anual de energia.

Figura 16 – Incorporação de energia do sistema de filtragem em função da vazão

$$E_{FILT} = 16,94 \times Q \quad (24)$$

Em que:

E_{FILT} - Energia incorporada pelo sistema de filtro de areia, (MJ ano⁻¹);

Q - Vazão do sistema (m³ h⁻¹).

4.2.4 Equipamentos de irrigação

Para as parcela de irrigação podemos observar dois comportamentos bem distintos entre os sistemas de gotejamento e pivô central. Para o levantamento do consumo de material da área irrigada por gotejamento foram analisados 12 projetos com diferentes áreas irrigadas Tabela 6. Como os projetos continham diferentes tipos de tubo gotejador, com diferentes vazões e espaçamentos, optou-se pela padronização dos mesmos, deixando todos com tubo gotejador autocompensante de parede de 0,65 mm de espessura. O espaçamento entre gotejadores considerado foi o de 0,75m e o espaçamento entre linhas foi o de 4 m, resultando no consumo de 2500 m de tubo gotejador por hectare, equivalente a uma incorporação de energia de 1723,92 MJ ha⁻¹. Foi considerado para fins de levantamento de peso de material um tubo gotejador com diâmetros de 15,9 e 14,4 mm externo e interno, respectivamente. Esse tipo de tubo gotejador, com esta espessura de parede vem sendo utilizado em grandes áreas de gotejamento, principalmente em culturas arbóreas perenes, como o citrus, por exemplo.

Na Figura 17 podemos observar que praticamente não ocorre variação da incorporação de energia em função da área quando fixado o mesmo tipo de gotejador e espaçamento entre linhas que atende a cultura do pinhão-manso. A incorporação de energia em função da área foi em média 1886 MJ ha⁻¹ ano⁻¹, com desvio padrão de 22,77 MJ ha⁻¹ ano⁻¹.

A pequena variação em função da área pode ser explicada pela maior contribuição do tubo gotejador na incorporação de energia. Em média, quando utilizamos tubo gotejador com parede de 0,65 mm, apenas 9,4% da incorporação de energia é proveniente das partes como terciárias, cavaletes com válvulas e outras conexões. Também vale salientar, que o índice do tubo gotejador em polietileno linear de baixa densidade utilizado nestas análises foi de 21,46 MJ kg⁻¹ ano⁻¹, enquanto que para o tubo de PVC, material da maioria das terciárias foi de apenas 5,53 MJ kg⁻¹ ano⁻¹.

Como a incorporação de energia está diretamente correlacionada com a incorporação de material, analisou-se qual seria a influência da troca do tubo gotejador com parede de 0,65 mm por outro com parede 1,0 mm e da utilização de outros espaçamentos entre linhas de plantio. Para possibilitar a simulação da variação do consumo de material com a troca do espaçamento entre linhas,

manteve-se fixo o consumo de material referente à terciária, válvulas e outras conexões. Na Figura 18 podemos observar o comportamento da incorporação de energia oriunda do material da irrigação por gotejamento, quando alteramos o espaçamento entre linhas de gotejamento e a espessura de parede do tubo gotejador (25).

Tabela 6 – Incorporação de energia proveniente das terciárias, válvulas e conexões para os 12 projetos analisados

Projeto	Área (ha)	Incorporação*: terciárias, válvulas e conexões (MJ ha ⁻¹)	Total** (MJ ha ⁻¹)
1	5,00	149,60	1873,52
2	6,30	156,39	1880,31
3	10,00	199,86	1923,78
4	16,90	132,09	1856,01
5	26,50	131,11	1855,03
6	28,00	164,65	1888,57
7	33,00	186,34	1910,26
8	38,00	192,98	1916,89
9	38,34	147,38	1871,30
10	47,20	175,85	1899,77
11	94,00	164,62	1888,54
12	215,00	145,69	1869,61
		Média	1886,13
		Desvio padrão	22,77

* considerando o espaçamento de 4 metros entre linhas e espessura de parede de 0,65mm;

** considerando a incorporação de 1723,92 MJ ha⁻¹ proveniente do tubo gotejador.

Figura 17 – Incorporação de energia da parcela de irrigação por gotejamento em função da área para a condição de 4 m de espaçamento entre linhas e 0,65 mm de espessura de parede de tubo gotejador

Figura 18 – Incorporação de energia do sistema de cotejamento para diferentes espaçamentos entre linhas do tubo gotejador

$$E_{INTGOT} = (9042,5 \times E) \times S^{-0.94} \quad (25)$$

Em que:

E_{INTGOT} - Energia incorporada pelo material interno do gotejamento (MJ ha⁻¹ ano⁻¹);

E - Espessura da parede do tubo gotejador (mm);

S - Espaçamento entre linhas de gotejador (m).

Diferentemente do que ocorreu com o gotejamento, o sistema de irrigação por pivô central, apresentou uma grande influência da área irrigada na incorporação de energia pelo sistema (Figura 19). Foram dimensionados cinco diferentes pivôs, variando o número de torres móveis em 3, 5, 7, 10 e 12, obtendo uma variação de área de 8,66 a 110,66 ha. Para a obtenção da massa envolvida em cada torre e em cada lance do pivô, foram utilizadas informações fornecidas por uma empresa fabricante de pivô (Irrigabras Irrigação do Brasil Ltda). A correlação entre a incorporação de energia e a área irrigada pode ser observada na Figura 19, onde se tem o resultado do aumento de área exponencial que se obtém com o aumento de linear do material de uma torre.

Outra possibilidade também avaliada foi a variação da demanda de irrigação, ou seja, a capacidade de aplicação de determinada lâmina pelo pivô central. Para visualizar a influência deste parâmetro na incorporação de material, repetiu-se as simulações dos cinco diferentes pivôs para as demandas de 4 e 6 mm. Podemos observar que o aumento da capacidade de aplicação do pivô provocou pouca alteração na incorporação de material e consequentemente na incorporação de energia. Porém, vale salientar que nos pivôs maiores, com a demanda de 6 mm, a velocidade máxima na lateral ficou bem acima da recomendada, mesmo utilizando-se de tubo de 8" na lateral. Não se utilizou de diâmetros maiores porque estes não são comercialmente utilizados pela empresa fornecedora dos dados, não sendo possível no entanto, a obtenção de dados confiáveis, para a sua inclusão na simulações.

Figura 19 – Incorporação de energia da parcela de irrigação por pivô central em função da área

Com os dados obtidos, considerando todas as correlações encontradas podemos formular a incorporação de energia dos sistemas de gotejamento e de pivô central de acordo com as eq. (26) e (27).

$$E_{\text{GOT}} = \left[(9042,5 \times E) \times S^{-0,94} \right] + \left\{ \frac{[E_{\text{FILT}} + E_{\text{AD}} + (7,62 \times P)]}{A_i} \right\} \quad (26)$$

$$E_{\text{PIVO}} = (10318 \times A^{-0,53}) + \left\{ \frac{[E_{\text{AD}} + (7,62 \times P)]}{A_i} \right\} \quad (27)$$

Em que:

E_{GOT} - Energia incorporada pelo sistema de gotejamento ($\text{MJ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$);

E_{PIVO} - Energia incorporada pelo sistema de pivô central ($\text{MJ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$);

E - Espessura da parede do tubo gotejador (mm);

S - Espaçamento entre linhas de gotejador (m).

P - potência do conjunto motobomba (kW);

A_i - Área irrigada (ha);

E_{FILT} - Energia incorporada pelo sistema de filtro (MJ ano^{-1}), calculado pela eq. (24);

E_{AD} - Energia incorporada pela adutora (MJ ano^{-1}), calculado pela eq. (22) e (23) respectivamente para adutora em PVC e Aço galvanizado.

Para efeito de comparação entre os sistemas e possibilidade de realização de um balanço de energia, será considerado o pivô central da área 6, localizado na área experimental do departamento de Engenharia de Biossistemas – SALQ/USP, como fonte de informação para uma simulação. Também será simulada a substituição da irrigação via pivô central pela irrigação via gotejamento, na mesma área, no espaçamento de 4 m entre linhas e utilizando-se de gotejador com parede de 0,65 mm.

As informações utilizadas nesta simulação foram as seguintes:

- Área irrigada: 10 ha;
- Comprimento de adutora em PVC: 260 m;
- Vazão do sistema: $30 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$;
- Acionamento do sistema via energia elétrica;
- Potencia instalada para o pivô central: 14,7 kW;
- Potencia instalada para o gotejamento: 11,3 kW.

A utilização desses dados na eq. (22) determinou a incorporação de 2601,14 MJ ano^{-1} proveniente da adutora. A incorporação vinda do sistema de filtragem do gotejamento (Figura 16) foi de 508,20 MJ ano^{-1} . Com a eq. (26) e (27) é possível encontrar os valores finais de incorporação de energia vindas dos sistemas de gotejamento e pivô central, sendo eles respectivamente 1886,13 e 3316,37 $\text{MJ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Os valores encontrados para o pivô central (3316,37 $\text{MJ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) estão acima dos valores apresentados por Batty et al. (1975) que foi o de 1077 $\text{MJ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Por outro lado, os valores encontrados para gotejamento (1886,13 $\text{MJ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) estão abaixo dos apresentados por este mesmo autor, 4215 $\text{MJ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Esse trabalho foi utilizado por Pimentel (1980), e vem sendo o mais citado como índice de incorporação de energia para sistemas de irrigação.

As diferenças encontradas no sistema de irrigação via pivô central pode ser explicada pelo tamanho do pivô utilizado por Batty et al. (1975) que foi de 50,6 ha. Como podemos observar na Figura 19, o aumento na área irrigada proporciona uma redução significativa na incorporação de energia por unidade de área.

Quanto ao gotejamento, a diferença entre os resultados pode ser explicada, em partes, pela utilização neste atual trabalho, de um tubo gotejador com parede

mais fina, diminuindo significativamente a quantidade de polietileno do projeto, e também pela distância entre as linhas de gotejador que neste trabalho foi de 4 metros e no trabalho apresentado por Batty et al. (1975) foi de 1,5m. Na Figura 18 podemos observar que tanto a distância entre linhas quanto a espessura influenciam significativamente na quantidade de material incorporado no projeto de gotejamento.

4.2.5 Consumo de energia direta pelo sistema de irrigação

Como somente a área 6 era irrigada, e as demais propriedades utilizadas para realização do levantamento de dados do sistema de produção não possuíam irrigação, será considerado os dados levantados no primeiro ano de cultivo da área 6, e também informações de literatura para uma estimativa de consumo hídrico da cultura do pinhão-manso, e assim complementar a incorporação de energia para os 10 ha irrigados calculado no item anterior.

Para se estimar a necessidade de irrigação da área 6, foi realizado um balanço hídrico climatológico na escala diária, de acordo com metodologia apresentada por Pereira, Villa Nova e Sedyama (1997) para controle da irrigação. Foram analisados dados diários de 1970 a 2009, obtidos do banco de dados do Departamento de Engenharia de Biosistemas, ESALQ/USP. Na Figura 20 encontram-se os resultados obtidos da evapotranspiração potencial da cultura (ET_c), e a necessidade de irrigação para que esta evapotranspiração seja alcançada.

A evapotranspiração potencial de referência (ETP) foi estimada pelo método de Thornthwaite e a transformação da ETP em ET_c foi com o uso do coeficiente de cultivo (K_c) apresentado na Tabela 7. Para a determinação do K_c foram utilizados dados coletados na área 6 (dados ainda não publicados) e informações de trabalhos como os de Fact (2010), Yamada (2011) e Rao et al. (2012). Na Tabela 7 podemos observar que o K_c para o primeiro ano (implantação) pode ser menor que para os anos subsequentes (produção), porém para efeito de cálculo de consumo hídrico, será considerado apenas os valores referentes ao ano de produção. Um aspecto interessante do comportamento do K_c durante o ano é a sua expressiva redução nos meses de inverno, fato este ocasionado pela queda total das folhas nesta época do ano.

A capacidade de água disponível (CAD) foi determinada com os valores de umidade no ponto de murcha permanente e na capacidade de campo, extraídos de

Flumignan (2011), que fez o levantamento na mesma área de estudo, encontrando os valores médios, 38% na capacidade de campo e 33% no ponto de murcha permanente.

A profundidade efetiva do sistema radicular considerado foi de 50 cm, baseado principalmente do trabalho de Krishnamurthy et al. (2012), que apresenta que o sistema é capaz de atingir profundidades maiores que 1 metro, porém, apresenta a maioria das raízes, principalmente as responsáveis pela absorção de água, nas camadas mais superficiais.

Tabela 7 – Coeficiente de cultivo (Kc) utilizados no balanço hídrico para os anos de produção da cultura do pinhão-manso

Mês	Coeficiente de cultivo (Kc)	
	Implantação*	Produção
Jan	0,30	1,00
Fev	0,50	1,00
Mar	0,70	1,00
Abr	0,70	1,00
Mai	0,70	1,00
Jun	0,55	0,70
Jul	0,40	0,40
Ago	0,40	0,40
Set	0,70	0,70
Out	0,80	1,00
Nov	1,00	1,00
Dez	1,00	1,00

* Valores obtidos na área de estudo, ainda não publicados

O valor médio de evapotranspiração potencial da cultura, durante os 40 anos avaliados foi de 1010 mm. Rao et al. (2012) avaliando o consumo hídrico do pinhão-manso em uma região semiárida, onde a demanda atmosférica é maior que a encontrada em Piracicaba-SP, encontrou valores de 1400 mm por ano. Fact (2010) apresenta como consumo da cultura, valores variando entre 1000 a 1500 mm por ano. A necessidade média de irrigação para se manter esta evapotranspiração ao longo dos 40 anos avaliados foi de 546 mm por ano, o que equivale ao funcionamento da irrigação por 1820 horas anuais.

Utilizando-se da eq. (9), do número médio de horas anuais de irrigação necessária e do fator de incorporação de energia contido na energia elétrica de 11,80 MJ kW⁻¹h⁻¹ (PIMENTEL, 1980), chegamos a incorporação de 24078,09 e

32104,12 MJ ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente para os 10 ha irrigados por gotejamento e por pivô central. Se compararmos a incorporação vinda dos equipamentos de irrigação com a incorporação gerada pelo consumo direto de eletricidade pelo sistema, encontramos que a segunda é 9,7 vezes maior para o sistema de pivô central e 8,7 maior para o sistema de gotejamento. Tal resultado indica a importância de trabalhos voltados para a economia de energia elétrica dos sistemas de irrigação, seja pela troca de emissores que trabalhem com menor pressão ou pela utilização de dispositivos como variadores de frequência, que ajustam a potência da bomba à necessidade em cada ponto de operação.

Figura 20 – Evapotranspiração potencial da cultura e necessidade de irrigação para os anos de 1970 a 2009

4.3 Balanço de energia

4.3.1 Energia de entrada

Como fonte de entrada de energia no sistema de produção de pinhão-mansão, temos a parte da cultura, ou seja, os tratos culturais e manutenção da planta no campo, e a irrigação, caso a área seja irrigada. A incorporação de energia da irrigação pode ser via o material da irrigação e incorporação direta via o consumo de energia para pressurização do sistema.

Na Tabela 8 e Tabela 9 podemos observar os resultados encontrados para a simulação feita para os 10 ha irrigados com pivô central e com gotejamento, de

acordo com as características apresentadas anteriormente. A participação da irrigação na incorporação de energia no sistema de produção, pinhão-mansão irrigado, foi muito expressiva. Considerando-se a incorporação vinda do material mais a incorporação vinda do consumo direto de energia pela irrigação, os valores variarão entre aproximadamente 65% na área irrigada por pivô central a 58% na área irrigada por gotejamento. Esses valores estão acima dos encontrados por Frigo et al. (2008) que foi de 53%, porém, este trabalhou com apenas um ano de cultivo de pinhão-mansão. Goering e Daugherty (1982), avaliando o balanço de energia de 11 diferentes plantas produtoras de óleo nos Estados Unidos, encontrou valores que ficaram entre 50 a 75% da incorporação de energia proveniente da irrigação.

Tabela 8 – Distribuição das entradas de energia no sistema de produção de pinhão-mansão irrigado via pivô central

Fonte de entrada de energia	MJ ha ⁻¹ ano ⁻¹	%
Material do sistema de irrigação*	3316,37	6,06%
Consumo direto de energia elétrica	32104,12	58,68%
Tratos culturais e manutenção	19289,54	35,26%
Total	54710,03	100,00%

* Considerando 10 ha e outras variáveis apresentadas na simulação;

Tabela 9 – Distribuição das entradas de energia no sistema de produção de pinhão-mansão irrigado via gotejamento

Fonte de entrada de energia	MJ ha ⁻¹ ano	%
Material do sistema de irrigação*	2205,47	4,84%
Consumo direto de energia elétrica	24078,09	52,83%
Tratos culturais e manutenção	19289,54	42,33%
Total	46109,85	100,00%

* Considerando 10 ha e outras variáveis apresentadas na simulação;

Quando comparamos os dois sistemas de produção de pinhão-mansão, irrigado com pivô central e gotejamento, com relação ao total de energia incorporada, podemos observar que o pivô central foi ligeiramente superior, porém estes resultados poderiam ser diferentes se a área irrigada fosse maior, pois, como já apresentado, a incorporação proveniente do material do sistema de irrigação, decresce com o aumento da área irrigada. Outra observação a ser feita é com relação à potência instalada que foi maior no sistema de pivô central que no gotejamento, influenciando diretamente no consumo direto de energia elétrica.

4.3.2 Energia de saída

Como as propriedades avaliadas, não disponibilizaram as produções obtidas, optou por calcular qual seria a produtividade mínima da cultura do pinhão-manso, a partir da qual se inicia a sua viabilidade energética, ou seja, a produtividade que proporcione uma energia de saída igual a de entrada.

Utilizando-se dos valores de índice de incorporação de energia de 12,8 MJ kg⁻¹ de fruto fresco recém colhido (43% umidade), encontramos como produtividade mínima para se iniciar a viabilidade energética os valores de 4,27 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ no sistema com pivô central e 3,56 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ no sistema com gotejamento. Estas produtividades são consideradas plausíveis de serem conseguidas, e até mesmo ultrapassadas. Lapola et al. (2009), Kibazohi e Sangwan (2011) e Fact (2010) apresentam de 8 e 10 Mg ha⁻¹ como valores de alta produtividade para a cultura, desde que sejam sanados os problemas de fertilidade e restrição hídrica.

Estes patamares de produtividades para viabilidade energética ainda podem ser diminuídos se utilizarmos os resíduos. Gunaseelan (2009) apresenta em seu trabalho um aumento de até 10% na energia de saída quando se utilizou os resíduos para a cogeração de energia. Tomando este acréscimo como parâmetro podemos reduzir as produtividade mínimas para 3,88 e 3,24 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para o sistema irrigado com pivô central e gotejamento respectivamente.

Muitas áreas, porém, são conduzidas sem irrigação, e para estas áreas, a produtividade mínima que inicia a viabilidade energética da cultura se reduz a 1,5 e 1,37 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente sem e com o aproveitamento dos resíduos. Wang *et al.* (2011) encontrou a produção de 0,8 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ como ponto de equilíbrio da viabilidade energética do pinhão-manso na China. Porém, esses autores consideraram um valor energético do produto de saída, maior que o considerado no presente trabalho.

5 CONCLUSÕES

A análise de energia do sistema de produção da cultura do pinhão-manso revelou que na condição de sequeiro, ou seja, sem irrigação, os insumos utilizados foi a maior fonte de incorporação de energia no sistema, seguido do consumo direto de combustível. A produtividade necessária para se iniciar a viabilidade energética da cultura neste sistema foi de $1,5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ sem considerar o aproveitamento dos resíduos e $1,3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ se estes forem aproveitados.

Para a condição de sistema irrigado, considerando-se a área de 10 ha na região de Piracicaba-SP, o ponto de equilíbrio da viabilidade energética foi de 4,27 e $3,60 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ respectivamente, para irrigação via pivô central e gotejamento, sem o aproveitamento dos resíduos na cogeração de energia. Se considerarmos os resíduos, as produtividades necessárias se reduzem para 3,88 e $3,27 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Os índices de incorporação de energia desenvolvidos para os sistemas de irrigação se mostraram eficientes na inclusão da área e componentes como comprimento da adutora. Conseguindo demonstrar a influência destes fatores na incorporação de energia final dos sistemas via pivô central e gotejamento. Podendo servir de apoio na elaboração do balanço de energia de outras culturas irrigadas.

REFERÊNCIAS

ABOU KHEIRA, A.A.; ATTA, N.M.M. Response of *Jatropha curcas* L. to water deficits: yield, water use efficiency and oilseed characteristics. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 33, n. 10, p. 1343-1350, 2009.

ACHTEN, W.M.J.; VERCHOT, L.; FRANKEN, Y.J.; MATHIJS, E.; SINGH, V.P.; AERTS, R.; MUYS, B. *Jatropha* bio-diesel production and use. **Biomass & Bioenergy**, Oxford, v. 32, n. 12, p. 1063-1084, 2008.

ACHTEN, W.M.J.; MAES, W.H.; REUBENS, B.; MATHIJS, E.; SINGH, V.P.; VERCHOT, L.; MUYS, B. Biomass production and allocation in *Jatropha curcas* L. seedlings under different levels of drought stress. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 34, n. 5, p. 667-676, 2010.

ARCOVERDE, G.B.; RODRIGUES, B.M.; POMPELLI, M.F.; SANTOS, M.G.L. Water relations and some aspects of leaf metabolism of *Jatropha curcas* young plants under two water deficit levels and recovery. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campos dos Goytacases, v. 23, n. 2, p. 123-130, 2011.

ARRUDA, F.P.; BELTRÃO, N.E.M.; ANDRADE, A.P.; PEREIRA, W.E.; SEVERINO, L.S. Cultivo de pinhão-mansão (*Jatropha curcas* L.) como alternativa para o semi-árido nordestino. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 789-799, 2004.

BATTY, J.C.; HAMAD, S.N.; KELLER, J. Energy inputs to irrigation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 101, n. 4, p. 293-307, 1975.

BOUSTEAD, I. **Handbook of industrial energy analysis**. Chichester: E. Horwood; New York Halsted Press, 1979. 422 p.

BRITTAINE, R.; LUTALADIO, N. **Jatropha**: a smallholder bioenergy crop. Rome: FAO, 2010. 114 p.

CARNIELLI, F. **O combustível do futuro**. 2003. Disponível em: <<http://www.ufmg.br/boletim/bol1413>>. Acesso em: 25 jan 2012.

CHRISTOFIDIS, D. água irrigação e segurança alimentar. **ITEM: Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, v. 77, n. 1, p. 16-22, 2008.

COELHO, R.D. **Contribuições para a irrigação pressurizada no Brasil**. 2007. 192 p. (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

CORTESAO, M. **Culturas tropicais, plantas oleaginosas coqueiro, ricino, purgueira, aleurites**. Lisboa: Classica, 1955. 231p.

DRUMOND, M.A.; SANTOS, C.A.F.; OLIVEIRA, V.R. de; MARTINS, J.C.; ANJOS, J.B. dos; EVANGELISTA, M.R.V. Agronomic performance of different genotypes of physic nut in the semi-arid zone of Pernambuco state. **Ciencia Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 1, p. 44-47, 2010.

EVANGELISTA, A.W.P.; OLIVEIRA, E.L.; MELO, P.C.; FARIA, M.A.; COLOMBO, A. Response of *Jatropha curcas* L. crop to irrigation and fertilization with OMM-Tech. **Engenharia agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 2, p. 315-323, Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162011000200011&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 01 dez. 2012.

FACT FOUNDATION. **THE Jatropha handbook**: from cultivation to application. 117 p. 2010. Disponível em: <http://www.fact-foundation.com/media_en/FACT_Jatropha_Handbook_EN_2010_FULL>. Acesso em: 12 set. 2012.

FLUMIGNAN, D.L. **Lisímetros de pesagem direta para o estudo do consumo hídrico do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.)**. 2011. 200 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

FRIGO, M.S.; BUENO, O.C.; ESPERANCINI, M.S.T.; FRIGO, E.P.; KLAR, A.E. Análise energética do primeiro ano de cultivo do pinhão-manso em sistema irrigado por gotejamento. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 2, p. 261-271, 2008.

GOERING, C.E.; DAUGHERTY, M.J. Energy accounting for eleven vegetable oil fuels. **ASAE Technical Paper**, St. Joseph, v. 25, p. 1209-1215, 1982.

GUERRERO PINILLA, J.A.; CAMPUZANO, L.F.; ROJAS, S.; PACHÓN GARCÍA, J. Caracterización morfológica y agronómica de la colección nacional de germoplasma de *Jatropha curcas* L. **Orinoquía**, Meta, v. 15, n. 2, p. 131-147, 2011.

GUNASEELAN, V.N. Biomass estimates, characteristics, biochemical methane potential, kinetics and energy flow from *Jatropha curcas* on dry lands. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 33, n. 4, p. 589-596, 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953408002250>>. Acesso em: 14 jan. 2012.

HALL, C.A.S. The myth of sustainable development: personal reflections on energy, its relation to neoclassical economics, and Stanley Jevons. **Journal of Energy Resources Technology**, New York, v. 126, n. 2, p. 85-89, 2004. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1115/1.1737771>>. Acesso em: 01 fev 2012.

HELLER, J. **Physic nut *Jatropha curcas* L. promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops**. Rome: Institute of Plant Genetic Resources and Crop Plant Research, 1996. 66 p.

HORSCHUTZ, A.C.O.; TEIXEIRA, M.B.; ALVES, J.M.; SILVA, F.G.; SILVA, N.F. Crescimento e produtividade do pinhão-mansão em função do espaçamento e irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 10, p. 1093-1099, out. 2012.

KANCHANAKETU, T.; SANGDUEN N.; TOOJINDA T.; HONGTRAKUL V. Genetic diversity analysis of *Jatropha curcas* L. (Euphorbiaceae) based on methylation-sensitive amplification polymorphism. **Genetics and Molecular Research**, Ribeirão Preto, v. 11, n. 2, p. 944-955, 2012.

KIBAZOHI, O.; SANGWAN, R. S. Vegetable oil production potential from *Jatropha curcas*, *Croton megalocarpus*, *Aleurites moluccana*, *Moringa oleifera* and *Pachira glabra*: assessment of renewable energy resources for bio-energy production in Africa. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 35, n. 3, p. 1352-1356, 2011.

KRISHNAMURTHY, L.; ZAMAN-ALLAH, M.; MARIMUTHU, S.; WANI, S. P.; RAO, AVRK. Root growth in *Jatropha* and its implications for drought adaptation. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 39, p. 247-252, Apr. 2012.

KUMAR, R.V.; AHLAWAT, S.P.; PANDEY, S.K.; RANJAN, R.; JOSHI, D.C. Assessment of genetic variability in growth, reproductive phenology, seed characters and yield in *Jatropha curcas* (L.) genetic resources. **Range Management and Agroforestry**, New Delhi, v. 33, n. 1, p. 53-56, 2012. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84864214326&partnerID=40&md5=33b590613da8e9f50da52c4a90b09487>>. Acesso em: 01 nov. 2012.

LAPOLA, D.M.; PRIESS, J.A.; BONDEAU, A. Modeling the land requirements and potential productivity of sugarcane and jatropha in Brazil and India using the LPJmL dynamic global vegetation model. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 33, n. 8, p. 1087-1095, 2009.

MAES, W.H.; TRABUCCO, A.; ACHTEN, W.M.J.; MUYS, B. Climatic growing conditions of *Jatropha curcas* L. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 33, n. 10, p. 1481-1485, 2009.

MAES, W.H.; ACHTEN, W.M.J.; REUBENS, B.; RAES, D.; SAMSON, R.; MUYS, B. Plant-water relationships and growth strategies of *Jatropha curcas* L. seedlings under different levels of drought stress. **Journal of Arid Environments**. London, v. 73, n. 10, p. 877-884, 2009.

MARQUELLI, W.A.; SILVA, W.L.C. **Selecao de sistema de irrigacao para hortaliças**. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2011. 16 p. (Circular Técnica, 69).

MELO, R.D.; LEE, G.T.S.; MASSARO, R.I. Influencia da poda na produção de pinhão-mansão. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFSCAR, 16., 2008, São Carlos. **Anais...** São Carlos: UFSCar, 2008. p. 381.

MOLIN, J.P.; MILAN, M. Trator-implemento: dimensionamento, capacidade operacional e custo. In: GONÇALVES, J.L.M. (Ed.). **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. p. 409-436.

MRINI, M.; SENHAJI, F.; PIMENTEL, D. The energy and water cost of sugar production in a semiarid context: a comparative analysis of sugar beet and sugar cane production and processing in Morocco. **International Sugar Journal**, London, v. 103, n. 1229, p. 206, May 2001.

NIDHI, S.; SAXENA, A.K.; SINGH, R.P. Growth responses of *Jatropha curcas* seedlings under different soil mixtures, fertilizer doses, irrigation regimes and sodicity levels. **Journal of Non Timber Forest Products**, Dehra Dun, v. 17, n. 2, p. 163-171, 2010. Disponível em: <<http://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&CSC=Y&NEWS=N&PAGE=fulltext&D=ca6&AN=20123244160>>. Acesso em: 14 jan. 2012.

NUCCI, S.M. **Diversidade genética em germoplasma de pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) identificada por marcadores SSR e ISSR**. 2011. 165 p. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

OLIVEIRA, M.M.; FREITAS, S.M.; FREDO, C.E. Análise energética da produção de oleaginosas no estado de São Paulo. **Análises e indicadores do Agronegócio**, São Paulo, v. 3, n. 5, 2008. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br>>. Acesso em: 19 jun. 2012.

OLIVEIRA, V.; SANTOS, A.R.F.; SILVA, G.M.; SILVA A.V.C.; OLIVERIRA, I.R. Diversidade genética de genótipos de pinhão-manso cultivados em sergipe. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA, 4.; SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE OLEAGINOSAS ENERGÉTICAS, 1., 2010, João Pessoa. **Anais...** Campina Grande: Embrapa Algodão, 2010. p. 250-254.

OPENSHAW, K. A review of *Jatropha curcas*: an oil plant of unfulfilled promise. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 19, n. 1, p. 1-15, 2000.

PAULINO, J.; DIOTTO, A.V.; ROMANELLI, T.L.; FOLEGATTI, M.V. Energia agregada a mudas de pinhão-manso sob diferentes sistemas de produção. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 40., 2011, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: SBEA, 2011. p. 275-285.

PAULINO, J.; FOLEGATTI, M.V.; FLUMIGNAN, D.L.; ZOLIN, C.A.; MARINHO, L.B. Qualidade de mudas de pinhão-manso produzidas em ambiente protegido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 40., 2011, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: SBEA, 2011. p. 578-587.

PELLIZZI, G. Use of energy and labour in Italian agriculture. **Journal of Agricultural Engineering Research**, New York, v. 52, n.2, p. 111-119, 1992.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PIMENTEL, D. **Handbook of energy utilization in agriculture**. Boca Raton, Fla. CRC Press, 1980. 475 p.

_____. Energy inputs in food crop production in developing and developed nations. **Energies**, Basel, v. 2, n. 1, p. 1-24, Mar. 2009. Disponível em: <<http://WOS:000276704400001>>. Acesso em: 14 jan. 2012.

RAFII, M.Y.; SHABANIMOFRAD, M.; PUTERI EDAROYATI, M.W.; LATIF, M.A. Analysis of the genetic diversity of physic nut, *Jatropha curcas* L. accessions using RAPD markers. **Molecular Biology Reports**, Amsterdam, v. 39, n. 6, p. 6505-6511, 2012.

RAJAGOPAL, D. Implications of India's biofuel policies for food, water and the poor. **Water Policy**, London, v. 10, n. 1, p. 95-106, 2008.

RAO, A.; WANI, S.P.; SINGH, P.; SRINIVAS, K.; RAO, C.S. Water requirement and use by *Jatropha curcas* in a semi-arid tropical location. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 39, p. 175-181, Apr. 2012.

ROCHA, P.R.R.; SILVA, A.F.; FARIA, A.T.; GALON, L.; FERREIRA, E.A.; FELIPE, R.S.; SILVA, A.A.; DIAS, L.A.S. Selectivity of pre-emergence herbicides to physic nut (*Jatropha curcas*). **Planta Daninha**, Viçosa, v. 28, p. 801-806, 2010.

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

_____. Material flow determination through agricultural machinery management. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, n. 4, p. 375-383, 2010.

ROMERO, M.G.C.; BUEENO, E.C.; ESPERANCINI, N.C.T. Análise energética e econômica da cultura do algodão em sistema agrícolas familiares. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 21, n. 4, p. 81-97, 2006.

SALLA, D.A.; FURLANETO, F.P.B.; CABELLO, C.; KANTHACK, R.A.D. Análise energética de sistemas de produção de etanol de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, p. 444-448, 2010.

SALÉ, N.A.C. **oportunidades e desafios para o comercio internacional de biocombustível de *Jatropha curcas* (Pinhão-mansão) produzido em países em desenvolvimento**. 2008. 139 p. Dissertação (Mestrado em Agronegócio) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

SARHAN, A.Z.; DALIAB, T.M.A.; EL-DAYEM, A.M.A.M.; BAHNASY, M.I. A study of water and fertilization requirements of *Jatropha curcas*, L. under sewage water irrigation conditions. **Bulletin of Faculty of Agriculture, Cairo University**, Cairo, v. 61, n. 2, p. 173-181, 2010. Disponível em: <<http://www.cu.edu.eg>>. Acesso em: 14 jan. 2012.

SATURNINO, H.M.; PACHECO, D.D.; KAKIDA, J.; TOMINAGA, N.; GONCALVES, N.P. Cultivation of *Jatropha curcas* L. (producao de oleaginosas para biodiesel). **Informe Agropecuario**, Belo Horizonte, v. 26, n. 229, p. 44-78, 2005. Disponível em: <<http://www.epamig.br>>. Acesso em: 19 jun. 2012.

SERRA, G.E.; MOREIRA, J.R.; GOLDEMBERG, J. **Avaliação da energia investida na fase agrícola de algumas culturas**. Brasília, Secretaria de Tecnologia Industrial. 1984. 86 p.

SEVERINO, L.S.; VALE, L.S.; BELTRÃO, N.E.M. A simple method for measurement of *Jatropha curcas* leaf area. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 9-14, 2007.

SHABANIMOFRAD, M.; RAFII, M.Y.; MEGAT WAHAB, P.E.; BIABANI, A.R.; LATIF, M.A. Phenotypic, genotypic and genetic divergence found in 48 newly collected Malaysian accessions of *Jatropha curcas* L. **Industrial Crops and Products**, New York, v. 42, n. 1, p. 543-551, 2013. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84864073729&partnerID=40&md5=1c3f8489654d3d5205d02267f4422234>>. Acesso em: 08 jan. 2013.

SOUSA, J.A.D.; GUERRA, H.O.C. Irrigation, organic fertilizer and soil mulching in *Jatropha curcas* L initial growth. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 25, n. 1, p. 104-112, 2012.

STANHILL, G. **Energy and agriculture**. New York; Berlin: Springer, 1984. 192 p.

TEWARI, D.N. **Jatropha & bio-diesel**. New Delhi: Ocean Books, 2009. 228 p.

TOPAK, R.; SÜHERI, S.; KARA, M.; ÇALIŞIR, S.C. Investigation of the energy efficiency for raising crops under sprinkler irrigation in a semi-arid area. **Applied Engineering in Agriculture**, St.Joseph, v. 21, n. 5, p. 761-767, 2005. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-27844497967&partnerID=40&md5=85d332cd4efa16dee32079eb8fa2b3bc>>. Acesso em: 13 jun. 2012.

ULBANERE, R.C. **Análise dos balanços energético e econômico relativa à produção e perdas de grãos de milho no Estado de São Paulo**. 1988. 127 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 1988.

WANG, Z.; CALDERON, M.M.; LU, Y. Lifecycle assessment of the economic, environmental and energy performance of *Jatropha curcas* L. biodiesel in China. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 35, n. 7, p. 2893-2902, 2011.

YAMADA, E.S.M. **Zoneamento agroclimático da *Jatropha curcas* L. como subsídio ao desenvolvimento da cultura no Brasil visando à produção de biodiesel**. 2011. 131p. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

ZOCOLER, J.L.; BAGGIO, F.F.; OLIVEIRA, L.; HERNANDEZ, F. Model for determining flow diameter and economic velocity in water elevating systems. **Mathematical Problems in Engineering**, New York, v. 2006, n. 1, p. 17, 2006. doi:10.1155/MPE/2006/17263. Disponível em: <<http://www.hindawi.com/journals/mpe/2006/017263/ref/>>. Acesso em: 06 ago. 2012.

ANEXOS

Anexo A – Índices energéticos de alguns fertilizantes

Fertilizantes	MJ kg⁻¹	Fonte
Calcário	1,67	Ferraro Júnior (1999)*
N	74,00	Pellizzi (1992)
Ureia	78,04	Ferraro Júnior (1999)*
Amônia anidra	68,03	Ferraro Júnior (1999)*
Nitrato de amônio	77,03	Ferraro Júnior (1999)*
Sulfato de amônia	21,98	Ferraro Júnior (1999)*
Nitrato de potássio	14,65	Ferraro Júnior (1999)*
Nitrato de cálcio	16,74	Ferraro Júnior (1999)*
Nitrato chileno	21,08	Ferraro Júnior (1999)*
P ₂ O ₅	12,56	Ferraro Júnior (1999)*
Super Fosfato Simples	9,79	Ferraro Júnior (1999)*
Super Fosfato Triplo	22,11	Ferraro Júnior (1999)*
Termofosfato	3,77	Ferraro Júnior (1999)*
Fosfato de rocha	0,63	Ferraro Júnior (1999)*
DAP	44,09	Hetz (1992)*
K ₂ O	6,70	Ferraro Júnior (1999)*
KCl	7,19	Ferraro Júnior (1999)*
Sulfato de potássio	3,35	Ferraro Júnior (1999)*
Sulfato de potássio e magnésio	1,67	Ferraro Júnior (1999)*
20-00-20	16,14	Ferraro Júnior (1999)*

* Citado por (ROMANELLI; MILAN, 2005)

Anexo B – Índices energéticos de alguns defensivos agrícolas

Defensivos	MJ kg⁻¹	Fonte
Herbicida	254,57	Pimentel (1980)
Inseticida	184,71	Pimentel (1980)
Fungicida	97,13	Pimentel (1980)
MCPA	0,13	Fluck e Baird (1982)*
Diuron	274,62	Fluck e Baird (1982)*
Atrazina	188,38	Fluck e Baird (1982)*
Trifluralina	150,97	Fluck e Baird (1982)*
Paraquat	459,60	Fluck e Baird (1982)*
2,4 – D	87,04	Fluck e Baird (1982)*
2,4,5 – T	135,06	Fluck e Baird (1982)*
Dicamba	295,13	Fluck e Baird (1982)*
Glifosate	454,20	Fluck e Baird (1982)*
Diquat	400,18	Fluck e Baird (1982)*
Captan	115,05	Fluck e Baird (1982)*
Carbofuran	454,20	Fluck e Baird (1982)*

* Citado por (ROMANELLI; MILAN, 2005)

Anexo C – Índices energéticos de outros componentes

Componente	Unidade	MJ unid⁻¹	Fonte
Combustível - diesel	L	38,55	Ulbanere (1988)
Energia elétrica	kWh ⁻¹	11,80	Pimentel (1980)
Maquinário	kg	68,86	Ulbanere (1988)
Mão de obra	h	2,20	Serra (1984)
Muda de pinhão-manso	unidade	2,30	Paulino (2011a)

Anexo D – Vida útil e índices de materiais utilizados nos sistemas de irrigação

Material	Vida útil* (anos)	Índices (MJ kg ⁻¹ ano ⁻¹)	Fonte
Tubo de PVC	20	5,53	Boustead e Hancock, (1979)
Tubo de PEAD	10	6,74	Boustead e Hancock, (1979)
Tubo gotejador em polietileno linear de baixa densidade	10	21,46	Boustead e Hancock, (1979)
Sistema de bombeamento	20	4,20	Batty et al., (1975)
Tubo aço galvanizado	20	5,23	Boustead e Hancock, (1979)

* Fonte - (MAROUELLI; SILVA, 2011)