



Análise comparativa do fluxo de biomassa em sistemas de produção de cana-de-açúcar convencional e orgânico: quantificação energética da produção primária líquida em uma perspectiva agroecológica

Comparative analysis of biomass flow in conventional and organic sugarcane production systems: net primary production energy quantification from the agro-ecological perspective

Jayme Bezerra de MENEZES NETO^{1*}, Francisco Roberto CAPORAL², Jorge Luiz Schirmer de MATTOS²

¹ Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brasil.

² Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife, PE, Brasil.

* E-mail de contato: jaymebmneto@gmail.com

Artigo recebido em 26 de outubro de 2021, versão final aceita em 16 de maio de 2022, publicado em 6 de outubro de 2023.

RESUMO: O estudo está embasado nos princípios da Agroecologia e utiliza-se do enfoque teórico-metodológico do Metabolismo Social Agrário para obter uma percepção biofísica da sustentabilidade de dois sistemas de produção de cana-de-açúcar localizados no estado de Pernambuco, Brasil, sendo um orgânico e o outro convencional. Os dados foram coletados por meio de entrevistas e submetidos a um conjunto de cálculos usando-se conversores, de modo a quantificar a produtividade primária líquida (PPL) em termos de biomassa e energia nos dois sistemas de produção. A biomassa da PPL foi decomposta e classificada em categorias, o que permitiu conhecer o seu fluxo em ambos os sistemas de produção. O sistema convencional resultou em maior quantidade de biomassa e energia socializadas, porém o sistema orgânico apresentou maior produtividade total, bem como uma partição proporcionalmente mais equilibrada entre as diferentes categorias de biomassa e energia. O sistema convencional comportou-se como exportador de energia, e o sistema orgânico, como conservador de energia. Embora os dois sistemas estejam assentados na monocultura da cana-de-açúcar, com limitações em termos de biodiversidade, o sistema orgânico demonstrou-se mais sustentável do ponto de vista agroecológico, por não fazer uso de queimadas, de fertilizantes químicos (sintéticos) e agrotóxicos, bem como por fornecer biomassa e energia aos organismos heterotróficos, além de atuar na manutenção dos elementos de fundo e contribuir para a melhoria de serviços ecossistêmicos.

Palavras-chave: produtividade primária líquida; sustentabilidade de agroecossistemas; agroecologia;

ABSTRACT: The present study is based on Agroecology principles and follows the theoretical-methodological approach of Social Agrarian Metabolism to find the sustainability biophysical perception in two sugarcane production systems, in Pernambuco State, Brazil, namely: organic and conventional. Data were collected through interviews and subjected to a set of calculations carried out in converters to quantify biomass and energy net primary productivity (NPP) in the two production systems. NPP biomass was decomposed and classified, and it allowed knowing its flow in both production systems. The conventional system recorded a larger amount of socialized biomass and energy, but the organic system accounted for higher total productivity, as well as for proportionally more balanced partition between different biomass and energy categories. The conventional system was energy exporter, and the organic system was energy conservationist. Although the two systems are based on sugarcane monoculture, with biodiversity limitations, the organic system proved to be more sustainable from an agro-ecological viewpoint, since it does not depend on burns, chemical (synthetic) fertilizers and pesticides, and provided biomass and energy to heterotrophic organisms, as well as acted in maintaining background elements and contributed to improve ecosystem services.

Keywords: net primary productivity; agroecosystem sustainability; agroecology; agrarian social metabolism.

1. Introdução

Em ecologia, produção primária é o termo dado ao acúmulo de energia na forma de material orgânico produzido por organismos autotróficos através do processo de fotossíntese¹. Assim, a biomassa vegetal decorre da conversão, feita pelas plantas, da radiação solar em energia química. Essa energia acumulada é disponibilizada para todos os outros organismos, dando suporte a uma grande diversidade de espécies que habitam os ecossistemas, de modo a sustentar, praticamente, todas as redes tróficas² e, deste modo, servir como veículo para a transferência de energia solar para os seres heterótrofos³ (Guzmán *et al.*, 2014).

A capacidade dos ecossistemas de converter a energia solar em biomassa é chamada de pro-

dutividade primária bruta. Contudo, grande parte dessa energia fixada é usada pelas plantas em seus processos metabólicos, razão pela qual a quantidade de energia realmente incorporada nos tecidos das plantas é denominada Produtividade Primária Líquida (PPL). Portanto, a PPL representa a diferença entre a energia produzida via processo de fotossíntese e a energia que é utilizada na respiração para a manutenção metabólica dos vegetais, e pode ser expressa em termos de energia acumulada (joules/hectare) ou em termos do material orgânico sintetizado (kg/hectare)⁴ (Haberl *et al.*, 2014).

Uma vez que a PPL é a base principal da cadeia trófica, a sua apropriação pela sociedade humana afeta o restante das populações de organismos que dependem dos mesmos recursos (Guzmán *et al.*, 2014). Assim, as avaliações dos fluxos de PPL nos

¹ A quimiossíntese é relevante em certos ecossistemas muito específicos (leito oceânico, fontes hidrotermais, *etc.*) e, portanto, não é de interesse quando consideramos o metabolismo agrário.

² A estrutura trófica de uma comunidade é determinada a partir da forma em que são satisfeitas as necessidades nutricionais das espécies dessa comunidade nas inter-relações com outras espécies (Gliessman, 2002, p. 19).

³ Diferente dos organismos autótrofos, os seres vivos heterotróficos não possuem a capacidade de produzir seu próprio alimento.

⁴ A PPL mede um fluxo anual e, portanto, não é igual à quantidade de biomassa permanente por unidade de área que mede um estoque em um determinado momento.

ecossistemas agrários estão diretamente relacionadas à apropriação humana da produção primária líquida (AHPPL). De acordo com Haberl *et al.* (2014), os estudos sobre a AHPPL concentram-se na avaliação da PPL nos agroecossistemas, envolvendo não só a quantidade de PPL colhida e utilizada pelos seres humanos, mas também a quantidade de PPL remanescente para outras espécies. Isso equivale a dizer que é importante considerar e quantificar não só a biomassa que tem algum valor de uso ou de troca monetária para a sociedade, mas também uma parte significativa da biomassa produzida que recircula nos agroecossistemas e que cumpre um papel fundamental para o funcionamento adequado do sistema e, conseqüentemente, para a manutenção de inúmeras populações de organismos (Guzmán *et al.*, 2014).

Contudo, nem toda a biomassa vegetal acumulada promove as mesmas funções ecossistêmicas; aspecto que reforça, sobretudo, a importância de que toda a biomassa acumulada pelas plantas dentro dos limites do agroecossistema seja quantificada e classificada (Soto *et al.*, 2016). Com esse propósito, a PPL pode ser decomposta em diferentes categorias: biomassa vegetal socializada (BVS), biomassa reciclada (BRc), biomassa reutilizada (BRu), biomassa não colhida (BnC) e biomassa acumulada (BA).

Segundo Guzmán *et al.* (2014), a BS é a biomassa vegetal (madeira, lenha, grãos de cereais, frutas, etc.) que é apropriada diretamente pela sociedade humana, considerada como extraída do agroecossistema, isto é, antes de passar por algum processamento industrial. A BRc é a biomassa reincorporada no agroecossistema (Guzmán *et al.*, 2014). Sementes e órgãos de reprodução vegetativa (tubérculos, rizomas, mudas, etc.) também fazem parte da BRc. Na perspectiva da sociedade, a BRc pode ser dividida em duas partes:

a) Biomassa reutilizada (Bru): é a porção intencionalmente devolvida ao agroecossistema pelos seres humanos, sendo, portanto, necessário o uso de trabalho. Neste caso, a reincorporação desta biomassa vegetal ao agroecossistema tem um propósito que é reconhecido e apreciado pela sociedade. Por exemplo, o seu uso como ração para a obtenção de produtos (carne, leite, ovos) ou serviços como tração animal e fertilização do agroecossistema (adubo verde, compostagem, cobertura morta, caldas, biofertilizantes, etc.).

b) Biomassa não colhida (BnC): é a biomassa devolvida ao agroecossistema por abandono. Seu retorno não envolve o investimento de qualquer trabalho humano. Este é o caso de resíduos de colheitas que não recebem um tratamento específico, tais como a porção de pastagem não consumida pelo gado, os restos de árvores frutíferas e as raízes que são recicladas por organismos heterotróficos (Guzmán *et al.*, 2014).

A BnC pode ainda ser dividida em Biomassa não colhida acima do solo (BNcAS) e Biomassa não colhida subterrânea (BNcS), dependendo da localização desta biomassa quando ela é abandonada. Já a BA é a porção de biomassa que se acumula anualmente na estrutura aérea (tronco e coroa) e nas raízes das espécies perenes (Guzmán *et al.*, 2014).

Assim, o presente trabalho teve como objetivo quantificar o fluxo da biomassa vegetal e da energia nela contida, bem como fazer a sua partição e categorização de acordo com o seu papel na dinâmica biofísica dos sistemas de produção agrícola estudados. Para isso, utilizou-se do enfoque teórico-metodológico do Metabolismo Social, que tem como propósito descrever, em diferentes níveis, a relação de reciprocidade e interdependência entre sociedade e natureza a partir do estudo dos fluxos

de matéria, energia e informações (González de Molina & Toledo, 2011).

O traslado desse enfoque metabólico ao campo da agricultura é chamado de Metabolismo Social Agrário (MSA), cuja abordagem está relacionada diretamente com o estudo dos fluxos biofísicos que mantêm a geração de biomassa e serviços ambientais (González de Molina & Toledo, 2011; Menezes Neto *et al.*, 2018). Esse enfoque metabólico dos sistemas agrários é de grande utilidade para os estudos no campo agroecológico (González de Molina, 2011), uma vez que fornece informações sobre o funcionamento dos agroecossistemas no espaço e no tempo. Portanto, o enfoque do MSA é capaz de orientar processos de transição do modelo agrícola convencional para estilos de agriculturas mais sustentáveis (Gliessman *et al.*, 2007).

Vale destacar que neste trabalho existe uma distinção entre sistemas de produção orgânica e agricultura de base agroecológica (Caporal, 2008), uma vez que é possível ocorrer formas de agricultura orgânica que não respeitem todas as dimensões que garantem a sustentabilidade no longo prazo, assim como os princípios ecológicos e sociais definidos pela Agroecologia (Assis & Romeiro, 2002).

2. Metodologia

2.1. Caracterização dos locais da pesquisa

As áreas estudadas encontram-se inseridas no bioma Mata Atlântica, em uma microrregião da Zona da Mata Sul do estado de Pernambuco (região Nordeste do Brasil), caracterizada por apresentar clima tropical com estação seca (Mascarenhas *et al.*, 2005). A pesquisa envolveu dois sistemas de produção de cana-de-açúcar, sendo um convencional e

outro orgânico, localizados nos municípios de Chã Grande e Amaraji, respectivamente (Tabela 1). O sistema de produção convencional estudado é bem representativo deste tipo de modelo agrícola utilizado na região da Zona da Mata Sul de Pernambuco. Por sua vez, o sistema orgânico estudado apresenta características bem específicas em relação ao seu sistema produtivo, que busca valorizar os recursos locais da propriedade e integrar a produção agrícola com a produção industrial, de modo a desenvolver um modelo de negócio consistente no mercado de cachaça orgânica e do turismo ecológico.

2.2. Sistema convencional

O agricultor e proprietário da área em que foi instalado o sistema de produção convencional pesquisado possui curso Técnico em Agropecuária, atuou profissionalmente nas usinas sucroalcooleiras da região e tem mais de 20 anos de experiência com a produção de cana-de-açúcar. Além da venda da cana-de-açúcar, a renda da família advém da comercialização de insumos agrícolas numa casa agropecuária localizada no centro da cidade de Amaraji.

TABELA 1 – Informações sobre os municípios onde se situam os locais da pesquisa.

| Informações | Município | |
|-------------------------------|------------|---------|
| | Chã Grande | Amaraji |
| Área (km ²) | 84,848 | 234,956 |
| População (hab.) | 21.929 | 22.910 |
| Altitude (m) | 470 | 290 |
| Temperatura média anual (Co) | 22,6 | 24,5 |
| Precipitação média anual (mm) | 1310 | 1460 |
| Distância da capital (km) | 82 | 96 |

FONTE: IBGE (2013).

A cana-de-açúcar produzida nessa área teve como principal destino as grandes usinas de açúcar e álcool da região. Contudo, segundo apontou o agricultor, existe uma relação assimétrica entre os fornecedores de cana-de-açúcar e as usinas, em especial, porque os usineiros controlam os preços, as pesagens e as medições do teor de sacarose e não raro demoram para fazer o pagamento da matéria-prima, o que tem penalizado sobremaneira os agricultores da região.

Esse sistema de produção constou de uma área de canavial e outra área com vegetação perene, esta última constituindo a área de Reserva Legal da propriedade. A implantação da cana-de-açúcar iniciou com cinco hectares (ha) no primeiro ano pesquisado, expandindo-se para 30 ha a partir do segundo ano. Já a área de vegetação perene (Reserva Legal) equivaleu a um hectare e foi constante ao longo dos cinco anos. Assim, a soma da área de produção de cana-de-açúcar com a área de reserva legal totalizou seis hectares na primeira safra (2011/12) e 31 hectares nas outras quatro safras seguintes (de 2012/13 a 2015/16), conforme apresentado na Tabela 2.

O solo recebeu preparo com aração seguida de gradagem. Na calagem utilizou-se 2.000 kg/ha de calcário dolomítico, que foi incorporado ao solo com grade niveladora, trinta dias antes do plantio. A adubação foi feita com fertilizante formulado à base de NPK (12 - 24 - 18), sendo utilizada a quan-

tidade de 250 kg/ha na fundação e 250 kg/ha em cobertura nos anos seguintes. Tanto a correção do solo quanto a adubação foram realizadas seguindo as recomendações do proprietário, de acordo com sua experiência com a produção da cana-de-açúcar na região.

A variedade utilizada na implantação da lavoura de cana-de-açúcar foi a SP79-1011, que apresenta como principais características a produtividade, maturação e exigência a solo medianas, boa brotação de soqueira, alto teor de sacarose e baixo florescimento. A altura do colmo pode chegar a mais de quatro metros de altura, o número de perfilhos médio é cinco, e a produtividade agrícola real chega a mais de 145 toneladas de cana por hectares, de acordo com estudo realizado no estado de São Paulo por Tasso Júnior (2007).

2.3. Sistema orgânico

O local de estudo do sistema de produção orgânico de cana-de-açúcar constou de uma área anteriormente degradada. No momento da pesquisa foi plantada uma variedade de cana-de-açúcar selecionada pelo produtor de acordo com o as características mais adequadas para a produção de sua cachaça. O sistema agrícola foi implantado ao longo dos cinco anos de cultivo (2011-2016), obedecendo à demanda de matéria-prima do engenho (Tabela 2).

TABELA 2 – Área cultivada com cana-de-açúcar em cada safra nos sistemas de produção convencional e orgânico.

| Sistema de produção | Área cultivada (ha) | | | | | Total |
|---------------------|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------|
| | Safra 2011-12 | Safra 2012-13 | Safra 2013-14 | Safra 2014-15 | Safra 2015-16 | |
| Convencional | 6,000 | 31,000 | 31,000 | 31,000 | 31,000 | 130,000 |
| Orgânico | 0,840 | 1,776 | 3,336 | 4,536 | 5,256 | 15,744 |

FONTE: Os autores.

No entanto, também foram introduzidas espécies perenes no entorno da área, com a finalidade de reflorestamento.

O solo recebeu preparo mecânico de aração, seguida de gradagem. Na calagem foi utilizado 400 kg/ha de calcário calcítico, incorporado ao solo com grade niveladora quarenta dias antes do plantio apenas no primeiro ano. A adubação foi feita com composto orgânico, preparado com esterco bovino, bagaço de cana-de-açúcar produzido nas moagens do engenho e cinzas resultantes da queima do bagaço na caldeira do engenho. O composto foi distribuído manualmente pelos funcionários, à base de 3.000 kg/ha na fundação e 2.000 kg/ha em cobertura nos anos seguintes. Essas dosagens foram feitas de acordo com as recomendações de um agrônomo que prestou consultoria ao produtor e buscou utilizar os resíduos do próprio sistema produtivo do engenho.

O agricultor responsável pelo sistema de produção orgânico é formado em Engenharia Mecânica e cultivava hortaliças antes de passar a produzir cana-de-açúcar e seus derivados. A produção de cana-de-açúcar tem sido destinada ao engenho da família, localizado próximo à área de plantio, onde se fabrica cachaça, álcool, rapadura, açúcar mascavo, licores, doces e geleias. A comercialização desses produtos foi feita em mercados e casas especializadas, mas também em uma loja que a família possui ao lado do engenho de cachaça e de outros produtos. Além da renda obtida com a venda dos produtos derivados da cana-de-açúcar,

a família tem no ramo do ecoturismo uma fonte complementar de renda.

O bagaço, subproduto da moagem da cana, foi totalmente reaproveitado, sendo que uma parte utilizada como energia térmica no processo industrial (80%), e outra parte (20%) retornou para a área de plantio na forma de composto orgânico para adubar o solo.

2.4. Coleta de dados

Considerou-se neste estudo os dados da produção de cana-de-açúcar referentes a cinco safras consecutivas, que ocorreram entre os anos de 2011 e 2016. Esse período correspondeu a um ciclo completo da lavoura de cana-de-açúcar⁵, conforme padrão nessa região, em que é feita uma renovação a cada cinco anos, uma vez que a produtividade da cana-de-açúcar diminui após cada corte.

Além disso, vale salientar que os sistemas de produção pesquisados foram muito distintos no tocante ao tamanho da área cultivada em cada safra, aos tratamentos culturais, uso de insumos e produtividade agrícola. Isso ocorreu devido às diferentes estratégias adotadas na expansão das áreas produtivas, além dos diferentes modelos de condução e manejo das lavouras.

A produção de biomassa foi expressa em valores médios por hectare, para possibilitar as comparações entre os dois sistemas de produção agrícola. Para tal, foram considerados os dados concernentes aos fluxos de entrada, circulação interna e

⁵ Após o plantio, a lavoura de cana-de-açúcar permite de três a seis colheitas consecutivas, dependendo de fatores como variedade, manejo de solo e de água e clima. A lavoura recebe o nome de cana-planta no seu primeiro corte; soca ou segunda folha, no segundo; e, resoca ou folha de enésima ordem nos demais cortes até a última colheita, completando, assim, o ciclo da cana plantada, quando é feita a renovação do canavial (Santiago & Rossetto, 2009).

saída de materiais e energia relativos à produção da biomassa de cana-de-açúcar, bem como da biomassa das plantas adventícias e da biomassa acumulada na vegetação perene.

Os dados primários foram coletados diretamente dos registros dos agricultores, utilizando-se também de entrevistas semiestruturadas e questionários, ao passo que os dados secundários foram obtidos por meio de consultas a trabalhos acadêmicos realizados neste campo do conhecimento (Guzmán *et al.*, 2014; Guzmán & González de Molina, 2015).

2.5. Cálculos para a análise da produtividade primária líquida

2.5.1. Quantificação da produtividade primária líquida

A quantificação da PPL foi realizada, nos dois sistemas, com base na média da biomassa vegetal total produzida durante o ciclo de cinco anos. Assim, foi possível determinar os valores referentes à biomassa produzida, tanto da biomassa vegetal total (PPL) quanto das suas diferentes partes, que foram categorizadas de acordo com suas características morfológicas e funcionais. Dessa forma, foi possível contabilizar as partes da biomassa colhidas para uso da sociedade, as partes que foram reutilizadas como insumo no próprio sistema, as raízes que ficaram no solo e os resíduos da cana-de-açúcar que foram tanto deixados no sistema quanto reciclados. Ademais, também foi calculada a biomassa das plantas adventícias, bem como das estruturas da vegetação perene.

A quantificação da biomassa resultou de uma adaptação metodológica da revisão de Guzmán *et al.* (2014) para o desenvolvimento de índices e

fatores que permitiram converter não só a biomassa fresca em biomassa seca, mas também esta última em valores de energia bruta.

O índice de colheita e o índice de raiz foram utilizados para a determinação da biomassa acima e abaixo do solo, conforme as fórmulas a seguir:

$$\begin{aligned} &\rightarrow \text{Índice de colheita} \\ &= \frac{\text{Biomassa colhida (colmo)}}{\text{Biomassa \acute{e} reatotal (colmo + folhas)}} \end{aligned}$$

Trata-se da biomassa do produto colhido (matéria fresca) em relação à soma deste produto com o restante da biomassa aérea no momento da colheita.

→ Índices de resíduo:

- Razão resíduo/parte aérea

$$\frac{\text{Resí duo}}{\text{Parte \acute{e} rea}} = \frac{\text{Biomassa do resí duo (kg)}}{\text{Biomassa da parte \acute{e} rea (kg)}}$$

- Razão resíduo/produto

$$= \frac{\text{Kg resí duo}}{\text{Kg produto}}$$

(expressa em termos de biomassa fresca)

O cálculo do índice de resíduo no sistema convencional levou em consideração as queimadas que ocorreram no canavial antes das colheitas e que geraram uma grande perda dos resíduos. Esse percentual de resíduo foi somado aos ponteiros da cana-de-açúcar (folha bandeira), que foram eliminados no momento dos cortes, uma vez que não existe interesse da indústria em adquiri-los por causa do seu baixo teor de sacarose. Assim, estimou-se para o índice de resíduo um valor percentual de 5% da biomassa colhida, conforme os dados coletados com o agricultor (Tabela 3).

Já para o sistema orgânico, foi atribuído ao índice de resíduo um valor de 49% da biomassa colhida, pois não ocorreram queimadas. Logo, o índice de resíduo foi de 33%, em relação à biomassa aérea total da planta (Tabela 3).

Os dados utilizados na pesquisa para determinar os índices de colheita e de resíduo nos sistemas de produção sem e com queima seguiram informações fornecidas por Carvalho (2015), os quais ficaram bem próximos dos dados utilizados por Guzmán *et al.* (2014) para esses índices.

Para os cálculos do índice de raiz da cana-de-açúcar foram usados dados de canaviais brasileiros (Vasconcelos, 2002) (Tabela 4). Além disso, foram calculados os dados de índice de raiz das plantas adventícias (Faroni, 2004) e da vegetação perene arbórea (Almagro *et al.*, 2010).

→ *Índice de raiz*

- Razão biomassa da raiz / biomassa da parte aérea

$$= \frac{\text{Razão biomassa raiz}}{\text{Biomassa aérea total (colmo + folhas)}}$$

TABELA 3 – Índice de colheita e índice de resíduos da cultura de cana-de-açúcar.

| Sistema de produção | Índice de colheita | Índices de resíduos | | Referências |
|---------------------|--------------------|------------------------------|--------------------------|-----------------|
| | (%) ¹ | Parte aérea (%) ² | Produto (%) ³ | |
| Sem queimada | 67 | 33 | 49 | Carvalho (2015) |
| Com queimada | 95 | 5 | 5 | Carvalho (2015) |

LEGENDA:

¹ Produto principal (kg de colmos) /biomassa aérea.

² Resíduos (kg de folhas e ponteiros) /biomassa aérea.

³ Resíduos (kg de folhas e ponteiros) /produto principal (kg de colmos).

FONTE: Os autores.

TABELA 4 – Índices de raiz da cana-de-açúcar, plantas adventícias e vegetação perene.

| Tipo de vegetação | Índice de raiz | Referências |
|---------------------|---|-----------------------|
| | Biomassa aérea/ biomassa de raiz (% matéria seca) | |
| Cana-de-açúcar | 18 | Vasconcelos (2002) |
| Plantas adventícias | 80 | Faroni (2004) |
| Vegetação perene | 20 | Almagro et al. (2010) |

FONTE: Os autores.

De acordo com Vasconcelos (2002), a relação média, em toneladas de matéria seca por hectare, entre o sistema radicular (3,8 t/ha de raízes + 1,8 t/ha de rizomas) e a parte aérea (colmos e ponteiros = 27 t/ha e folhas e palha = 5 t/ha), é de 5,6 para 32, equivalente a 0,175 ou 17,5 %.

→ *Biomassa de plantas adventícias*

A flora adventícia, composta por plantas espontâneas, diz respeito a uma parte da PPL que não foi cultivada, mas que exerceu funções ecossistêmicas (Guzmán *et al.*, 2014). No sistema convencional, a sua percentagem foi estimada em 2%, e parte dessa vegetação foi reincorporada ao solo após ser dessecada com a aplicação de herbicidas. No caso do sistema orgânico, considerou-se um índice de 20%, em relação à produção de cana-de-açúcar. Esse valor foi estimado de acordo depoimento do agricultor e ajustado de acordo com dados encontrados em Guzmán *et al.* (2014).

→ *Biomassa total da cultura da cana-de-açúcar*

A biomassa total diz respeito ao conjunto da biomassa produzida no cultivo de cana-de-açúcar,

com base na produção agrícola, somada à biomassa das plantas adventícias:

$$Biomassatotal =$$

$$Biomassada\ cana + Biomassaespont\ \hat{a}\ neas$$

→ *Conversão da biomassa fresca em biomassa seca*

A biomassa fresca foi transformada em biomassa seca utilizando-se os índices de conversão da Tabela 5. O teor de matéria seca utilizado para a cana-de-açúcar colhida foi de 30%, e o teor utilizado de matéria seca para o resíduo foi de 50% (Pierossi & Fagundes, 2013).

→ *Conversão da biomassa em energia bruta*

Os dados coletados foram categorizados e forneceram informações sobre a energia produzida, representada e classificada na forma de categoria de biomassa. A unidade utilizada para o estudo foi a do Sistema Internacional, ou seja, o Joule (J) e seus múltiplos, principalmente, megajoules (MJ) e gigajoules (GJ); sendo que 4,1868 J equivalem a 1,0 caloria.

A energia bruta foi obtida a partir de tabelas da composição químico-bromatológica da biomassa (Guzmán *et al.*, 2014). Trata-se da energia liberada na forma de calor quando uma substância orgânica é completamente oxidada a dióxido de carbono e água (Joules/grama). Os valores de energia bruta da biomassa colhida, do resíduo e da raiz foram calculados a partir de dados obtidos nos trabalhos de Leal (2010) e Hassuani (2005). Dessa forma, com os valores energéticos dos açúcares, da fibra do bagaço e da palha que compõem a biomassa da cana-de-açúcar, bem como o percentual de cada uma delas nas partes estudadas, foi possível determinar os fatores de conversão energética (Tabela 6).

TABELA 5 – Índices de conversão de matéria fresca em matéria seca para a cana-de-açúcar.

| Índices de conversão | Parte aérea (%) | Parte aérea (%) | Referências |
|------------------------------|-----------------|-----------------|----------------------------|
| | Colhida | Resíduos | |
| Teor de matéria seca (MS/MF) | 30 | 50 | Pierossi & Fagundes (2013) |

FONTE: Os autores.

TABELA 6 – Fator de conversão energético dos componentes da biomassa de cana-de-açúcar.

| Biomassa da cana-de-açúcar | Fator de conversão energético (MJ/kg) | Referências |
|----------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| Colhida | 17,16 | Leal (2010); Hassuani, (2005) |
| Resíduo | 17,85 | Leal (2010); Hassuani, (2005) |
| Raiz | 17,57 | Leal (2010); Hassuani, (2005) |

FONTE: Os autores.

Para a determinação dos fatores de conversão energética, separou-se a biomassa colhida (colmo) da palha e do ponteiro, relativos à parte aérea da planta de cana-de-açúcar que é composta por água, açúcares e fibras (bagaço), além de sais minerais. Isso porque o ponteiro não foi aproveitado para processamento industrial, ao contrário do colmo. O bagaço foi composto por 90% de colmo e 10% de ponteiros (Carvalho, 2015).

Para contabilizar a energia bruta contida na cana-de-açúcar, foram calculadas as porcentagens de cada componente dessas partes (colhida e residual) e relacionados os respectivos valores energéticos (Tabela 7).

TABELA 7 – Matéria fresca de porções da parte aérea da cultura de cana-de-açúcar.

| Porções da parte aérea | Matéria fresca | | Referências |
|--------------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| | Quantidade (kg) | Teor de umidade (%) | |
| Colmo (biomassa colhida) | 67 | 70 | Carvalho (2015) |
| Folha | 19 | 40 | Carvalho (2015) |
| Ponteiro | 14 | 60 | Carvalho (2015) |
| Total | 100 | - | |

FONTE: Carvalho (2015).

Os fatores de conversão em energia dos componentes da biomassa de cana-de-açúcar foram calculados pelos autores com base nos dados dos trabalhos suas respectivas contribuições energéticas, conforme apresentado na Tabela 8.

TABELA 8 – Fatores energéticos dos componentes da biomassa de cana-de-açúcar.

| Componentes da biomassa | Quantidade (kg/t) | Per-centagem (%) | Energia Bruta (MJ) | Fator de conversão energético (MJ/kg) |
|-------------------------|-------------------|------------------|--------------------|---------------------------------------|
| Açúcares | 150 | 35 | 2.500 | 16,67 |
| Fibra (bagaço) | 135 | 32 | 2.400 | 17,77 |
| Palha (folhas) | 140 | 33 | 2.500 | 17,85 |
| Total | 425 | 100 | 7.400 | 17,41 |
| Biomassa colhida | 271,5 | - | 4.660 | 17,16 |
| Resíduos | 153,5 | - | 2740 | 17,85 |

FONTE: Leal (2010); Hassuani (2005).

Vale destacar que esses fatores de conversão podem ser influenciados pelo genótipo da variedade, pela regulação hormonal de cada planta, pelo estado fenológico e pelas condições de crescimento (clima, solo, competição inter ou intraespécies, práticas culturais, etc.).

2.5.2. Categorias da produtividade primária líquida

O enfoque do Metabolismo Social Agrário, embasado nos princípios da Agroecologia (González de Molina, 2011; Guzmán *et al.*, 2014; Tello *et al.*, 2015), recomenda a partição da PPL em diferentes categorias para se conhecer melhor o fluxo de matéria e energia, tanto da parte que é destinada à sociedade quanto da parte que é reutilizada pelos agroecossistemas. Assim, de acordo com o itinerário metodológico desenvolvido para este estudo (Menezes Neto *et al.*, 2018), foram utilizadas as seguintes categorias de biomassa, referentes à PPL dos sistemas estudados:

- *Biomassa socializada (BS)*: biomassa vegetal que foi colhida na forma de colmo de cana-de-açúcar e destinada ao processamento industrial;
- *Biomassa reciclada (BRc)*: foi dividida em:
 - *Biomassa reutilizada (BRu)*: biomassa do bagaço da cana-de-açúcar usado no processo de compostagem; material de reprodução (toletes de colmos colhidos que foram utilizados para expansão da área de plantio), folhas e palha da cana-de-açúcar, ponteiros (folhas bandeiras) e o resíduo vegetal da capina da parte aérea das plantas adventícias.
 - *Biomassa não colhida (BnC)*: foi dividida em:

Acima do solo (BNcAS): Não

Subterrânea (BNcS): raízes da cultura da cana-de-açúcar e as raízes das plantas adventícias;

Biomassa acumulada (BA): biomassa da estrutura aérea (tronco e coroa) e das raízes de plantas perenes nativas.

3. Resultados e discussão

3.1. Análise da produtividade de biomassa da cana-de-açúcar

A matéria seca da biomassa colhida da parte aérea de cana-de-açúcar do sistema convencional foi bem superior ao do sistema orgânico (Tabela 9). No entanto, quando a comparação é feita em termos de matéria seca total, o sistema orgânico superou o convencional. Isso se deve, principalmente, à grande contribuição da biomassa do resíduo agrícola deixado no solo pela cana-de-açúcar no sistema orgânico, ao passo que no sistema convencional essa porção foi submetida à queima, antes da colheita.

Contudo, ficou bem evidente a baixa produtividade da cana-de-açúcar colhida no sistema orgânico, que apresentou um resultado médio anual de 11,19 t/ha/ano de matéria seca. Esse valor, em termos de matéria seca colhida, ficou bem abaixo do valor encontrado para o sistema convencional, que apresentou uma produtividade da colheita de 17,60 t/ha/ano de matéria seca (Tabela 9).

Esses resultados equivalem à produtividade de cana-de-açúcar colhida in natura, sendo 58,65 t/ha/ano no sistema convencional e de 37,29 t/ha/ano no sistema orgânico. No caso do sistema orgânico, esses valores de produtividade se devem mais a uma opção do agricultor que vem priorizando o uso de material genético não tão produtivo, mas que confere maior eficiência e qualidade no processo de fabricação da cachaça. Ou seja, nesse caso, para além dos atributos agrônômicos, a variedade de cana-de-açúcar precisa necessariamente apresentar características apropriadas à finalidade industrial do engenho. Isso porque o objetivo principal da produção agrícola do sistema orgânico estudado é fornecer matéria-prima para a fabricação de cachaça orgânica com alto padrão de qualidade, diferentemente do sistema convencional, que tem como objetivo produzir material a granel para as grandes usinas de álcool e açúcar da região.

Não obstante, tais rendimentos médios da cana-de-açúcar não estão distintos dos valores observados em outros municípios do Nordeste e Rio de Janeiro, onde a produtividade fica em torno de 40 t/ha, ainda que bem abaixo de alguns municípios de São Paulo, Paraná, Minas Gerais e Goiás, cuja produtividade chega a 120 t/ha de cana-de-açúcar colhida, ou mais, a depender da idade dos canaviais (Ipea, 2016).

TABELA 9 – Biomassa seca de cana-de-açúcar em sistema convencional e orgânico – média de 5 anos.

| Sistema de produção | Parte aérea | | | | Raízes | | Matéria seca total (t/ha) |
|---------------------|-------------------------|-----|-------------------------|-----|-------------------------|-----|---------------------------|
| | Colhida | | Resíduo | | | | |
| | Matéria seca (t/ha/ano) | (%) | Matéria seca (t/ha/ano) | (%) | Matéria seca (t/ha/ano) | (%) | |
| Convencional | 17,60 | 78 | 1,47 | 7 | 3,36 | 15 | 22,42 |
| Orgânico | 11,19 | 47 | 9,14 | 38 | 3,59 | 15 | 23,91 |

FONTE: Os autores.

A biomassa acumulada da vegetação perene no sistema de produção orgânico foi 23% maior do que o sistema convencional (Tabela 10). Esses dados refletem o resultado de um esforço feito no sistema orgânico para a recuperação das áreas que estavam em estágio avançado de degradação e inaptas para atividades agrícolas. Esse fato tem auxiliado, de forma visível, o ressurgimento de nascentes de água na propriedade, o aumento significativo da fauna local, o incremento na qualidade do solo, além de melhorar o equilíbrio do microclima local. Tudo isso proporcionou a utilização da área para trilhas e caminhadas de visitantes que frequentam o local em atividades educativas e turísticas.

No sistema convencional, também chamou a atenção a pequena contribuição da biomassa produzida pelas plantas adventícias em relação ao sistema orgânico (Tabela 10). Isso está relacionado ao fato de ter sido utilizado herbicida para o controle das plantas adventícias, associado às queimadas regulares no sistema convencional ao longo dos cinco anos de cultivo. Ambas as práticas diminuíram a quantidade de biomassa das plantas adventícias no canavial convencional, afetando negativamente não só a quantidade de biomassa residual não colhida, que é uma importante fonte de alimento para

animais silvestres e para a biodiversidade do local, mas também ao eliminar grande parte da biomassa vegetal que poderia ser reaproveitada para melhorar a fertilidade do agroecossistema. Consequentemente, com a diminuição das plantas adventícias, as suas raízes deixaram de contribuir com a melhoria química, física e microbiológica do solo.

Por outro lado, no sistema orgânico, que não fez uso de herbicidas nem de queimadas, a contribuição da biomassa das plantas adventícias foi bastante significativa, correspondendo a 13% da PPL, enquanto no sistema convencional esse valor foi de apenas 3%. Também pode-se perceber no sistema orgânico uma maior proporção de biomassa advinda da vegetação perene (11%) em relação ao sistema convencional (Figura 1).

No caso do sistema convencional, alguns fatores, tais como irrigação, plantio adensado, uso intensivo de fertilizantes e corretivos do solo, favoreceram os maiores índices de produtividade, comparativamente ao sistema orgânico.

Contudo, em que pese os aumentos momentâneos da produtividade proporcionados pelo uso de fertilizantes sintéticos, isso requer altos custos energéticos para que esses produtos sejam fabricados, assim como poderão causar sérios prejuízos à biodiversidade do local.

TABELA 10 – Biomassa seca de plantas adventícias e perenes em sistema convencional e orgânico – média de 5 anos.

| Sistema de produção | Parte aérea | | Raízes | | Matéria seca total (t/ha) |
|----------------------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------------|
| | Matéria seca (t/ha) | Porcentagem (%) | Matéria seca (t/ha) | Porcentagem (%) | |
| <i>Plantas adventícias</i> | | | | | |
| Convencional | 0,35 | 56 | 0,28 | 44 | 0,63 |
| Orgânico | 2,24 | 56 | 1,79 | 44 | 4,03 |
| <i>Plantas perenes</i> | | | | | |
| Convencional | 19,92 | 83 | 4,08 | 17 | 24,00 |
| Orgânico | 26,09 | 83 | 5,34 | 17 | 31,43 |

FONTE: Os autores.

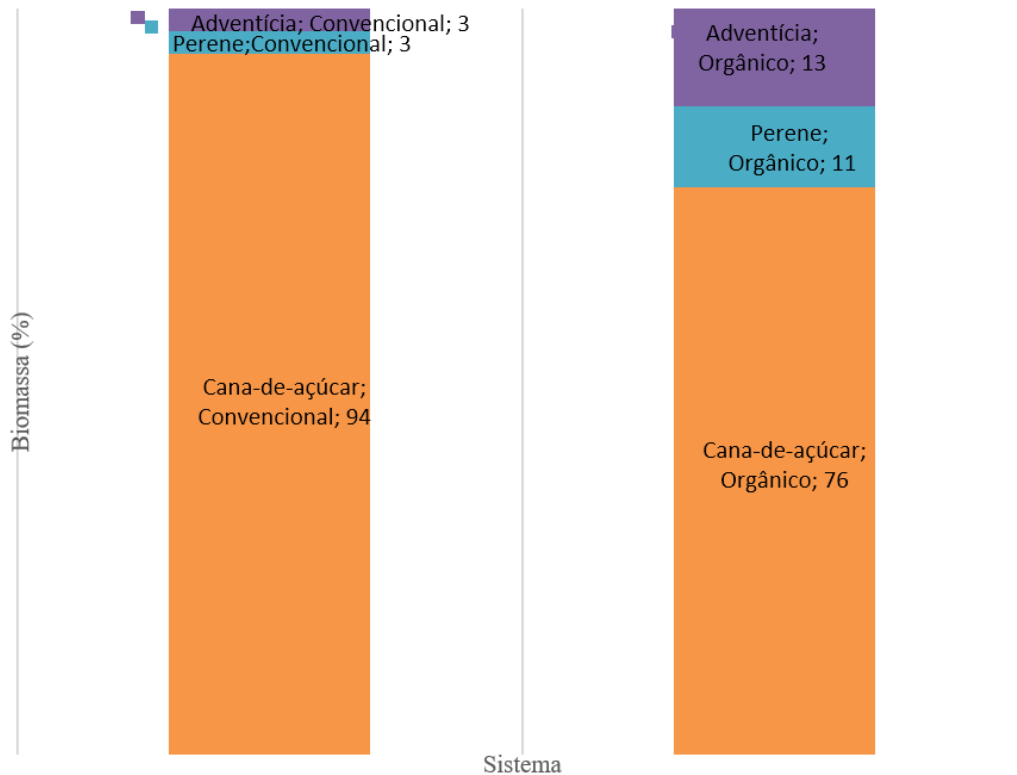


FIGURA 1 – Distribuição da produtividade primária líquida em tipos de vegetação no sistema de produção de cana-de-açúcar convencional e orgânico.

FONTE: Os autores.

Portanto, recomenda-se que esse uso seja reduzido não só com técnicas de aplicação que diminuam as suas perdas, mas também através do uso de adubação verde, de compostos orgânicos ou mesmo pela fixação biológica de nitrogênio com o uso de leguminosas (Pelletier *et al.*, 2011).

3.2. Análise da produtividade de energia bruta da cana-de-açúcar

A produtividade de energia bruta do material colhido no sistema convencional superou em mais

de 50% aquela apresentada pelo sistema orgânico, devido à grande diferença na produtividade agrícola entre os dois sistemas. No entanto, verificou-se que a energia total do sistema orgânico é mais de 8% maior do que a do sistema convencional (Tabela 11), principalmente, pelo fato deste último ter eliminado grande parte do seu resíduo na forma de palhada com o uso de queimadas.

Assim, no sistema orgânico, a proporção entre a energia bruta da biomassa colhida (46%) e das outras porções vegetais avaliadas, ou seja, do resíduo da parte aérea (39%) e das raízes (15%), revelou-se mais equilibrada, ao passo que essa relação no siste-

ma convencional foi mais desproporcional em termos de energia bruta, pois a energia da biomassa da parte aérea representou 78% da energia bruta total comparativamente aos demais materiais vegetais relacionados ao cultivo da cana-de-açúcar, tais como resíduo da parte aérea (7%) e raízes (15%). Esses 78% da energia bruta encontrados na biomassa da parte aérea colhida referem-se à porção que saiu do sistema para ser usada pela sociedade (Tabela 11).

Contudo, a saída de energia dessa magnitude poderá trazer consequências negativas para a sustentabilidade deste sistema produtivo e indica, em algum grau, uma crescente necessidade de suprir os nutrientes que foram retirados do solo pelas plantas colhidas, bem como uma limitação para os requisitos que contribuem para o equilíbrio ecológico do local. Ou seja, se a quantidade de energia remanescente num agroecossistema for reduzida, o número de espécies que nele vivem também diminuirá, afetando negativamente a sua biodiversidade.

Portanto, para que esse sistema não entre em colapso, deverá haver, por um lado, uma reposição dessa energia que saiu na forma de produção agrícola e, por outro lado, o estabelecimento dos limites da capacidade de manutenção não apenas da sociedade humana, mas de todas as populações heterotróficas que dependem desses mesmos recursos (Guzmán *et al.*, 2014).

Ademais, os baixos valores energéticos atribuídos ao resíduo da parte aérea e às raízes da cana-de-açúcar produzida no sistema convencional, associados à baixa energia total das plantas adventícias (Tabelas 12), podem comprometer os mecanismos de manutenção dos elementos de fundo⁶ (solo, água, biodiversidade, etc.) que o constituem, e, portanto, a capacidade desse sistema produtivo de gerar fluxos de serviços ecossistêmicos (Guzmán *et al.*, 2017). Por exemplo, apenas a biomassa pode alimentar as cadeias alimentares que sustentam a vida no solo e a biodiversidade geral do agroecossistema.

TABELA 11 – Energia bruta da cana-de-açúcar em sistema convencional e orgânico - média de 5 anos.

| Sistema de produção | Parte aérea | | | | Raízes | | Energia Total (GJ/ha/ano) |
|---------------------|---------------------------|-----|---------------------------|-----|---------------------------|-----|---------------------------|
| | Colhida | | Resíduo | | | | |
| | Energia bruta (GJ/ha/ano) | (%) | Energia bruta (GJ/ha/ano) | (%) | Energia bruta (GJ/ha/ano) | (%) | |
| Convencional | 301,95 | 78 | 26,17 | 07 | 59,02 | 15 | 387,15 |
| Orgânico | 192,03 | 46 | 163,10 | 39 | 63,05 | 15 | 418,18 |

FONTE: Os autores.

TABELA 12 – Energia bruta de plantas adventícias e perenes em sistema convencional e orgânico – média de 5 anos.

| Sistema de produção | Parte aérea | | Raízes | | Energia total (GJ/ha/ano) |
|----------------------------|---------------------------|-----|---------------------------|-----|---------------------------|
| | Energia bruta (GJ/ha/ano) | (%) | Energia bruta (GJ/ha/ano) | (%) | |
| <i>Plantas adventícias</i> | | | | | |
| Convencional | 6,18 | 56 | 4,95 | 44 | 11,13 |
| Orgânico | 39,32 | 56 | 31,45 | 44 | 70,77 |
| <i>Plantas perenes</i> | | | | | |
| Convencional | 11,64 | 83 | 2,45 | 17 | 14,09 |
| Orgânico | 50,66 | 83 | 10,64 | 17 | 61,30 |

FONTE: Os autores.

Esses resultados (Tabela 12) corroboram a ideia de superioridade energética do ponto de vista agroecológico do sistema orgânico, comparativamente ao sistema convencional, pois revela que, em termos de energia bruta da vegetação perene, o sistema orgânico superou em mais de quatro vezes a produção do sistema convencional, conforme fica visível na Figura 2.

Além disso, vale destacar a possível dificuldade do sistema convencional em repor de forma natural os nutrientes exportados, pois a quantidade de biomassa que ficou no sistema é muito baixa. E isso irá interferir na manutenção da biodiversidade de espécies, na qualidade do solo, assim como no fornecimento de serviços ambientais fundamentais para a manutenção da sustentabilidade do sistema de produção.

3.3. Análise dos fluxos de materiais e de energia

A produção de biomassa socializada foi maior no sistema convencional do que no sistema orgânico (Figura 3). Contudo, o inverso ocorreu em termos de biomassa reutilizada, subterrânea não colhida e acumulada, fato que refletiu na superioridade da PPL total do sistema orgânico.

Essa superioridade do sistema orgânico, em termos de biomassa circulada, se deve, em parte, ao fato de que cerca de 20% do bagaço da cana-de-açúcar foi considerado como biomassa reutilizada a partir do segundo ano de cultivo. O mesmo ocorreu em relação ao material de propagação que foi produzido na propriedade e utilizado para aumentar as áreas de cultivo nos anos seguintes e que, desse modo, também retornou para o sistema como biomassa reutilizada.

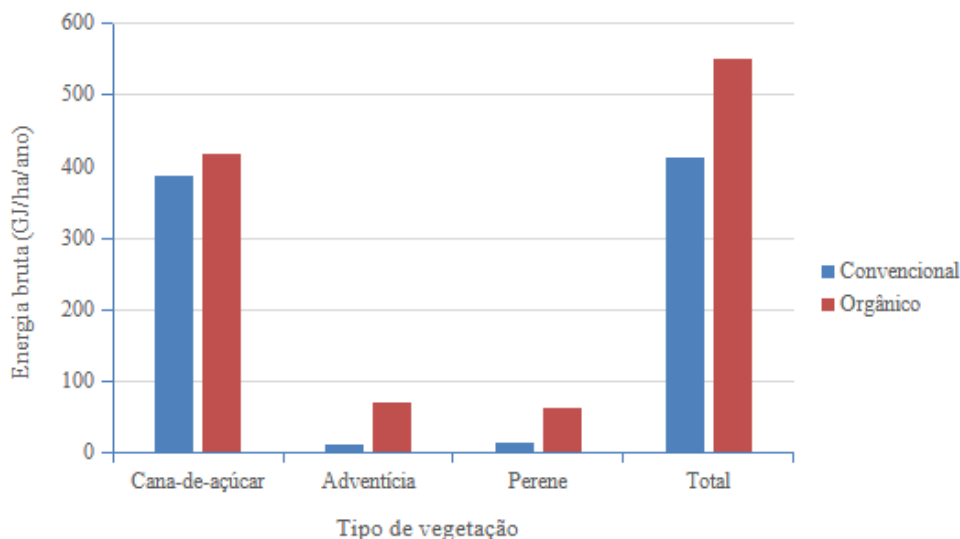


FIGURA 2 – Produtividade de energia bruta do sistema de produção convencional e orgânico.

FONTE: Os autores.

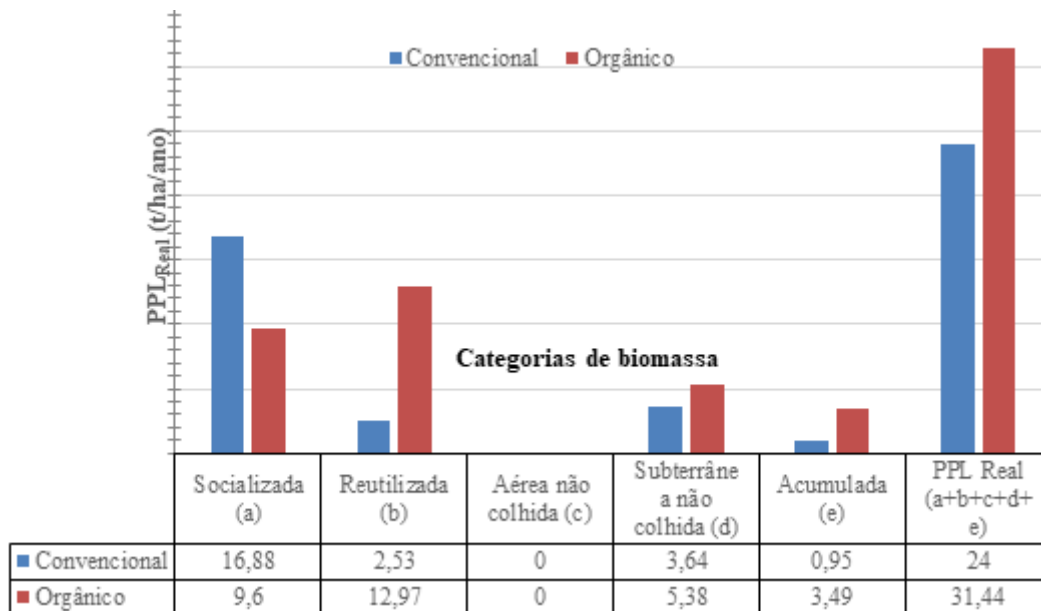


FIGURA 3 – Partição da produtividade primária líquida de cana-de-açúcar nos sistemas convencional e orgânico.

FONTE: Os autores.

Exceção se verificou em relação à biomassa aérea não colhida, cujo valor atribuído a ambos os sistemas foi zero, uma vez que essa porção foi queimada no convencional e redistribuída no orgânico. Ou seja, para efeito do presente estudo, as cinzas resultantes da queima no sistema convencional foram desconsideradas do ponto de vista energético, ao passo que, no sistema orgânico, o material da parte aérea atuou como cobertura morta e passou a fazer parte da biomassa reutilizada. Esses dados são importantes quando relacionados aos efeitos sobre a biodiversidade do local, uma vez que esse material não colhido é uma fonte necessária de alimento para a fauna silvestre do local.

A biomassa socializada representou 70% da biomassa produzida no sistema convencional e 31% no sistema orgânico, respectivamente (Figura 4).

Isso equivale a dizer que a maior parte do material vegetal que foi produzido no modelo convencional saiu do sistema, e, no caso do modelo orgânico, recirculou e/ou foi acumulado no agroecossistema. Isso acarretou consequências diretas sobre a estrutura dos sistemas, ainda que de formas distintas. Pois tais efeitos foram negativos no sistema convencional, com a perda de nutrientes do solo e da energia disponível para a cadeia trófica, e positiva no sistema orgânico, com a menor dependência de insumos externos para fins de fertilidade do solo e equilíbrio ecológico do sistema agrícola. Ademais, essa maior proporção da biomassa reutilizada e da não colhida subterrânea que passaram a recircular no sistema orgânico implicaram um incremento das suas funções ecossistêmicas e na dinâmica socio-metabólica como um todo.

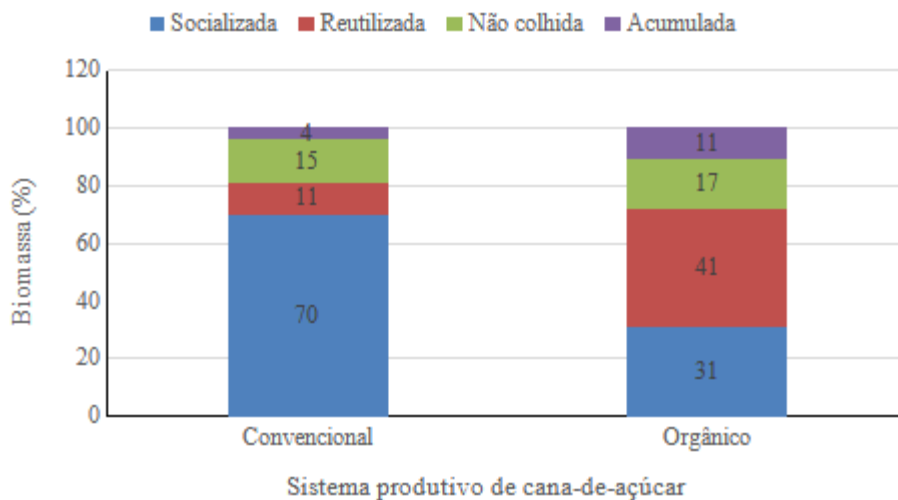


FIGURA 4 – Percentagem das categorias de biomassa da produtividade primária líquida de cana-de-açúcar no sistema convencional e orgânico. FONTE: Os autores.

A biomassa socializada de cana-de-açúcar esteve diretamente relacionada com uma vegetação agrícola uniforme, com baixa diversidade biológica, pois em um canavial em monocultivo, geralmente não há estrutura ecológica para muitos seres vivos habitarem. Em outro estudo em que foram desenvolvidos e aplicados indicadores de sustentabilidade para esses mesmos agroecossistemas (Menezes Neto *et al.*, 2017), ficou evidente a limitação da dimensão ambiental em ambos os sistemas de produção, especialmente por adotarem o modelo monocultural de cana-de-açúcar. Não obstante, tais efeitos do monocultivo refletiram de maneira distinta nos diferentes sistemas. No sistema convencional, a sua maior proporção de biomassa socializada esteve associada ao uso intensivo de irrigação, fertilizantes e de herbicidas. Já no caso do sistema orgânico, para o qual não ocorreu a aplicação de adubos sintéticos e tampouco herbicidas, bem como existiu uma condição para que algumas plantas adventícias coexistissem com a cultura agrícola, pode-se considerar que ocorreu

uma minimização dos impactos negativos sobre a biodiversidade, em relação ao primeiro.

Ademais, no sistema orgânico, a aplicação de adubação rica em matéria orgânica na forma de composto e o uso de algumas práticas conservacionistas, como por exemplo, a cobertura morta, beneficiou a microfauna do solo e forneceu um serviço importante para a nutrição vegetal, incrementando também a biodiversidade edáfica. Por sua vez, a biomassa acumulada na vegetação perene propiciou condições que favoreceram uma maior biodiversidade e, conseqüentemente, mais serviços ambientais. Isso envolve o aumento de inimigos naturais controladores de pragas agrícolas, favorecimento dos ciclos biogeoquímicos e melhora na regulação hídrica do local.

Na Tabela 13 são apresentados os valores energéticos brutos, na forma de categorias de biomassa (GJ/ha/ano) dos sistemas convencional e orgânico. Dessa forma, foi possível calcular, para fins comparativos, as relações entre as energias brutas das categorias de biomassa de cana-de-açúcar

do sistema convencional para o sistema orgânico. Com isso, foi possível analisar com mais clareza a proporção em percentual entre as respectivas partições de biomassa em ambos os sistemas.

Os dados deixam visível a superioridade do sistema orgânico sobre o sistema convencional em termos de produção de biomassa em valores energéticos. A exceção foi em relação aos valores da biomassa socializada, que indica, para o sistema convencional, uma produtividade média 177 % maior que o sistema orgânico (Tabela 13). No entanto, esse resultado foi obtido à custa de um intenso gasto energético com insumos externos ao

longo do ciclo produtivo da cana-de-açúcar. Assim, a partir dos resultados comparativos dos dois sistemas pesquisados, pode-se afirmar que o sistema convencional se comporta mais como exportador de biomassa e consumidor de energia externa, ao passo que o sistema orgânico pode ser considerado como um sistema mais conservador de energia.

A Figura 5 apresenta um diagrama com a representação esquemática do fluxo energético das diferentes categorias de biomassa nos dois sistemas pesquisados, o que mostra a inter-relação entre a natureza (agroecossistema) e a sociedade, que é a base de estudo do Metabolismo Social Agrário.

TABELA 13 – Energia bruta das categorias de biomassa de cana-açúcar no sistema de produção convencional e orgânico e percentual da relação das energias brutas das categorias de biomassa de cana-de-açúcar do sistema convencional para o sistema orgânico.

| Categorias de biomassa | Sistema de produção | | Relação Convencional/Orgânico (%) |
|---|--------------------------|----------------------|-----------------------------------|
| | Convencional (MJ/ha/ano) | Orgânico (MJ/ha/ano) | |
| PPL _{Real} (a + b + c + d + e) | 412,36 | 550,25 | 75 |
| Biomassa socializada (a) | 289,71 | 163,40 | 177 |
| Biomassa reutilizada (b) | 44,59 | 231,05 | 19 |
| Biomassa não colhida (c + d) | 63,97 | 94,50 | 68 |
| Biomassa aérea não colhida (c) | - | - | - |
| Biomassa subterrânea não colhida (d) | 63,97 | 94,50 | 68 |
| Biomassa reciclada (b + c + d) | 108,562 | 325,55 | 33 |
| Biomassa acumulada (e) | 14,09 | 61,30 | 23 |

FONTE: Os autores.

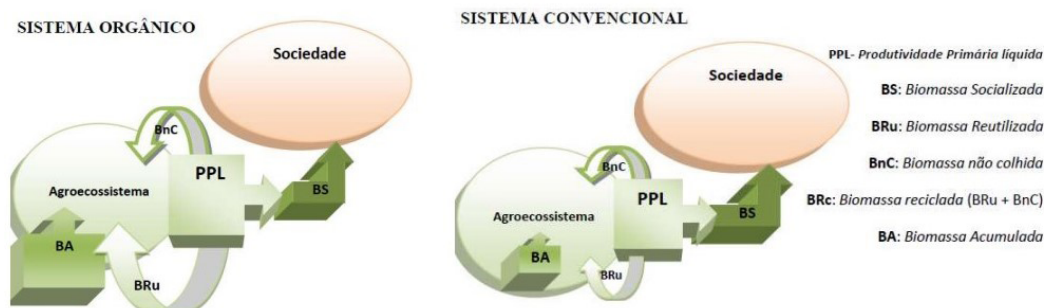


FIGURA 5 – Representação esquemática do fluxo energético da produtividade primária líquida nos sistemas de produção de cana-de-açúcar convencional e orgânico.

FONTE: Os autores.

4. Considerações finais

Do ponto de vista dos interesses do mercado, a agricultura ganhou eficiência e produtividade com as mudanças técnicas que surgiram durante a história moderna. Isso significou atender a um número cada vez maior de necessidades humanas a partir da apropriação da fração colhível da PPL. Razão pela qual os estudos sobre o fluxo energético na agricultura, em sua maioria, têm se preocupado, principalmente, com a parte colhida das plantas cultivadas, enquanto a biomassa das raízes e os resíduos das culturas são frequentemente ignorados.

Contudo, quando analisada do ponto de vista da sustentabilidade e da análise da eficiência energética, uma maior proporção do fluxo da PPL desviada para o consumo humano pode implicar uma redução dos fluxos de biomassa que acontecem internamente nos agroecossistemas. Logo, a tendência para baixas reutilizações dos restos internos da biomassa torna-se insustentável quando põe em risco o investimento energético necessário para recursos importantes do agroecossistema que promovem, por exemplo, a fertilidade do solo (proteção contra a erosão, aumento da matéria orgânica e de micro-organismos importantes do solo), a manutenção da biodiversidade e outros serviços ecossistêmicos. Ademais, a PPL é a base sobre a qual as cadeias alimentares são construídas e, portanto, é ela que estabelece os limites da capacidade de manutenção das populações heterotróficas presentes no sistema.

Uma vez que a parte não colhida ou não retirada do agroecossistema cumpre funções ecológicas importantes, sua quantificação precisa ser valorizada. Para isso, foram desenvolvidos fatores de conversão que permitiram calcular a biomassa total da cana-de-açúcar produzida no agroecossistema a

partir de dados da produção. Esses índices também possibilitaram converter a biomassa fresca em biomassa seca e transformar a biomassa em valores de energia bruta. Além disso, foram criados fatores de conversão que relacionaram as diferentes partes da planta (raiz, parte colhida, parte aérea).

Portanto, o itinerário metodológico utilizado neste trabalho possibilitou não só a quantificação de toda a biomassa vegetal e da energia nela contida, mas também a sua categorização em partições diferenciadas de acordo com o seu papel na dinâmica biofísica dos agroecossistemas pesquisados.

A pesquisa fundamentou-se tanto nos princípios da Agroecologia quanto no enfoque do Metabolismo Social Agrário para seu embasamento teórico-metodológico. Isso permitiu uma compreensão mais ampla sobre o papel de cada uma das diferentes porções da PPL nos agroecossistemas, tanto na forma de biomassa quanto de energia.

Os resultados da pesquisa identificaram que a produtividade de energia bruta do material colhido no sistema convencional superou em mais de 50% aquela apresentada pelo sistema orgânico. No entanto, em termos de matéria seca total, o sistema orgânico apresentou uma produtividade maior, sendo sua energia total mais de 8% maior do que a do sistema convencional. Isso ocorreu devido à grande contribuição da biomassa do resíduo agrícola deixado pela cana-de-açúcar no sistema orgânico, que também teve a contribuição de sua vegetação perene, que foi 23% maior do que a do sistema convencional, ampliando os benefícios ecológicos.

Houve um pequeno retorno de biomassa para o agroecossistema do modelo convencional, quer seja pela pouca contribuição das plantas adventícias, causada pelo uso de herbicida, quer seja pela queima das folhas da cana antes da colheita. Isso implicou

dificuldade desse sistema em repor de forma natural os nutrientes do solo e de manter a biodiversidade de espécies no local. Ou seja, os baixos valores energéticos atribuídos ao resíduo da parte aérea, associados à baixa energia total das plantas adventícias, podem comprometer os mecanismos de manutenção dos elementos do fundo desse sistema de produção e o fornecimento de serviços ambientais fundamentais para a manutenção da sua sustentabilidade.

Os fluxos de materiais e de energia indicaram que, no sistema convencional, o fornecimento de biomassa para a sociedade representou 70% da biomassa produzida, ao passo que no sistema orgânico foi apenas 31%. Isso significa que a maior parte do que foi produzido no modelo convencional saiu do sistema, ao contrário do modelo orgânico, em que boa parte da biomassa recirculou ou foi acumulada no agroecossistema. Disso pode-se concluir que o sistema convencional se comportou como exportador e consumidor de energia, ao passo que o sistema orgânico pode ser considerado como um sistema conservador de energia.

Ficou evidente a relevância de se quantificar toda a PPL em vez de considerar apenas o que é colhido nas safras, visto que conhecer as outras porções da biomassa produzida, ou seja, o que foi reutilizado ou reciclado internamente nos sistemas produtivos agrícolas, permitiu uma melhor compreensão sobre o grau de equilíbrio energético interno aos agroecossistemas. Por exemplo, a proporção entre a energia bruta da biomassa colhida (46%) e as outras porções vegetais avaliadas revelou-se mais equilibrada no sistema orgânico e desproporcional no sistema convencional, que teve 78% de sua energia bruta total quantificada como biomassa colhida. E a partir de tais resultados, tornou-se possível conhecer e analisar informações sobre

mudanças estruturais e funcionais que podem afetar a manutenção dos serviços ecossistêmicos que os agroecossistemas podem proporcionar, bem como identificar seus limites e potencialidades, de modo a auxiliar nas tomadas de decisão para que resultem em sistemas mais equilibrados ecologicamente.

Por fim, vale sugerir a realização de estudos envolvendo o uso do Metabolismo Social Agrário para, por exemplo, determinar indicadores de eficiência energética na agricultura tanto em escalas mais amplas, seja em nível regional ou nacional, quanto em contextos mais complexos, como pesquisas em sistemas agroflorestais ou policultivos em unidades produtivas camponesas, de modo a melhor compreender o grau de sustentabilidade da relação sociedade e natureza. Tais estudos também podem ser feitos utilizando-se dados históricos envolvendo as transformações metabólicas da agricultura tradicional para a agricultura industrializada, os efeitos das mudanças climáticas no campo, ou mesmo para construir propostas de transição agroecológica com vistas a alcançar padrões mais elevados de sustentabilidade tanto ao nível de agroecossistema quanto de sistemas agroalimentares.

Agradecimentos

Nossos sinceros agradecimentos ao professor e colega Francisco Roberto Caporal (in memoriam), pela inestimável amizade e colaboração na concepção e elaboração do presente artigo. Agradecemos também aos agricultores pela generosidade com que receberam os pesquisadores e pela gentileza de fornecerem os dados necessários para a realização da pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

- Almagro, M.; López, J.; Boix-Fayos, C.; Albaladejo, J.; Martínez-Mena, M. Belowground carbon allocation patterns in a dry Mediterranean ecosystem: a comparison of two models. *Soil Biology and Biochemistry*, 42, 1549-1557, 2010. doi: 10.1016/J.SOILBIO.2010.05.031
- Assis, L.; Romeiro, A. R. Agroecologia e agricultura orgânica: controvérsias e tendências. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, 6, 67-80, 2002. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/made/article/viewFile/22129/14493>
- Caporal, F. R. Agroecologia: uma nova ciência para apoiar a transição a agriculturas mais sustentáveis. In: Faleiro, F. G.; Farias Neto, A. L. de (Orgs.). *Savanas: desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais*. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2008. p. 895-929. Disponível em: <https://repositorio.ifs.edu.br/biblioteca/handle/123456789/1305>
- Carvalho, E. X. *Ciclagem de nitrogênio e estimativa de biomassa de cana-de-açúcar em Pernambuco*. Recife, Tese (Doutorado em Ciências) – UFPE, 2015.
- Faroni, C. E. *Sistema radicular de cana-de-açúcar e identificação de raízes metabolicamente ativa*. Piracicaba, Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/USP, 2004.
- Gliessman, S. R. Desde una agricultura sostenible a sistemas agroalimenticios sostenibles In: Gliessman, S. R. *Agroecología*. Procesos ecológicos en agricultura sostenible. Turrialba: CATIE: 2002. P. 319-329.
- Gliessman, S. R.; Rosado-May, F. J.; Guadarrama-Zugasti, C.; Jedlicka, J.; Cohn, A.; Mendez, V. E.; Cohen, R.; Trujillo, L.; Bacon, C.; Jaffe, R. Agroecología: promoviendo una transición hacia la sostenibilidad. *Ecosistemas*, 16(1), 13-23. 2007. Disponível em: <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/134>
- González de Molina, M. *Introducción a la agroecología*. Cuadernos técnicos SEAE. Sevilla: Sociedad Española de Agricultura Ecológica, 2011.
- González de Molina, M.; Toledo, V. *Metabolismos, naturaleza e historia: hacia una teoría de las transformaciones socioecológicas*. Barcelona: Icaria, Perspectivas Agroecológicas, 2011.
- Guzmán, G. I.; Aguilera, E.; Soto, D.; Cid A.; Infante-Amate, J.; García Ruiz, R.; Herrera, A.; Villa, I.; González de Molina, M. *Methodology and conversion factors to estimate the net primary productivity of historical and contemporary agroecosystems*. Sevilla: Sociedad Española de Historia Agraria, 2014.
- Guzmán, G. I.; González de Molina, M. M. Energy efficiency in agrarian systems from an agroecological perspective. *Agroecology Sustainable Food System*, 39, 924-952, 2015. doi: 10.1080/21683565.2015.1053587
- Guzmán, G. I.; Aguilera, E.; Soto, D.; Cid, A.; Infante-Amate, J.; García Ruiz, R.; Herrera, A.; Villa, I.; González de Molina, M. *Spanish agriculture from 1900 to 2008: a long-term perspective on agroecosystem energy from an agroecological approach*. Verlag, Berlin Heidelberg: Springer, 2017.
- Haberl, H.; Erb, K.-H.; Krausmann, F. Human appropriation of net primary production: patterns, trends, and planetary boundaries. *Annual Review of Environment and Resources*, 39, 363-391, 2014. doi: 10.1146/annurev-environ-121912-094620
- Hassuani, S. J. Evaluation of agronomic routes to unburned cane harvesting with trash recovery. In: Hassuani, S. J. et al. (Orgs.). *Biomass power generation: sugar cane bagasse and trash*. Piracicaba: PNUD-CTC, 2005.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Indicadores: Estatística da Produção Agrícola*, 2013. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/>
- Leal, M. R. L. V. Evolução tecnológica do processamento da cana-de-açúcar para etanol e energia elétrica. In: Cortez, L. A. B. *Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para a pro-*

atividade e sustentabilidade. São Paulo: Blucher, 2010. p. 561-576.

Mascarenhas, J. C.; Beltrão, B. A.; Souza Junior, L. C. Trindade, M. J.; Galvão, S. N.; Miranda, J. L. F. *Diagnóstico do município de Chã Grande, estado de Pernambuco*. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005.

Menezes Neto, J. B.; Mattos, J. L. S.; Caporal, F. R. Comparação entre sistemas de produção orgânico e convencional de cana-de-açúcar, utilizando indicadores de sustentabilidade de agroecossistemas. In: *Anais do Congresso Internacional Interdisciplinar em Extensão Rural e Desenvolvimento da UNIVASF*, Juazeiro, 30 de Out., 2017. Disponível em: <<https://www.even3.com.br/anais/ciierd2017/69624-COMPARACAO-ENTRE-SISTEMAS-DE-PRODUCAO-ORGANICO-E-CONVENCIONAL-DE-CANA-DE-ACUCAR-UTILIZANDO-INDICADORES-DE-SUSTENT>>. Acesso em: mai. 2022.

Menezes Neto, J. B.; Mattos, J. L. S.; Caporal, F. R. Análise da dinâmica energética de agroecossistemas. *Extensão Rural*, 25, 73-88, 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/extensaorural/article/view/32691/pdf>.

Pelletier, N.; Audsley, E.; Brodt, S.; Garnett T.; Henriksson P.; Kendall A. Energy intensity of agriculture and food systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 36, p. 1-24, 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/journal/Annual-Review-of-Environment-and-Resources-1545-2050>

Pierossi, M. A.; Fagundes, S. A. Enfardamento da palha. In: Santos, F.; Borém, A. (Orgs.). *Cana-de-açúcar: do plantio à colheita*. Viçosa: UFV, 2013. p. 245-257.

Santiago, A. D.; Rossetto, R. *Árvore do conhecimento: cana-de-açúcar - Rotação e reforma*. Brasília: Agência Embrapa de Informação Tecnológica. EMBRAPA, 2009. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_75_22122006154841.html>. Acesso em: mar. 2020

Soto, D.; Infante-Amate, J.; Guzmán, G.; Cid, A.; Aguilera, E.; García, R.; González de Molina, M. The social metabolism of biomass in Spain, 1900-2008: from food to feed-oriented changes in the agro-ecosystems. *Ecological Economics*, 128, 130-138. 2016. doi: 10.1016/j.ecolecon.2016.04.017

Tasso Júnior, L. C. *Caracterização agrotecnológica de cultivares de cana-de-açúcar (Saccharum spp.) na região centro-norte do estado de São Paulo*. 2007. São Paulo. Tese (doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2007.

Tello, E.; Galán, E.; Cunfer, G.; Guzmán, G. I.; González de Molina, M.; Krausmann, F.; Gingrich, S.; Sacristán, V.; Marco, I.; Padró, R.; Moreno-Delgado, D. A proposal for a workable analysis of energy return on investment (REI). In: *Agroecosystems*. Part I: analytical approach. Social Ecology Working Paper. Vienna: Institute of Social Ecology, 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/2117/77586>

Vasconcelos, A. C. M. *Desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita*. Jaboicabal, Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, 2002.