

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**COLHEITA MECANIZADA DE BIOMASSA FLORESTAL:
DESEMPENHO OPERACIONAL E ECONÔMICO**

GUILHERME OGURI

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP - Campus de
Botucatu, para obtenção do título de Doutor
em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU – SP
Julho – 2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**COLHEITA MECANIZADA DE BIOMASSA FLORESTAL:
DESEMPENHO OPERACIONAL E ECONÔMICO**

GUILHERME OGURI

Orientador: Prof. Dr. SAULO PHILIPPE SEBASTIÃO GUERRA

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP - Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Energia na Agricultura).

BOTUCATU – SP
Julho – 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Oguri, Guilherme, 1984-
O35c Colheita mecanizada de biomassa florestal: desempenho operacional e econômico / Guilherme Oguri. - Botucatu : [s.n.], 2016
vi, 55 f. : fots. color., grafs., ils. color., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2016
Orientador: Saulo Philipe Sebastião Guerra
Inclui bibliografia

1. Biomassa. 2. Florestas - Produtividade. 3. Rotação de cultivos. 4. Economia florestal. 5. Mecanização florestal. I. Guerra, Saulo Philipe Sebastião. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "COLHEITA MECANIZADA DE BIOMASSA FLORESTAL: DESEMPENHO OPERACIONAL E ECONOMICO"


AUTOR: GUILHERME OGURI

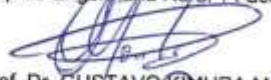
ORIENTADOR: SAULO PHILIFE SEBASTIÃO GUERRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. SAULO PHILIFE SEBASTIÃO GUERRA
Dep de Economia, Sociologia e Tecnologia / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu


Prof. Dra. MAURA SEIKO TSUTSUI ESPERANCINI
Dep de Economia, Sociologia e Tecnologia / Faculdade de Ciências Agrônomicas - UNESP


Prof. Dr. KLEBER PEREIRA LANÇAS
Dep de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrônomicas - UNESP


Prof. Dr. GUSTAVO KIMURA MONTANHA
Depto de Tecnologia em Agronegócio / FATEC


Prof. Dr. JOSÉ OTÁVIO BRITO
Departamento de Ciências Florestais - USP/ESALQ / ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA

Botucatu, 28 de julho de 2016.

“A ciência nunca resolve um problema sem criar pelo menos outros dez”.

(George Bernard Shaw, escritor e teatrólogo irlandês)

A minha família, Nelson, Luiza, Renata, Fábio, Fernando e Miguel, em especial
aos meus avós, Yasushi (*in memoriam*) e Mitsuko Ohata (*in memoriam*),
dedico esta tese.

Agradecimentos

Primeiramente, a Deus pelas bênçãos e proteção concedidas.

À Faculdade de Ciências Agrônômicas / UNESP – Campus de Botucatu e aos seus servidores que, diretamente ou indiretamente, me proporcionaram toda estrutura necessária para a minha formação. Em especial ao atual diretor e vice-diretor desta casa, Prof. Dr. João Carlos Cury Saad e Prof. Dr. Carlos Frederico Wilcken.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Saulo Philipe Sebastião Guerra, pelas constantes ajudas e conselhos nestes 11 anos de convivência.

Aos professores Kléber Pereira Lanças, José Otávio Brito, Maura Seiko Tsutsui Esperancini, José Raimundo de Souza Passos, Gustavo Kimura Montanha por todas as contribuições feitas na qualificação e defesa desta tese.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida.

A todos os docentes e servidores do Departamento de Economia, Sociologia e Tecnologia pelos conhecimentos, conselhos e risadas nestes anos de convivência diária.

À empresa Case New Holland (CNH) que disponibilizou as máquinas para avaliação, além do suporte técnico-mecânico, nas pessoas do Sr. Carlos Visconti, Dr. André Seki e ao engenheiro Luiz Ballestrin.

À toda equipe do LABB (Laboratório Agroflorestal de Biomassa e Bioenergia) – Emanuel, Sequoia, Pink, Jamico, Cabeça, Lobinho, Sereghetti, Gabriela, Carla, Caren, Magal e Manja – pela amizade, companheirismo e ajuda, fora e dentro do âmbito acadêmico.

À toda equipe do NEMPA (Núcleo de Ensaio de Máquinas e Pneus Agroflorestais), principalmente ao prof. Dr. Kléber Pereira Lanças, pelos ensinamentos e suporte.

Aos engenheiros Felipe de Córdova Machado, Romulo Leonardo da Silva e Eric Cunha, pela amizade e ajuda, tornando as nossas expedições mais produtivas.

Por último, mas não menos importante, à minha namorada Samara, que sempre ao meu lado, apoiou minhas decisões.

Meus mais sinceros agradecimentos a cada um.

SUMÁRIO

RESUMO	1
SUMMARY	2
1. INTRODUÇÃO GERAL	4
1.1 Sistema florestal de curta rotação (SFCR).....	4
1.2 Biomassa florestal.....	6
1.3 Estado da arte na colheita de SFCR.....	9
1.4 Economia Florestal	15
1.5 Referências.....	17
2. CAPÍTULO 1: Desempenho operacional de uma forrageira adaptada para plantios de curta rotação de eucalipto	22
2.1 Introdução	24
2.2 Material e métodos.....	26
2.3 Resultados	29
2.4 Discussão	34
2.5 Conclusões	38
2.6 Referências.....	38
3. CAPÍTULO 2: Avaliação econômica da colheita mecanizada de um sistema florestal de curta rotação (SFCR): estudo de caso.....	41
3.1 Introdução	43
3.2 Material e métodos.....	46
3.4 Resultados e discussões	50
3.5 Conclusões	52
3.6 Referências.....	53

RESUMO

O uso de forrageiras adaptadas para a colheita de biomassa florestal faz parte de um sistema de colheita consolidado em países da América do Norte e Europa, não existindo registro do seu uso em plantios florestais brasileiros. Estas máquinas são capazes de colher árvores inteiras e processá-las em cavacos, necessitando auxílio de um conjunto de transbordo acoplado ao trator para coleta e retirada dos cavacos da área de produção. Com o intuito de implantar esse novo sistema de colheita no Brasil, utilizou-se a forrageira New Holland FR9060 acoplada a plataforma florestal 130 FB da mesma fabricante em um sistema florestal de curta rotação (SFCR) de eucalipto. Este estudo foi dividido em dois capítulos sendo o primeiro, objetivando analisar o desempenho operacional desta colhedora por meio da determinação da capacidade de processamento da colhedora bem como o seu consumo de combustível. O segundo capítulo teve como objetivo avaliar economicamente este sistema de colheita utilizando tratores e transbordos para o transporte dos cavacos até a unidade consumidora. A forrageira atingiu uma capacidade de processamento entre 39 a 65 t h⁻¹, corroborando com estudos realizados na Europa e América do Norte. O custo total do sistema foi de, aproximadamente, € 258 h⁻¹ e € 19 t_{seca}⁻¹. Estes custos foram menores comparados com resultados de outros trabalhos da bibliografia que utilizaram o mesmo tipo de equipamento em países de clima temperado.

Palavras-chave: eucalipto; biomassa; produtividade; economia florestal

MECHANIZED HARVESTING OF FOREST BIOMASS: OPERATIONAL AND ECONOMIC PERFORMANCE. Botucatu, 2016. 53p. Tese (Doutorado em Agronomia / Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista

Author: Guilherme Oguri

Adviser: Prof. Dr. Saulo Philipe Sebastião Guerra

SUMMARY

Modified forager use for forest biomass production is already a consolidated system in European and North American countries. However, in Brazil, so far there are no records of using this harvesting system. These machines are able to cut the trees and produces wood chips in a single-pass process requiring a tractor-pulled silage trailer to collect the wood chips. The tests were conducted with a New Holland 9060 forager, equipped with a 130 FB energy wood header. This work were divided in two chapters, which the first one aimed to determine harvesting productivity and also fuel consumption. Second chapter focusing on an economic analysis of this harvesting system using tractors and silage wagons in order to carry the wood chips toward to mill. This machine was capable of negotiating all test fields, and reached a productivity between 39 and 65 t h⁻¹, which was comparable with the productivity figures recorded in Europe and North America. Total costs were € 258 h⁻¹ e

€ 19 t⁻¹, which were cheaper when compared to the literature studies that used the same machines in temperate countries.

Keywords: eucalypt; biomass; productivity; forest economy

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Sistema florestal de curta rotação (SFCR)

A prática silvicultural de curta rotação é muito utilizada em países de climas temperados para obtenção de biomassa com fins energéticos. Neste tipo de manejo são utilizadas espécies florestais de rápido crescimento e plantadas com alta densidade populacional. Os sistemas florestais de curta rotação (SFCR) são estudados desde meados de 1960 na Suécia e de 1980 no Reino Unido (MITCHELL et al., 1999). Estes autores, comentam sobre a crise do petróleo de 1970 que motivou a produção de espécies madeireiras de rápido crescimento tais como *Populus* spp. e *Salix* spp. com densidade de até 20.000 plantas por hectare. Por ser um dos países precursores na implantação dos SFCR, a Suécia projeta implantar mais de 100.000 ha visando a produção de energia por meio de espécies arbóreas, principalmente, do *Salix* (BALATINECZ et al., 2014). Os principais motivos para escolha desta espécie foram o alto potencial de produção, rebrota vigorosa, poucos problemas com pragas e alta capacidade de enraizamento.

Atualmente, além da Suécia, diversos países adotam o *Salix* como fonte de matéria-prima, tais como, Estados Unidos (SERAPIGLIA et al., 2013), Itália (BERNARDINI et al., 2015), Alemanha (HOFMANN-SCHIELLE et al., 1999), Dinamarca

(LARSEN et al., 2014). Pesquisadores sediados no Reino Unido implantaram uma vasta rede de plantios de *Salix* e *Populus* contendo 16 variedades de cada espécie em diversas regiões deste país (AYLOTT et al., 2008), comparando as duas espécies, o *Salix* obteve maior incremento médio anual (IMA) atingindo a média de 9 t ha⁻¹ ano⁻¹ contra 6 t ha⁻¹ ano⁻¹ dos genótipos de *Populus*. Entre as variedades de *Salix*, 15 aumentaram a sua produtividade da primeira para a segunda rotação (3 anos para cada rotação).

A utilização do *Populus* na Itália teve seu início por volta de 1935 devido ao aumento da demanda por madeira, porém, o sistema de curta rotação e o seu uso para geração de energia elétrica iniciou-se, aproximadamente, 60 anos depois (DE WIT et al., 2013). Atualmente, o país possui em torno de 6.500 ha de plantio lignocelulósicos (FACCIOTTO e PINAZZI, 2006) sendo a maior parte plantios adensados clonais de *Populus* colhidos em rotação bienal (FIALA e BACENETTI, 2012).

Na América do Sul, mais precisamente na Argentina, estima-se que existam por volta de 65.000 ha plantados de *Populus deltoides*, mas o seu uso principal não é a produção de energia e sim, serraria e laminação (CASAUBON et al., 2002). No Brasil pode-se encontrar alguns plantios desta espécie nos estados do Paraná e Santa Catarina onde são destinados, principalmente, para a produção de palitos de fósforo (DAL POGETTO e WILCKEN, 2012). O *Salix*, por sua vez, possui escassos relatos de plantios em solo brasileiro, um deles, como plantio experimental em Santa Catarina pesquisados por Rech et al. (2007). Essa concentração dos plantios de ambas espécies na região sul do Brasil se deve às temperaturas mais amenas que assemelham aos seus países de origem, assim como ocorre com o gênero de pinus nos dois estados citados que juntos concentram mais de 76% dos 1,6 milhão de hectares plantados (IBA, 2015).

Devido a fatores como clima e melhoramento genético, o eucalipto se tornou o gênero florestal mais plantado no Brasil adaptando-se as condições edafoclimáticas do país. Johnson et al. (2007) afirmaram que o eucalipto demanda menor quantidade de água e nutrientes comparado ao *Populus* e *Salix*.

Grande parte do material genético do eucalipto é originário da Austrália e países vizinhos (ex.: Indonésia e Filipinas). A Lei de Incentivos Fiscais de 1966 foi um impulsionador para a implantação de florestas plantadas no Brasil, tendo o eucalipto como o principal gênero (QUEIROZ, 2009). A partir desta época, houve uma priorização no setor de pesquisa e desenvolvimento por parte das empresas florestais brasileiras resultando em um aumento na produtividade florestal de 6% ao ano entre os anos de 1970 e 2014 conquistando o

topo do ranking mundial em produtividade, atingindo médias de 39 e 31 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ em plantios de eucalipto e pinus, respectivamente (IBA, 2015).

Em um estudo utilizando o eucalipto em um SFCR em diversas densidades de plantio e doses de adubação, Guerra et al. (2014) constataram que ambos são diretamente proporcionais a produtividade, ou seja, este gênero possui uma resposta positiva ao adensamento (SOCHACKI et al., 2013), atingindo valores de até 50 t ha⁻¹ ano⁻¹ no tratamento mais adensado (aprox. 7.150 plantas ha⁻¹) e alta dose de adubação. Este valor chega a ser dez vezes maior comparado aos relatos encontrados na bibliografia de outros países que utilizam o eucalipto em SFCR, inclusive plantios na Austrália onde o eucalipto é nativo (Tabela 1). O incremento da produtividade entre espécies pode chegar a até 40% como ocorreu no estudo realizado nos EUA (ROCKWOOD et al., 2006) e na Austrália (SOCHACKI et al., 2013), implantados na mesma época e com densidade populacional semelhantes.

Tabela 1. Produtividade em SFCR para diferentes espécies de eucalipto

Espécie	Localização	Produtividade (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Idade (anos)	Dens. pop. (plantas ha ⁻¹)	Referência
<i>E. urograndis</i> ^a	Brasil	50	2	7.150	GUERRA et al. (2014)
<i>E. grandis</i>	EUA	4,8 ^c	3,4	3.260 ^c	ROCKWOOD et al. (2006)
<i>E. amplifolia</i>		6,9 ^c	3,4	3.260 ^c	
<i>E. occidentalis</i>	Austrália	7,3	4	4.000	SOCHACKI et al. (2013)
<i>E. globulus</i>		5,3	4	4.000	
<i>E. gundal</i> ^b	França	14	3	2.500	GABRIELLE et al. (2013)
<i>E. gundal</i> ^b		10	7	5.000	
<i>E. botryoides</i>	Nova Zelândia	13,2	3	4.160	GUO et al. (2002)
<i>E. globulus</i>		21,5	3	4.160	
<i>E. ovata</i>		15,2	3	4.160	
<i>E. camaldulensis</i>	Itália	5,3	2	3.333	FACCIOTTO e NERVO (2011)
<i>E. globulus</i>		3,9	2	3.333	

Nota: ^a Híbrido de *E. grandis* e *E. urophylla*; ^b Híbrido de *E. gunni* e *E. dalrympleana*; ^c Dados aproximados

1.2 Biomassa florestal

A biomassa pode ser definida como um material orgânico seja de origem animal ou vegetal, sendo uma fonte de energia renovável utilizado em processos de combustão ou convertido para produção de calor ou eletricidade (DODIĆ et al., 2012). Sendo a biomassa oriunda de florestas uma das mais antigas fontes de energia que se tem conhecimento, ainda hoje é utilizada como matéria-prima para aquecimento de fornos (residencial ou industrial) em sua grande maioria na forma de carvão.

Atualmente, países europeus utilizam a biomassa oriunda de plantios florestais para suprir a demanda de energia elétrica, seja ela residencial ou industrial, diversificando a produção primária de energia. As espécies florestais mais utilizadas para este propósito são o populus (*Poplar spp.*) e o salgueiro, ou *willow*, (*Salix spp.*) como matéria-prima para combustão direta ou após ser beneficiada (*pellets* ou briquetes). Neste contexto, a União Europeia por meio da diretiva conhecida como 20-20-20, objetiva que os países integrantes tenham uma parcela de, no mínimo, 20% da sua matriz energética oriunda de fontes renováveis, reduzir a emissão de gases estufas em 20% e aumentar a eficiência energética poupando 20% do consumo energético até o ano de 2020 (TOL, 2012) com intuito de diminuir a utilização de combustíveis fósseis (TESTA et al., 2014).

No Brasil, existem 49 usinas termelétricas ativas e mais 5 usinas em construção que utilizam resíduos florestais (lenha, cavaco ou serragem) totalizando uma potência instalada de 383.300 kW, contudo, estima-se que até 2020 a demanda de lenha para geração energia alcance 70 milhões de m³ (EPE, 2016). O Brasil não possui uma expressiva produção de briquetes se comparado com países europeus, parte pela falta de um programa de incentivo adequado e parte pelas dificuldades no uso de resíduos agrícolas e florestais (FELFLI et al., 2011). Atualmente, existem cerca de 80 fábricas de briquetes ativas que abastecem a demanda de pizzarias, padarias e caldeiras industriais (GUERRA et al., 2014).

O beneficiamento da madeira em briquetes e *pellets* objetiva reduzir expressivamente o seu volume, aumentando o poder calorífico por volume de matéria além de facilitar o transporte e manuseio das mesmas. As produções de ambos são teoricamente semelhantes e consistem na redução inicial do material, secagem, redução final e prensagem (GUO et al., 2013) diferindo-se no tamanho final sendo o briquete maior que o *pellet*. Esta tecnologia é empregada principalmente em países onde o aquecimento residencial por fonte térmica são comuns e características favoráveis como fácil manuseio, transporte e armazenamento. O consumo do *pellet* está aumentando o interesse comercial entre os pequenos e médios produtores (TRØMBORG et al., 2013).

O poder calorífico superior (PCS) é um dos parâmetros utilizados para quantificar o calor total liberado na combustão completa de uma amostra seca, sempre expressa em quantidade de energia térmica por unidade de massa. Outra forma de avaliar a qualidade de uma biomassa é o seu teor de cinzas. Alto teor de cinzas no material é considerado um fator negativo por se tratar de um resíduo que acarreta problemas durante o processo de combustão. Analisando *pellets* como combustível em aquecedores domésticos na Espanha, resultados mostraram que as cinzas ocasionam entupimento da entrada de ar necessária para combustão demandando a sua retirada constante, dependendo da matéria-prima do combustível (GONZÁLEZ et al., 2004).

Os *pellets* comerciais no Canadá são divididos em categorias segundo o seu teor de cinzas sendo o preço de venda maior para os quais possuem menor teor (ROY et al., 2013). O elevado teor de cinza dos briquetes feitos dos resíduos da moinha de carvão vegetal foi justificado pela forma como foi coletada a matéria-prima, junto ao piso de terra batida dos fornos acarretando a contaminação com materiais inorgânicos, como sílica, cálcio, sódio, entre outros (JÚNIOR et al., 2014). A presença de casca das árvores também contribui para o aumento do teor de cinzas (KLASNJA et al., 2002) podendo atingir teores dez vezes maiores quando comparado a madeira sem casca (SPINELLI et al., 2011).

Outro produto de consumo da biomassa florestal são os cavacos de madeira. Cavacos são particulados de madeira que podem ser produzidos por picadores de martelo ou facas utilizando material de descarte industrial ou residencial, tocos e galhos vindos de podas urbanas. Todavia, grande porcentagem da produção de cavacos no cenário florestal brasileiro é proveniente de plantios florestais de eucalipto com uso final para produção de celulose, papel, painéis e queima direta para produção de calor (IBA, 2015). Quando utilizado para queima, a exigência na qualidade dos cavacos não é rigorosa comparada as outras finalidades (NYSTRÖM e DAHLQUIST, 2004), justificando os estudos que propõem arranjos de plantios distintos implantados por empresas florestais (GARCIA et al., 1991; GUERRA et al., 2014; OLIVEIRA NETO et al., 2003). Entretanto, os cavacos possuem algumas desvantagens em relação as outras formas apresentadas, sendo o teor de água uma das mais pesquisadas atualmente e a característica física mais importante tratando-se de biocombustível (SPINELLI et al., 2011).

A Tabela 2 mostra o poder calorífico superior e o teor de cinzas obtido de biomassas florestais.

Tabela 2. Comparativo de poder calorífico superior e teor de cinzas de diversas matérias-primas

Material	PCS (MJ kg ⁻¹)	Teor de cinzas (%)	Referência
<i>Cavacos</i>			
Madeira + fibra ^a	19,0		SPINELLI et al. (2011)
Madeira ^b	20,0	-	GUERRA et al. (2014)
Madeira ^c	17,1	1,1	KAEWLUAN e PIPATMANOMAI (2011)
<i>Pellet</i>			
Resíduo	18,4	1,0	GONZÁLEZ et al. (2004)
Madeira – Cat. 1 ^d	18,9	0,3	ROY et al. (2013)
Madeira – Cat. 2 ^d	18,7	0,6	
Madeira – Cat. 3 ^d	18,9	1,9	
<i>Briquete</i>			
95% madeira ^b	19,7	1,8	GONÇALVES et al. (2009)
100% moinha de carvão vegetal	26,9	27,0	JÚNIOR et al. (2014)
100% resíduo de bambu	32,7	2,6	

Nota: ^a *Populus spp.*; ^b *Eucalyptus spp.*; ^c Seringueira; ^d *Pellets* comerciais no Canadá

A secagem deste material tende a aumentar a eficiência da combustão e da operação como um todo (GEBREEGZIABHER et al., 2013). Por este motivo, métodos de secagem têm sido objetivo de diversos estudos no mundo, como estocagem ao ar livre (ERGÜL e AYRILMIS, 2014; MANZONE et al., 2013), estocagem ao ar livre adicionando cobertura às pilhas (BEDANE et al., 2011; MANZONE et al., 2013; RÖSER et al., 2011) e até utilizando rolos compressores (YOSHIDA et al., 2010).

1.3 Estado da arte na colheita de SFCR

A colheita de sistemas florestais de curta rotação é feita basicamente utilizando três métodos: corte e cavaqueamento, corte e estocagem (manual ou mecanizado), corte e enfardamento (Figura 1).

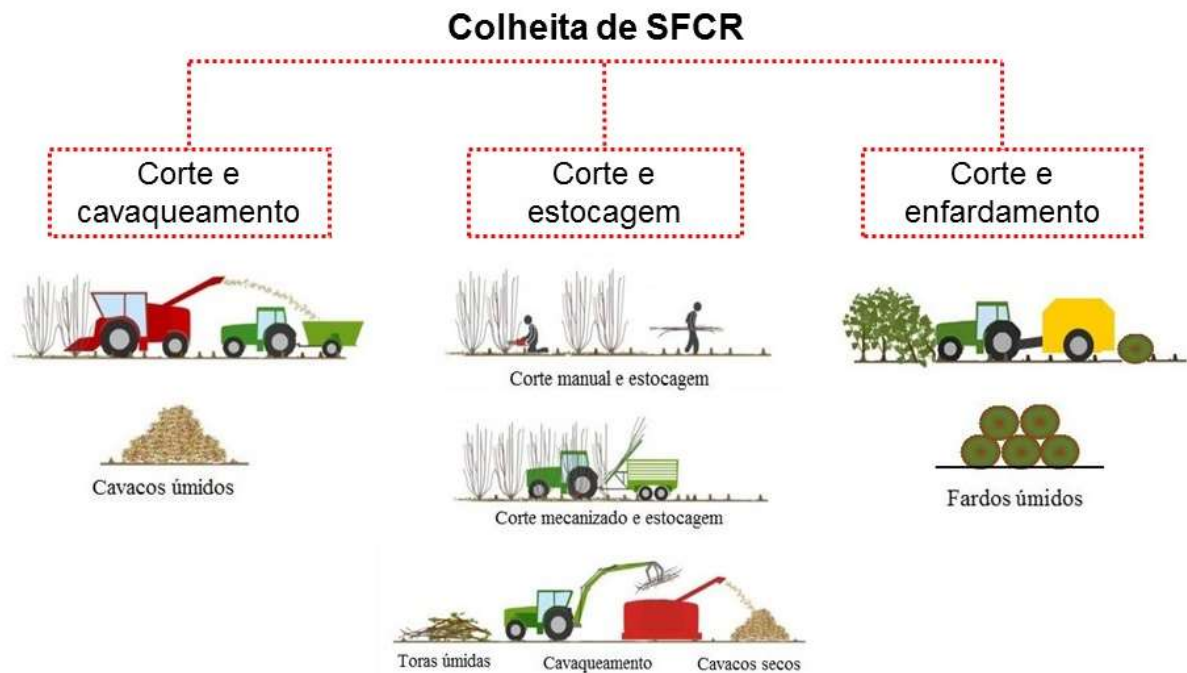


Figura 1. Esquema dos três métodos de colheita de biomassa florestal.
Adaptado de VANBEVEREN et al. (2015)

A colheita por corte e cavaqueamento é baseada em uma única operação na qual uma colhedora corta e processa a árvore em cavacos, estocando cavacos úmidos (VANBEVEREN et al., 2015).

Os equipamentos utilizados neste tipo de colheita podem ser categorizados de duas formas: corte lateral ou frontal (Figura 2). Ambas operações possuem a característica de não acumularem o cavaco no conjunto de colheita, ou seja, prontamente despejam os cavacos em um segundo equipamento responsável pela retirada do produto final nos quais são comumente utilizados tratores, acoplados a transbordos ou trailers, e caminhões-caçamba.

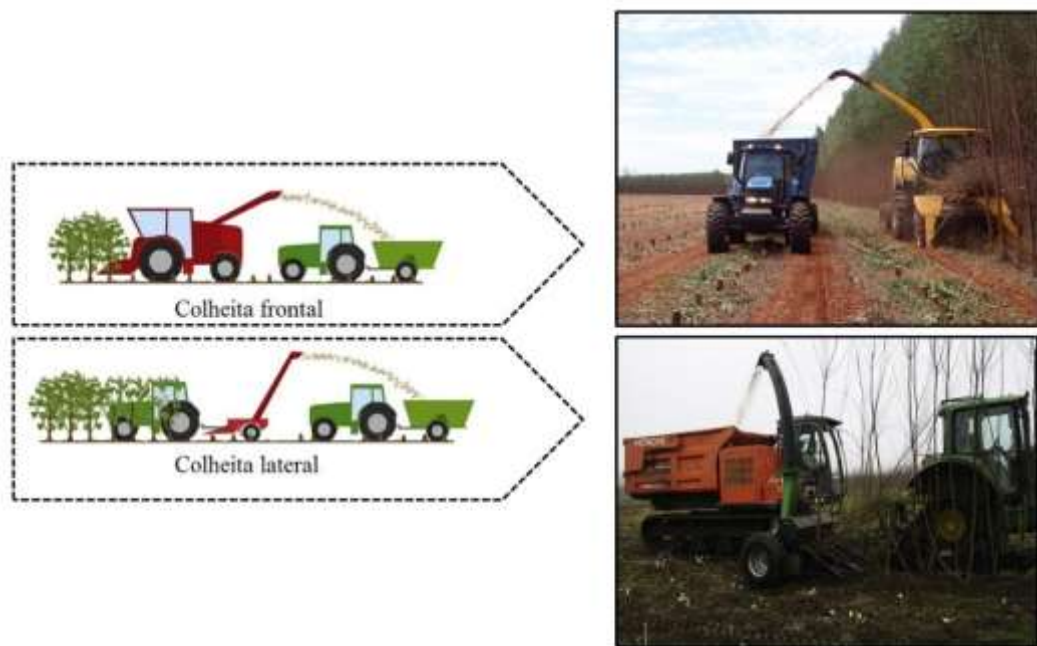


Figura 2. Esquema das duas categorias de colheita e cavaqueamento.
Adaptado de BERHONGARAY et al. (2013) e VANBEVEREN et al. (2015)

Os equipamentos utilizados na colheita lateral são um trator que traciona um equipamento de corte e cavaqueamento, normalmente utilizado em rebrotas de *Salix* em países de clima temperado. Para isto, o trator se posiciona ao lado da linha de plantio que será colhida. Contudo, este equipamento possui uma limitação em relação ao diâmetro máximo das árvores (rebrotas) de 3 a 4 cm. Um exemplo deste equipamento é o JF Z200 produzido pela empresa dinamarquesa Ny Vraa (Figura 2). Ainda não há registro deste tipo de colheita para biomassa no Brasil.

Para colheita frontal é utilizada uma forrageira autopropelida adaptada com uma plataforma de corte (Figura 2). Ambos equipamentos estão disponíveis no mercado em diversos modelos e fabricantes, principalmente na Europa, onde este tipo de colheita é mais utilizado (SPINELLI et al., 2009).

A utilização de forrageiras adaptadas para realizar a colheita dos SFCR vem sendo alvo de estudos europeus e norte-americanos desde os anos 90. Estas forrageiras possuem a característica de transformar a árvore inteira em cavacos, seja ela um conjunto de colheita instalado em um trator ou uma colhedora autopropelida, também conhecido por cavaqueamento de árvores inteiras ou *cut and chip* (SPINELLI et al., 2009).

O funcionamento de uma forrageira adaptada é basicamente composto por duas divisões: plataforma de corte e máquina base. A plataforma é acoplada à parte frontal da máquina base e possui a função de cortar a árvore na base do tronco (discos de corte de

base), direcionando a queda (*pushbar*) e conduzindo-a por meio de rolos alimentadores da plataforma até a máquina base. Este por sua vez, transforma a árvore em cavacos de dimensões pré-determinadas (rolo-facas) que, imediatamente, são lançados (rolo-pás) até o tubo de descarga. A Figura 3 ilustra alguns elementos dos sistemas de corte, alimentação, cavaqueamento e descarga que compõem uma forrageira florestal adaptada e suas funções durante a colheita.

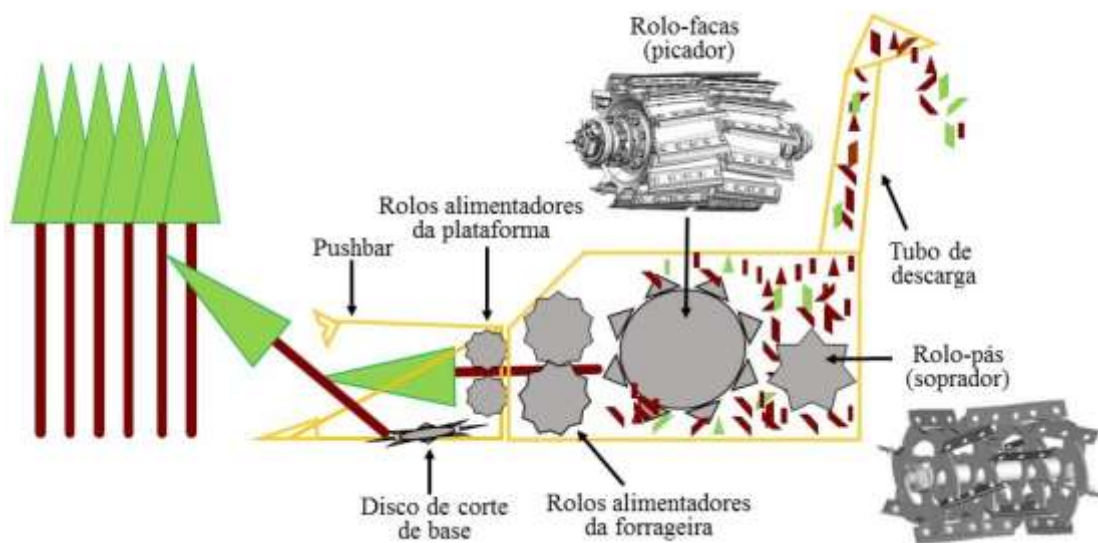


Figura 3. Esquematização de alguns elementos de uma forrageira florestal adaptada autopropelida

Estes equipamentos por possuírem alto custo inicial são necessários uma elevada produtividade e preço do produto final para compensar o investimento, visto que a sua função na área agrícola muitas vezes é sazonal, portanto, adaptá-la para uso florestal poderia incrementar a receita do produtor (MANZONE e SPINELLI, 2013). Pesquisadores como Culshaw e Stokes (1995), Spinelli e Hartsough (2001), Spinelli et al. (2008), Spinelli e Magagnotti (2010), Fiala e Bacenetti (2012), Schweier e Becker (2012b), Manzone e Spinelli (2013) e Eisenbies et al. (2014) ensaiaram algumas forrageiras disponíveis no mercado das marcas Jaguar, Claas, John Deere e New Holland.

Neste sistema, o conjunto de colheita realiza continuamente em uma única operação o corte de base, a derrubada, recolhimento, cavaqueamento da árvore inteira e descarregamento dos cavacos pelo tubo de descarga. Este sistema apresenta algumas desvantagens como paradas durante a colheita devido à queda de árvores fora do alcance da plataforma de corte e árvores presas entre os discos de corte de base (SCHWEIER e BECKER, 2012b), além de se tratar de uma máquina pesada impedindo o tráfego em solos úmidos ou

declivosos (SPINELLI et al., 2009). Além destas características, estas forrageiras adaptadas possuem um limite de colheita máximo do diâmetro basal entre 12 a 14 cm (FIALA e BACENETTI, 2012) independente da altura da árvore. Estes valores são estipulados não pela potência da máquina e sim por uma limitação na abertura dos rolos que conduzem os indivíduos até o picador. Segundo Spinelli et al. (2009), para uma colheita efetiva é necessário que o plantio esteja adaptado ao maquinário com espaçamentos adequados permitindo o direcionamento correto da queda.

No Brasil, a vinda da primeira forrageiras adaptada com o intuito de produzir biomassa florestal é recente. No ano de 2012 iniciou-se o processo de importação de uma forrageira sendo necessário adaptá-la às condições florestais brasileiras com o intuito de colher áreas com plantios de eucalipto (*Eucalyptus spp.*) em diversas regiões brasileiras, portanto, ainda não há publicações sobre este sistema de colheita utilizando o eucalipto como fonte de biomassa neste país. A adaptação consiste na instalação de proteções metálicas em pontos estratégicos do equipamento (ex.: tanque de combustível) e instalação de pneus florestais, justificado pela alta quantidade de material residual de colheitas anteriores como galhos, pedaços de toras e tocos.

O sistema de corte e estocagem pode ser realizado de forma manual ou mecanizada. Atualmente utilizada apenas em pequenas áreas, no corte manual para derrubada das árvores é utilizado a motosserra e posteriormente empilham-se as toras que, antes de serem transformadas em cavacos, permanecerão no campo para secagem. Por sua vez, no sistema mecanizado há algumas inovações em termos de maquinário, como a colhedora Stemster MKIII produzida pela Nordic Biomass (Figura 4), projetada para colher plantios de *Populus* aos 3-4 anos de idade. Este equipamento utiliza duas serras circulares para o corte de base e, por meio de uma plataforma elevatória, as toras são conduzidas para um compartimento traseiro onde são acumuladas. Uma vez que este compartimento atinge o máximo da sua capacidade, o fundo se abre lateralmente e as toras são posicionadas em pilhas no solo. Diferentemente do sistema de corte e cavaqueamento, este equipamento necessita acoplar-se à um trator.

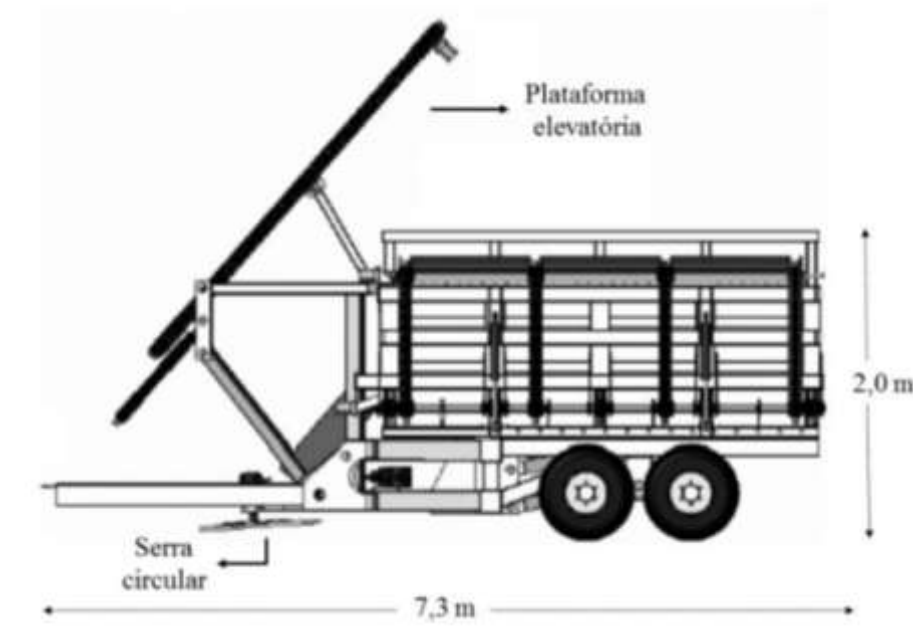


Figura 4. Dimensões e elementos da Stemster MKIII.
Adaptado de SCHWEIER e BECKER (2012a)

O sistema mecanizado é 36% mais eficiente que o sistema manual além de ser mais barato, com um custo de € 78 t^{-1} contra € 104 t^{-1} da colheita manual (VANBEVEREN et al., 2015).

O sistema de colheita por corte e enfardamento teve seu início em 2005-2006 no Canadá com o desenvolvimento do protótipo que futuramente se tornaria o produto comercializado pelo nome de Biobaler da fabricante Anderson com o intuito de cortar, coletar e enfardar rebrotas de *Salix* (SAVOIE et al., 2009). Acoplado ao trator, a Biobaler realiza um corte de base, direcionando as árvores para uma câmara de compressão por meio de rolos alimentadores e comprimidas em fardos redondos (Figura 5).



Figura 5. Biobaler descarregando um fardo redondo

Como o enfardamento é feito com material úmido, é necessário diminuir a umidade dos fardos antes de utilizá-los como biomassa. A qualidade deste material dependerá do tempo de estocagem e do clima (STOLARSKI et al., 2015). Atualmente, só há um registro de pesquisa utilizando este equipamento no Brasil (GUERRA et al., 2015).

1.4 Economia Florestal

A economia florestal e suas aplicações são fundamentais nas tomadas de decisões (SILVA e FONTES, 2005), podendo ser definida como “ramo da ciência que trata da utilização racional de recursos com vistas à produção, à distribuição e ao consumo de bens e serviços florestais” (SILVA et al., 2005).

Silva et al. (2005) descrevem algumas características da atividade florestal para o uso da economia no setor sendo uma delas, a longa duração do ciclo da cultura no qual demanda alto investimento inicial e retorno a longo prazo. Eles citam que o corte de um povoamento ocorre aos seis ou sete anos de idade, entretanto, referem-se ao uso final para produção de papel, celulose e painéis, porém, para a geração de energia por meio da biomassa utilizando os sistemas florestais de curta rotação (SFCR) o retorno financeiro pode ser antecipado a 2 ou 3 anos. Os autores analisam a importância deste setor para o país, dentre elas,

a participação florestal na formação do produto interno bruto (PIB) nacional e a contribuição para a balança comercial.

Segundo o levantamento realizado pela Indústria Brasileira de Árvores (IBA, 2015), ano base 2014, o PIB nacional do setor de árvores plantadas apresentou um crescimento de 1,7%, enquanto que o PIB da economia nacional teve um crescimento 0,1%. Outros setores como o agropecuário tiveram um crescimento de 0,4% e a indústria geral teve um recuo de 1,2%. O superávit na receita das exportações dos produtos gerados pela atividade florestal superou o recorde de 2013, atingindo US\$ 8,5 milhões de dólares, aumento de 2,5% em comparação ao ano anterior. Estes dados positivos estão diretamente ligados ao aumento das exportações de celulose causados pela maior demanda de papel na China e fechamento de fábricas produtoras de celulose em países do hemisfério norte.

Na indústria nacional a modernização no setor florestal teve início na década de 70 com a produção de motosserras e guas (SALES, 1981). A introdução de equipamentos de alto custo no setor iniciou a necessidade do cálculo de custos detalhados destes equipamentos utilizando métodos econômicos padrões (ACKERMAN et al., 2014). Um dos objetivos das empresas e centros de pesquisas era comparar máquinas decidindo qual seria o melhor investimento.

No ano de 2012, a União Europeia (UE) por meio de um documento intitulado: “Inovações para o crescimento sustentável: uma bioeconomia para a Europa¹” introduziu o termo Bioeconomia que visa uma produção sustentável cobrindo áreas como agricultura, química, farmacêutica, alimentícia, entre outras baseada na utilização da biomassa como matéria-prima (OLLIKAINEN, 2014). Este documento forneceu elementos para o Plano de Ação Bioeconômico² (PAB) da UE. Entretanto, o setor florestal foi praticamente esquecido no PAB. Ollikainen (2014) menciona que a palavra “floresteiros³” é utilizada no plano, concluindo que a escolha desta palavra demonstra o baixo conhecimento do setor florestal contido no PAB. Esta situação mostra a necessidade do aprofundamento dos estudos econômicos na área de conversão de biomassa e produção sustentável mesmo em um continente que possui vasta experiência no setor.

¹ Innovating for Sustainable Growth. A Bioeconomy for Europe

² Bioeconomy Action Plan (BAP)

³ Foresters

1.5 Referências

- ACKERMAN, P. et al. The COST model for calculation of forest operations costs. **International Journal of Forest Engineering**, v. 25, n. 1, p. 75-81, 2014.
- AYLOTT, M. J. et al. Yield and spatial supply of bioenergy poplar and willow short-rotation coppice in the UK. **New Phytologist**, v. 178, n. 2, p. 358-370, 2008.
- BALATINECZ, J. et al. Biomass energy. In: ISEBRANDS, J. G. ;RICHARDSON, J. (Ed.). **Poplars and willows: trees for society and the environment**. Londres, Reino Unido: FAO and CABI, 2014. p.553-555.
- BEDANE, A. H.; AFZAL, M. T.; SOKHANSANJ, S. Simulation of temperature and moisture changes during storage of woody biomass owing to weather variability. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 7, p. 3147-3151, 2011.
- BERHONGARAY, G.; EL KASMIQUI, O.; CEULEMANS, R. Comparative analysis of harvesting machines on an operational high-density short rotation woody crop (SRWC) culture: One-process versus two-process harvest operation. **Biomass and Bioenergy**, v. 58, p. 333-342, 2013.
- BERNARDINI, A. et al. Natural and commercial *Salix* clones differ in their ecophysiological response to Zn stress. **Photosynthetica**, p. 1-10, 2015.
- CASAUBON, E. A. et al. Interacciones entre sitio, plaga y una enfermedad del fuste en una plantación de " *Populus deltoides* cv Catfish-2" en el bajo delta del Río Paraná (Argentina). **Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales**, v. 11, n. 1, p. 29-38, 2002.
- CULSHAW, D.; STOKES, B. Mechanisation of short rotation forestry. **Biomass and Bioenergy**, v. 9, n. 1, p. 127-140, 1995.
- DAL POGETTO, M. D. A.; WILCKEN, C. F. The effect of *Beauveria bassiana* on Brazilian poplar moth *Condylorrhiza vestigialis* (Lepidoptera: Crambidae). **Journal of Plant Protection Research**, v. 52, n. 1, p. 10-14, 2012.
- DE WIT, M.; JUNGINGER, M.; FAAIJ, A. Learning in dedicated wood production systems: past trends, future outlook and implications for bioenergy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 19, p. 417-432, 2013.
- DODIĆ, S. N. et al. Possibilities of application of waste wood biomass as an energy source in Vojvodina. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 5, p. 2355-2360, 2012.
- EISENBIES, M. H. et al. Evaluation of a single-pass, cut and chip harvest system on commercial-scale, short-rotation shrub willow biomass crops. **BioEnergy Research**, v. 7, n. 4, p. 1506-1518, 2014.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Energia Termelétrica: gás natural, biomassa, carvão, nuclear**. Rio de Janeiro, 2016. 417 p.
- ERGÜL, E.; AYRILMIS, N. Effect of outdoor storage conditions of wood chip pile on the technological properties of wood-based panel. **Biomass and Bioenergy**, v. 61, p. 66-72, 2014.

- FACCIOTTO, G.; NERVO, G. Biomass production of fast growing species in a short rotation coppice in Sicily (Italy). In: **Proceedings of the 19th European Biomass Conference and Exhibition**, 2011, Berlim, Alemanha. p.612-614
- FACCIOTTO, G.; PINAZZI, P. Short rotation forestry: use and potentialities. **Alberi e Territorio** v. 3, n. 1, p. 24-29, 2006.
- FELFLI, F. F. et al. Biomass briquetting and its perspectives in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 1, p. 236-242, 2011.
- FIALA, M.; BACENETTI, J. Economic, energetic and environmental impact in short rotation coppice harvesting operations. **Biomass and Bioenergy**, v. 42, p. 107-113, 2012.
- GABRIELLE, B. et al. Life cycle assessment of eucalyptus short rotation coppices for bioenergy production in southern France. **Global Change Biology Bioenergy**, v. 5, n. 1, p. 30-42, 2013.
- GARCIA, C. H.; CORRADINE, L.; ALVARENGA, S. F. **Comportamento florestal do *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em diferentes espaçamentos**. Circular Técnica nº179. 1991
- GEBREEGZIABHER, T.; OYEDUN, A. O.; HUI, C. W. Optimum biomass drying for combustion—A modeling approach. **Energy**, v. 53, p. 67-73, 2013.
- GONÇALVES, J. E.; SARTORI, M. M.; LEÃO, A. L. Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 657-661, 2009.
- GONZÁLEZ, J. F. et al. Combustion optimisation of biomass residue pellets for domestic heating with a mural boiler. **Biomass and Bioenergy**, v. 27, n. 2, p. 145-154, 2004.
- GUERRA, S. P. S. et al. Heating value of eucalypt wood grown on SRC for energy production. **Fuel**, v. 137, p. 360-363, 2014.
- GUERRA, S. P. S. et al. Preliminary trials of the Biobaler on Brazilian eucalyptus plantations. **BioEnergy Research**, 2015.
- GUO, L.; SIMS, R.; HORNE, D. Biomass production and nutrient cycling in Eucalyptus short rotation energy forests in New Zealand.: I: biomass and nutrient accumulation. **Bioresource Technology**, v. 85, n. 3, p. 273-283, 2002.
- GUO, W. et al. Determination of effective thermal conductivity and specific heat capacity of wood pellets. **Fuel**, v. 103, p. 347-355, 2013.
- HOFMANN-SCHIELLE, C. et al. Short-rotation plantations of balsam poplars, aspen and willows on former arable land in the Federal Republic of Germany. I. Site–growth relationships. **Forest Ecology and Management**, v. 121, n. 1, p. 41-55, 1999.
- IBA. Statistics of the Brazilian Tree Industry, Report 2015. Brazilian Tree Industry. Brasília, p.64. 2015

JOHNSON, J. M. et al. Biomass-bioenergy crops in the United States: A changing paradigm. **American Journal of Plant Sciences and Biotechnology**, v. 1, n. 1, p. 1-18, 2007.

JÚNIOR, A. F. D.; DE ANDRADE, A. M.; DA COSTA JÚNIOR, D. S. Caracterização de briquetes produzidos com resíduos agroflorestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 79, p. 225-234, 2014.

KAEWLUAN, S.; PIPATMANOMAI, S. Gasification of high moisture rubber woodchip with rubber waste in a bubbling fluidized bed. **Fuel Processing Technology**, v. 92, n. 3, p. 671-677, 2011.

KLASNJA, B.; KOPITOVIC, S.; ORLOVIC, S. Wood and bark of some poplar and willow clones as fuelwood. **Biomass and Bioenergy**, v. 23, n. 6, p. 427-432, 2002.

LARSEN, S. U.; JØRGENSEN, U.; LÆRKE, P. E. Willow yield is highly dependent on clone and site. **BioEnergy Research**, v. 7, n. 4, p. 1280-1292, 2014.

MANZONE, M.; BALSARI, P.; SPINELLI, R. Small-scale storage techniques for fuel chips from short rotation forestry. **Fuel**, v. 109, p. 687-692, 2013.

MANZONE, M.; SPINELLI, R. Wood chipping performance of a modified forager. **Biomass and Bioenergy**, v. 55, p. 101-106, 2013.

MITCHELL, C.; STEVENS, E.; WATTERS, M. Short-rotation forestry—operations, productivity and costs based on experience gained in the UK. **Forest Ecology and Management**, v. 121, n. 1, p. 123-136, 1999.

NYSTRÖM, J.; DAHLQUIST, E. Methods for determination of moisture content in woodchips for power plants—a review. **Fuel**, v. 83, n. 7, p. 773-779, 2004.

OLIVEIRA NETO, S. N. D. et al. Produção e distribuição de biomassa em *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. em resposta à adubação e ao espaçamento. **Revista Árvore**, v. 27, n. 1, 2003.

OLLIKAINEN, M. Forestry in bioeconomy—smart green growth for the humankind. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 29, n. 4, p. 360-366, 2014.

QUEIROZ, D. L. D. Pragas exóticas e potenciais a eucaliptocultura no Brasil. In: FITOPATOLOGIA, N. D. E. E. (Ed.). **Manejo Fitossanitário de Cultivos agroenergéticos**. Lavras/MG, 2009. p.239-249.

RECH, T. D. et al. Dynamic of dormancy and budburst of willow plants in Planalto Sul, Santa Catarina State, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 9, p. 1249-1255, 2007.

ROCKWOOD, D. et al. Eucalyptus and Populus short rotation woody crops for phosphate mined lands in Florida USA. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, n. 8, p. 728-734, 2006.

RÖSER, D. et al. Natural drying treatments during seasonal storage of wood for bioenergy in different European locations. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 10, p. 4238-4247, 2011.

- ROY, M. M.; DUTTA, A.; CORSCADDEN, K. An experimental study of combustion and emissions of biomass pellets in a prototype pellet furnace. **Applied Energy**, v. 108, p. 298-307, 2013.
- SALES, F. O setor florestal avança para mecanização. **Silvicultura**, v. 6, n. 19, p. 20-30, 1981.
- SAVOIE, P.; LAVOIE, F.; D'AMOURS, L. Development of two headers for a versatile woody brush harvester-baler. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 25, n. 6, p. 811-817, 2009.
- SCHWEIER, J.; BECKER, G. Harvesting of short rotation coppice: harvesting trials with a cut and storage system in Germany. **Silva Fennica**, v. 46, n. 2, p. 287-299, 2012a.
- SCHWEIER, J.; BECKER, G. New Holland forage harvester's productivity in short rotation coppice: evaluation of field studies from a German perspective. **International Journal of Forest Engineering**, v. 23, n. 2, p. 82-88, 2012b.
- SERAPIGLIA, M. J. et al. Yield and woody biomass traits of novel shrub willow hybrids at two contrasting sites. **BioEnergy Research**, v. 6, n. 2, p. 533-546, 2013.
- SILVA, M. L. D.; FONTES, A. A. Discussão sobre os critérios de avaliação econômica: valor presente líquido (VPL), valor anual equivalente (VAE) e valor esperado da terra (VET). **Revista Árvore**, v. 29, n. 6, p. 931-936, 2005.
- SILVA, M. L. D.; JACOVINE, L. A. G.; VALVERDE, S. R. Economia florestal. In: SILVA, M. L. D.; JACOVINE, L. A. G. ; VALVERDE, S. R. (Ed.). **Economia Florestal**. Viçosa: Editora UFV, 2005. p.91-117.
- SOCHACKI, S. J. et al. Evaluating a sustainability index for nutrients in a short rotation energy cropping system. **Global Change Biology Bioenergy**, v. 5, n. 3, p. 315-326, 2013.
- SPINELLI, R.; HARTSOUGH, B. A survey of Italian chipping operations. **Biomass and Bioenergy**, v. 21, n. 6, p. 433-444, 2001.
- SPINELLI, R.; MAGAGNOTTI, N. Comparison of two harvesting systems for the production of forest biomass from the thinning of *Picea abies* plantations. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 25, n. 1, p. 69-77, 2010.
- SPINELLI, R.; NATI, C.; MAGAGNOTTI, N. Harvesting short-rotation poplar plantations for biomass production. **Croatian Journal of Forest Engineering**, v. 29, n. 2, p. 129-139, 2008.
- SPINELLI, R.; NATI, C.; MAGAGNOTTI, N. Using modified foragers to harvest short-rotation poplar plantations. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 5, p. 817-821, 2009.
- SPINELLI, R. et al. Physical characterization of commercial woodchips on the Italian energy market. **Fuel**, v. 90, n. 6, p. 2198-2202, 2011.
- STOLARSKI, M. J. et al. Changes of the quality of willow biomass as renewable energy feedstock harvested with biobaler. **Journal of Elementology**, v. 20, n. 3, 2015.
- TESTA, R. et al. Economic evaluation of introduction of poplar as biomass crop in Italy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 775-780, 2014.

TOL, R. S. A cost–benefit analysis of the EU 20/20/2020 package. **Energy Policy**, v. 49, p. 288-295, 2012.

TRØMBORG, E. et al. Economic sustainability for wood pellets production—A comparative study between Finland, Germany, Norway, Sweden and the US. **Biomass and Bioenergy**, v. 57, p. 68-77, 2013.

VANBEVEREN, S. et al. Operational short rotation woody crop plantations: Manual or mechanised harvesting? **Biomass and Bioenergy**, v. 72, p. 8-18, 2015.

YOSHIDA, T. et al. Dewatering of high-moisture wood chips by roller compression method. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, n. 7, p. 1053-1058, 2010.

2. CAPÍTULO 1: Desempenho operacional de uma forrageira adaptada para plantios de curta rotação de eucalipto⁴

Oguri, G.¹; Guerra, S. P. S.¹; Spinelli, R.²

¹ Faculdade de Ciências Agronômicas / Universidade Estadual Paulista
Rua José Barbosa de Barros, 1780 Botucatu – SP

² Istituto per la Valorizzazione del Legno e delle Specie Arboree / Consiglio Nazionale delle Ricerche
Via Madonna del Piano 10, Sesto Fiorentino / Firenze – Itália

RESUMO: Forrageiras modificadas representam uma opção viável para a colheita de sistemas florestais de curta rotação (SFCR), como apresentado em diversos estudos realizados em países do hemisfério norte. Entretanto, novos plantios energéticos no Brasil possuem maior produtividade comparados aos plantios nos países do hemisfério norte, fato que demanda mais estudos sobre a capacidade operacional das forrageiras adaptadas nos plantios brasileiros. Neste estudo foi conduzido em cinco plantios de eucalipto, localizados em diferentes estados brasileiros abrangendo diversas condições de trabalho em relação ao clone, idade do plantio, densidade populacional e sistema de plantio (linhas simples e duplas). A produtividade florestal variou entre 90 e 157 t ha⁻¹ e o diâmetro à altura do peito (DAP) variou entre 5 e 8 cm. Neste ensaio utilizou-se a forrageira New Holland FR9060 acoplada a plataforma florestal 130 FB da mesma fabricante. Este conjunto atingiu uma capacidade de processamento entre 39 a 65 t h⁻¹, resultado este comparável aos encontrados em estudos realizado na Europa e América do Norte. As paradas apresentaram reduzida proporção do tempo total de colheita, semelhantes aos encontrados em plantios de *Populus* e *Salix* em países do hemisfério norte. A capacidade de processamento foi diretamente proporcional a produtividade florestal e a granulometria. A diminuição na granulometria de 30 para 20 mm determinou uma redução de 20 a 30% na capacidade de processamento. Estes resultados referem-se a colheita dos plantios na primeira rotação sendo necessário pesquisas adicionais visando os próximos cortes.

Palavras-chave: biomassa; produtividade; eficiência, SFCR

⁴ Futuramente, esse capítulo será traduzido para a língua inglesa e será submetido para o periódico *Biomass and Bioenergy* (ISSN: 0961-9534)

Os autores não garantem a rentabilidade do projeto

A citação de marcas e modelos dos equipamentos não indicam recomendação por parte do autor

Operational performance of modified forager harvesting Eucalyptus short rotation plantations

ABSTRACT: Modified foragers represent a cost-effective option for harvesting high-density short-rotation energy plantations, as shown in many studies conducted in the Northern hemisphere. However, new energy plantations grown in Brazil far exceed the stocking and the stem size characterizing plantations in the Northern hemisphere, which raises the question about the ability of modified foragers to perform effectively. A study was conducted on five eucalypt plantations, located in different Brazilian States and spanning over a wide range of work conditions in terms of clone, age, planting density and row system (e.g. single or twin rows). Field stocking varied between 90 and 157 t ha⁻¹, and breast-height diameter between 5 and 8 cm. The tests were conducted with a New Holland 9060 forager, equipped with a 130 FB energy wood header. This machine was capable of negotiating all test fields, and reached a productivity between 39 and 65 t h⁻¹, which was comparable with the productivity figures recorded in Europe and North America. The machine coped well with the high field stocking and stem size levels encountered in Brazil. Blockages accounted for a very small proportion of total harvesting time, which was much similar to that recorded in studies conducted on poplar and willow in the Northern hemisphere. Productivity was directly proportional to field stocking and cut length. Changing cut length from 30 to 20 mm determined a 20 - 30% reduction in productivity. These figures reflect work conditions in uncoppiced first-rotation plantations, and they should be applied with some caution to following rotations.

Keywords: biomass; productivity; efficiency, SRC

2.1 Introdução

Florestas plantadas possuem grande importância no abastecimento da indústria madeireira e, possivelmente, atenderão toda a demanda mundial no futuro (FENNING e GERSHENZON, 2002). As indústrias modernas implementam nos plantios florestais as mais avançadas técnicas de melhoramento genético e manejo que resultam em altas taxas de crescimento e encurtamento das rotações (SEDJO, 1999). Grandes quantidades de madeira são produzidas em condições competitivas, favorecendo a internacionalização da indústria com base florestal (KORHONEN et al., 2014). Somado a este fator, a disponibilidade de terra e custo de mão-de-obra relativamente baixo resultam na expansão de plantios industriais no hemisfério sul (SIRY et al., 2005).

No Brasil, plantios florestais são particularmente importantes, onde cobrem uma área de 7,7 milhões de hectares (IBA, 2015). Condições edafoclimáticas favoráveis juntamente com o progresso do melhoramento genético promovem excepcionais taxas de produção (STAPE et al., 2010). O eucalipto é o gênero mais utilizado na indústria florestal brasileira e, também, o mais bem sucedido. A maioria dos plantios comerciais brasileiros são caracterizados pela implantação do gênero *Eucalyptus* spp. utilizando o espaçamento 3 x 2 m, rotações a cada 5 a 7 anos gerando produções de aproximadamente 270 m³ de madeira por hectare (IBA, 2015). Estes plantios abastecem, em sua maioria, grandes e modernas indústrias localizadas aos seus arredores (CAMPINHOS JR, 1999).

A qualidade exigida da biomassa para geração de energia é menor se comparada à exigência para produção de papel e celulose, possibilitando a alta densidade populacional e curtas rotações com o intuito de maximizar a produtividade (GONZALEZ et al., 2011). Novos plantios com altas densidade populacionais apresentam 3.300 a 14.000 plantas por hectare e manejadas como sistemas florestais de curta rotação (SFCR) com corte raso a cada 2 a 3 anos, gerando produções de até 100 toneladas de matéria seca por hectare ou 1.000 gigajoule de energia por hectare (GUERRA et al., 2014). Nestas condições, os sistemas de colheitas como toras curtas (harvester) e árvores inteiras (feller buncher) utilizado pelas empresas produtoras de papel e celulose não são adequadas devido ao baixo diâmetro das toras o que resultaria em baixa produtividade e altos custos. Culturas industriais são especificamente desenvolvidas para produzir altas quantidades de matéria-prima de baixo custo e seu sucesso requer que todas as operações sejam conduzidas na mais alta eficiência. Por esta razão, colheitas convencionais necessitam ser substituídas pelas colheitas contínuas, seguindo o exemplo aplicado em florestas energéticas no continente europeu (SPINELLI et al., 2011).

A produção de biomassa florestal brasileira para energia não adota os mesmos conceitos utilizados nas colheitas em países europeus normalmente baseada nas forrageiras adaptadas que passaram por modificações (DANFORS et al., 1998). Entretanto, os eucaliptos aqui plantados atingem maior diâmetro e densidade da madeira mais elevada comparados com os indivíduos encontrados na Europa, características que, possivelmente afetariam o desempenho destas colhedoras. Problemas semelhantes foram encontrados na introdução de máquinas nórdicas no sul da Europa (SPINELLI et al., 2009) e no nordeste estadunidense (VOLK et al., 2006). A maioria das forrageiras utilizadas no SFCR possuem um limite máximo conforme o diâmetro de base da tora e a densidade populacional que consegue colher variando entre os modelos e tipos. Fabricantes europeus já iniciaram o desenvolvimento de forrageiras maiores e mais potentes com a finalidade de diminuir os fatores limitantes da colheita destes novos sistemas de plantios (SPINELLI et al., 2011). Todavia, estas máquinas estão sendo desenvolvidas para os plantios europeus de *Poplar* e *Salix* que, geralmente, são menores e menos densos que os eucaliptos. A maioria dos modelos já desenvolvidos apresentam dificuldade de derrubar as árvores de maior diâmetro que tendem a se prenderem no espaço localizado entre os rolos alimentadores. Neste caso, deveria-se criar novos modelos com uma maior abertura destes rolos.

Todas estas características citadas anteriormente são encontradas na nova forrageira desenvolvida pela empresa Case New Holland. Esta máquina possui um sistema de corte e alimentação que se assemelha ao dispositivo implementado nas colhedoras de cana-de-açúcar que são especificamente desenvolvidas para uso intenso exigido em canaviais brasileiros. Além disso, a semelhança entre as forrageiras e as colhedoras de cana-de-açúcar possui a vantagem da familiaridade por parte das oficinas especializadas, pela grande quantidade de colhedoras de cana-de-açúcar ativas.

O objetivo deste estudo foi analisar o desempenho operacional desta forrageira adaptada pela primeira vez em plantios florestais brasileiros de curta rotação. Foi determinado a produtividade da colheita bem como o seu consumo de combustível em função das diferentes condições de trabalho.

2.2 Material e métodos

A forrageira utilizada para o ensaio foi da fabricante New Holland, modelo FR9060 com 441 kW de potência, com o cabeçote florestal da mesma fabricante, modelo Coppice 130FB. Este cabeçote foi especificamente desenvolvido para colheita de SFCR e é composto por um par de serras circulares localizado abaixo de duas torres alimentadoras verticais (Figura 1). Possui a função de cortar, derrubar as árvores e conduzi-las para parte interna da forrageira por meio de rolos alimentadores horizontais. Uma vez dentro da forrageira, ainda por meio de rolos alimentadores horizontais, as árvores são direcionadas para o picador, tipo rolo-facas, com a finalidade de transformar a árvores inteira em cavacos de madeira. Este rolo é o mesmo utilizado para colheita de milho, com modificação apenas no material das facas que precisam ser mais resistentes.



Figura 1. Vista frontal da plataforma florestal Coppice 130FB

No modelo utilizado, foram instaladas 16 facas no picador divididas em duas seções, capazes de produzir cavacos com granulometria entre 5 e 30 mm. Após o cavaqueamento, o material produzido é conduzido até o soprador e descarregado por meio do tubo de descarga. Durante o estudo, para retirada dos cavacos do talhão, utilizou-se um trator que tracionou um ou dois transbordos. As capacidades destes transbordos variaram entre 8 e 35 m³, dependendo da disponibilidade de uso destes equipamentos nas áreas de colheita.

O estudo foi conduzido em cinco plantios diferentes, escolhidos com o intuito de abranger uma grande variação de clones de eucalipto para SFCR. Utilizou-se cinco diferentes clones de eucalipto com densidades populacionais entre 3.300 a 14.800 plantas por hectare. Na área com maior adensamento (14.800 plantas ha⁻¹) foi utilizado o sistema de plantio em linhas duplas, enquanto na área restante utilizou-se o sistema convencional de linhas simples. As áreas escolhidas para a colheita estavam distribuídas em três estados brasileiros, abrangendo diversas condições climáticas, sendo todas cultivadas em solos bem drenados e planos (Tabela 1). Durante todas as colheitas, o operador da colhedora foi o mesmo, que passou por treinamentos durante semanas antes de iniciar a colheita dos experimentos.

Tabela 1. Localização, características edafoclimáticas, populacional e silvicultural dos talhões.

Talhão		A	B	C	D	E
Longitude		20°54'S	15°46'S	15°46'S	21°43'S	21°43'S
Latitude		51°52'O	42°07'O	42°07'O	49°51'O	49°51'O
Localização		Três Lagoas	Taiobeiras	Taiobeiras	Lins	Lins
Estado		MS	MG	MG	SP	SP
Elevação	m	320	750	750	444	444
Clima		Semi úmido	Semi árido	Semi árido	Tropical	Tropical
Tipo de solo		Latossolo	Areia quartzosa	Areia quartzosa	Latossolo	Latossolo
Precipitação anual	mm	1400	855	855	1300	1300
Temperatura média	°C	24	27	27	22	22
Espécie		EG x EU	EG x EU	EC x ET	EC x ET	EC x ET
Clone		H1069	I144	C58	C58	C58
Idade	anos	2,8	3,0	3,3	3,2	3,2
Tipo de plantio		Simple	Simple	Simple	Simple	Duplo
Espaçamento	m	3 x 1	4 x 0,5	3 x 0,5	3 x 0,5	2 x 0,7 x 0,5
Área	ha	3,82	9,80	0,74	2,37	1,03
Densidade pop.	árvores ha ⁻¹	3.333	5.000	6.666	6.666	14,814
IMA	m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹	59	30	51,6	24,8	38,8
DAP (médio)	cm	8,1	6,6	7,5	7,0	5,4
AB (média)	m ² ha ⁻¹	16,7	14,3	24,5	19,6	16,6

Nota: IMA = incremento médio anual; DAP = diâmetro médio a altura do peito (1,30 m); DP = desvio padrão; AB = área basal média; EG = *Eucalyptus grandis*; EU = *Eucalyptus urophylla*; EC = *Eucalyptus camaldulensis*; ET = *Eucalyptus tereticornis*

Nesta pesquisa foi conduzido um detalhado estudo de movimento e tempo durante o ciclo de colheita (MAGAGNOTTI et al., 2013). O processo de preenchimento com cavacos em um transbordo foi assumido como um ciclo, com início no primeiro movimento da colhedora enquanto despeja cavacos no transbordo vazio e término ao atingir sua capacidade máxima (Figura 2). Para cada ciclo, foram determinados os seguintes parâmetros: área de colheita, quantidade de biomassa colhida, tempo de colheita e consumo de combustível.



Figura 2. Forrageira New Holland colhendo plantio energético de eucalipto

A área de colheita de cada ciclo foi calculada pela multiplicação da distância entre linhas pela distância percorrida, coletado por meio de leituras feitas pelo computador de bordo da colhedora. Estes resultados foram duplamente aferidos com os dados obtidos por um GPS Garmin 60 CSX. O volume (m^3) de biomassa colhida foi estimado medindo a capacidade volumétrica de cada transbordo produzido durante cada ensaio e a massa (kg) de biomassa colhida foi estimada pesando 20 transbordos-amostras. A umidade dos cavacos foi obtida utilizando o método gravimétrico segundo a norma ASABE S358.2 (2010), para isto, pelo menos dez amostras de 500 g cada, coletadas aleatoriamente dos transbordos cheios, colocadas em sacos selados e levadas para o laboratório de análises, foram colocadas em estufa de ventilação forçada e secas a temperatura de $103 \pm 2^\circ C$ durante 72 horas e pesadas em uma balança de precisão.

O tempo de colheita e combustível consumido foram coletados pelo computador de bordo da colhedora. Este modelo de forrageira possui um sistema de coleta de informações integradas conhecida, como *Intelliview*, capaz de armazenar dados como velocidade ($km\ h^{-1}$), consumo de combustível ($l\ h^{-1}$), tempo de colheita (h) e distância percorrida (m). Os dados de tempo de colheita foram comparados com os dados coletados por um cronômetro convencional e provou-se acurado.

Utilizou-se uma subamostra de dois hectares para o estudo de movimento e tempo e divididos nas seguintes atividades: colheita, manobra, espera por

transbordo e outras paradas. Colheita e manobra foram consideradas como tempo produtivo e as outras atividades como tempo improdutivo (SPINELLI e VISSER, 2009).

O conjunto de dados foram analisados utilizando o teste de normalidade Ryan-Noyer. Após, os dados foram verificados por homocedasticidade usando o teste de Bartlett. Dados homocedásticos foram testados utilizando o teste Tukey-Kramer, no qual é recomendado para conjunto de dados desbalanceados. Por outro lado, dados não normais e/ou heterocedásticos foram conduzidos aos testes não paramétricos e post-hoc. O teste de Kruskal-Wallis foi utilizado para checar a presença de diferenças estatisticamente significantes entre grupos, e o teste post-hoc Scheffes para apontar tais diferenças no grupo específico. Ambos testes são recomendados para dados com diferentes números de observações, distribuições não normais e com heterocedasticidade. Relações foram modeladas por meio da análise de regressão linear múltipla. O efeito da granulometria e sistema de plantio foram testadas separadamente, pois apenas plantio de linhas duplas (talhão E) foram colhidos com a forrageira configurada para 20 mm de granulometria e, não houve observações com ela configurada para 30 mm. Por esta razão, o efeito da granulometria foi testado após remover todas as observações do banco de dados coletadas no talhão E, enquanto que o efeito do sistema de plantio foi testado após remover todas as observações obtidas na configuração abaixo de 30 mm. Desta forma, pode-se trabalhar com dois bancos de dados homogêneos e balanceados. Para todos os testes, foi utilizado 5% de nível de significância.

A colheita total foi de 17,8 hectares sendo produzidos 5610 m³ de cavacos ou 2170 toneladas de massa úmida de cavacos ou 231 transbordos. O tempo total de avaliação foi 40,7 horas, excluindo tempo improdutivo.

2.3 Resultados

Houve variação na área total colhida e na produtividade florestal (PF), assim como a umidade das árvores colhidas. A área colhida individual variou de 0,8 a 9,8 hectares, com média de 3,6 hectares. A produtividade variou de 90,1 a 157,2 t ha⁻¹ com uma média de 123 t ha⁻¹ (Tabela 2). O incremento médio anual (IMA) dos talhões variaram entre 32,2 e 47,6 t ha⁻¹ ano⁻¹, com valor médio de 39,5 t ha⁻¹ ano⁻¹. A média da umidade dos cavacos foi de 56,4%, com variações significantes entre os talhões. Particularmente, o talhão B apresentou o valor mais baixo comparado aos outros talhões (Tabela 2). Nesta área utilizou-se o clone I144, mesmo clone do talhão C, que produziu cavacos com maior umidade (54 e 59%

de umidade, respectivamente). Descontando a umidade, a produção de matéria seca variou entre 13,3 e 19,9 t ha⁻¹ ano⁻¹, com média de 17,2 t ha⁻¹ ano⁻¹.

A capacidade de processamento (CP) ficou entre 38,8 e 65,1 t h⁻¹, contabilizando apenas o tempo efetivo de colheita, ou seja, excluindo manobras e paradas (Tabela 2). Contudo, o tempo efetivo não inclui paradas ocasionais da plataforma de corte, geradas pela introdução excessiva de material ou acionamento automático do detector de metal. Estas paradas representaram menos que 5% do tempo total. Outro fator que poderia interferir no tempo efetivo eram os indivíduos com alto valor de DAP, porém não ultrapassaram o diâmetro de 150 mm.

Tabela 2. Resultados do estudo: produtividade florestal, capacidade de processamento e consumo de combustível

Talhão		A	B	C	D	E	Total	Média	Teste
Observações	n	22	100	21	66	22	231	-	
Área	ha	3,82	9,80	0,74	2,37	1,03	17,77	-	
Peso úmido	t	344	1.274	116	336	100	2.170	-	
PF	t ha ⁻¹	90 ^a	130 ^b	157 ^c	142 ^{bc}	97 ^a	-	129	Tukey-Kramer
Umidade	%	55,8 ^{ab}	54,1 ^b	58,6 ^{cd}	57,6 ^{ad}	56,3 ^{abc}	-	56,4	Tukey-Kramer
Velocidade	km h ⁻¹	1,42 ^{ad}	1,26 ^b	1,12 ^c	1,35 ^d	1,49 ^a	-	1,31	Tukey-Kramer
CP	t h ⁻¹	38,8 ^a	65,1 ^b	53,2 ^c	56,6 ^c	47,4 ^{ac}	-	57,4	Tukey-Kramer
Consumo de combustível	l h ⁻¹	78,3 ^a	84,6 ^{bc}	86,5 ^c	80,9 ^{ab}	81,0 ^{abc}	-	82,3	Scheffe
	l t ⁻¹	2,2 ^a	1,3 ^b	1,8 ^{ac}	1,6 ^c	1,9 ^{ac}	-	1,6	Scheffe
Granulometria	mm	30	30	20	20	20			

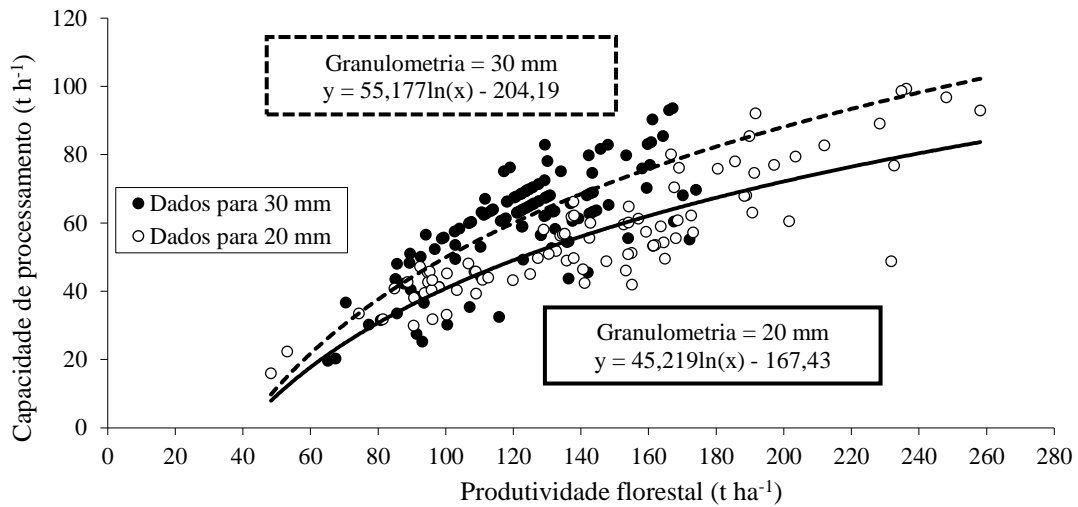
Nota: PF = produtividade florestal; CP = capacidade de processamento; n = número de observações ou quantidade de transbordos cheios; umidade = umidade dos cavacos; h = tempo efetivo de colheita em horas (sem manobras e paradas); letras diferentes na mesma linha indicam diferenças estatisticamente significativas ($\alpha < 0,05$) entre os talhões.

A produtividade florestal e a capacidade de processamento reportados na Tabela 2 representam os resultados médios dos talhões. Quando analisado de forma individual (cada observação) ambos parâmetros apresentaram variações muito maiores: 16,3 a 99,3 t h⁻¹ para a capacidade de processamento e 48,3 a 258,1 t ha⁻¹ para produtividade florestal. Estas duas variáveis apresentaram correlação: a análise de regressão mostrou que a capacidade de processamento é diretamente proporcional a produtividade florestal e a granulometria (Tabela 3, Figura 3). A capacidade de processamento também está correlacionada com o sistema de plantio sendo maior nas linhas duplas comparado as linhas simples (Tabela 3, Figura 4).

Tabela 3. Equações de regressão para estimar a capacidade de processamento (CP) e consumo de combustível

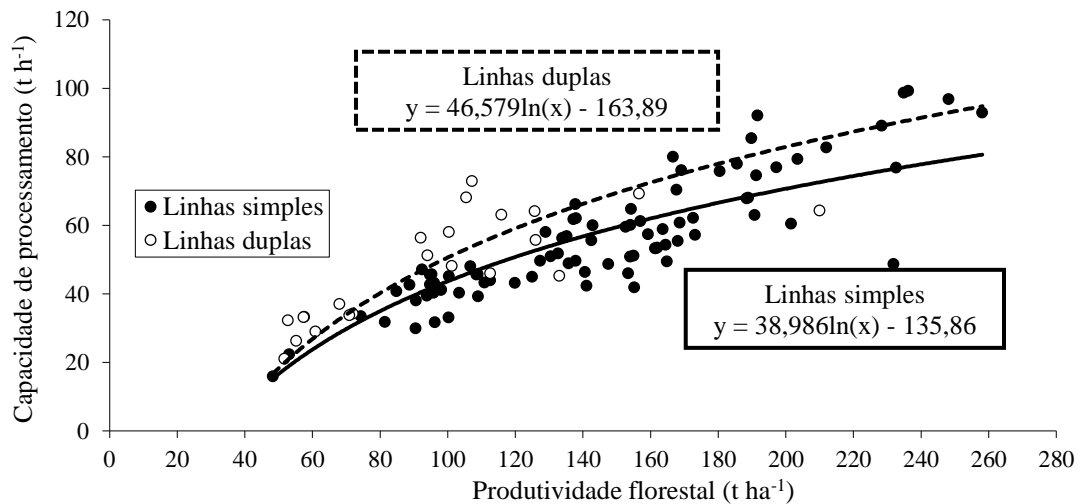
Equação 1 (Apenas linhas simples)				
CP = a + b * ln PF + c * PF * Menor				
R ² (ajustado) = 0,658; n = 209				
	Coeficiente	EP	Valor-T	Valor-P
a	-204,190	13, 144	-15,535	<0,0001
b	55,177	2,796	19,925	<0,0001
c	-0,080	0,01	-8,223	<0,0001
Equação 2 (Apenas 20 mm)				
CP = a + b * ln PF + c * PF * Dupla				
R ² (ajustado) = 0,710; n = 109				
	Coeficiente	EP	Valor-T	Valor-P
a	-135,861	11,717	-11,595	<0,0001
b	38,986	2,392	16,301	<0,0001
c	0,061	0,022	2,851	0,0052
Equação 3				
Consumo combustível horário = a + b * CP				
R ² (ajustado) = 0,111; n = 227				
	Coeficiente	EP	Valor-T	Valor-P
a	75,106	1,468	51,171	<0,0001
b	0,134	0,025	5,394	<0,0001
Equação 4				
Consumo combustível por tonelada = a + b * CP ^{0,93}				
R ² (ajustado) = 0,944; n = 231				
	Coeficiente	EP	Valor-T	Valor-P
a	0,046	0,026	1,783	0,0759
b	60,296	0,969	62,21	<0,0001

Nota: Capacidade de processamento (CP) em peso úmido (t) por hora, colheita apenas (não incluso: manobra e paradas); PF = produtividade florestal (t ha⁻¹); Menor = variável indicadora para menor granulometria; 0 se 30 mm, 1 se 20 mm; EP = Erro padrão do coeficiente; Dupla = variável indicadora para linhas duplas: 0 se linhas simples, 1 se linhas duplas.



Nota: Capacidade de processamento em peso (t) úmida por hora, apenas tempo de colheita (manobras e paradas não incluídas); equações de regressão foram construídas por 209 pontos de dados e caracterizado por $R^2 = 0,658$

Figura 3. Capacidade de processamento em função da produtividade florestal e granulometria (Equação 1, Tabela 3)



Nota: Capacidade de processamento em peso úmido (t) por hora, apenas tempo de colheita (manobras e paradas não incluídas); equações de regressão foram construídas por 109 pontos e caracterizado por $R^2 = 0,710$

Figura 4. Capacidade de processamento em função da produtividade florestal e do sistema de plantio (Equação 2, Tabela 3)

O consumo de combustível variou entre 78,3 e 86,5 l h⁻¹, no tempo efetivo de colheita, excluindo manobra e paradas. O valor mais alto alcançado foi de 95,8 l h⁻¹. O consumo horário de combustível apresentou baixa correlação com a capacidade de processamento (Equação 3, Tabela 3). Entretanto, o aumento no consumo apresentou menor correlação com o aumento da capacidade de processamento, que resultou em uma relação

inversamente proporcional entre a capacidade e o consumo de combustível por tonelada produzida (Equação 4, Tabela 3).

O consumo de combustível por tonelada variou entre 1,3 e 2,2 l t⁻¹, com o menor valor obtido no talhão B, que apresentou os maiores resultados de capacidade. A granulometria não apresentou efeito no consumo horário, entretanto seu efeito no consumo por tonelada produzida foi influenciado pela capacidade de processamento. Ao diminuir a granulometria de 30 para 20 mm resultou em um aumento de 22% do consumo médio de combustível por tonelada produzida.

O tempo efetivo de colheita representou 62% do tempo total (Figura 5). Isto inclui as paradas ocasionais da plataforma, que resultou em menos de 5% da colheita efetiva ou menos que 3% do tempo total. Por esta razão, estas paradas não estão inclusas no gráfico. Manobras representaram um adicional de 9%, ou seja, o tempo produtivo da colheita foi 71% do tempo total. A espera por transbordos foi a principal causa de parada (atrasos), totalizando três quartos do tempo total de parada ou 22% do tempo total. As outras paradas derivaram de fatores organizacionais, principalmente paradas para instruções e a necessidade de desviar-se de árvores nativas presentes no talhão. A capacidade de processamento da colheita foi estimada com base no tempo total e resultou em valores entre 24 a 40 toneladas por tempo programado. Este resultado não inclui a manutenção preventiva que, geralmente dura em torno de uma hora ao final de cada turno.

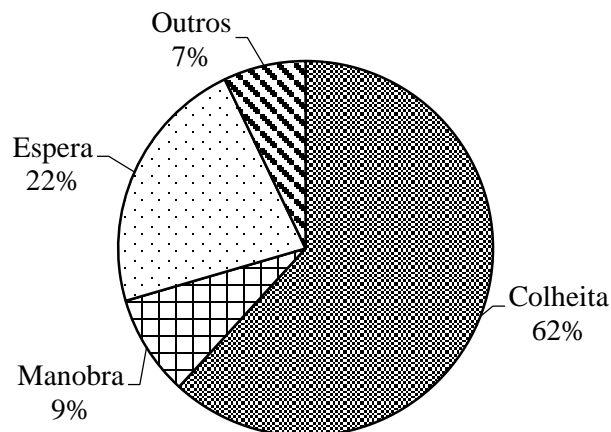


Figura 5. Resultado do estudo de movimento e tempo

2.4 Discussão

A elevada produtividade florestal comprova o desempenho das florestas brasileiras de curta rotação. A produção anual é maior que as produções registradas na Europa e, de certa forma, no hemisfério norte, onde os resultados mais comuns estão na ordem de 10-12 toneladas de matéria seca $\text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ (SPINELLI et al., 2011). Devido as condições edafoclimáticas e a qualidade do material genético escolhido, os talhões explorados neste estudo ultrapassaram estes valores, atingindo produções superiores a 18 toneladas de matéria seca $\text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$. O material perdido durante a colheita não pôde ser avaliado neste estudo, podendo ser um fator limitante na avaliação deste novo equipamento. Entretanto, estudos anteriores conduzidos com a mesma colhedora reportaram perdas constantes de material, mas que possuem baixa correlação com as condições dos plantios (BERHONGARAY et al., 2013; EISENBIES et al., 2014a). Estas mesmas publicações estimaram perdas na ordem de 1 a 3 toneladas de matéria seca ha^{-1} . É importante ressaltar que em todos talhões colheu-se indivíduos da primeira rotação e as avaliações em curtas rotações em países europeus geralmente mostram que a produção na primeira rotação é menor comparada às próximas duas rotações, entretanto nem todos estudos concordam (SLEIGHT et al., 2015). Portanto, os resultados calculados neste estudo podem não ser representativos das próximas rotações.

Os diâmetros dos fustes também foram bem maiores que os encontrados em estudo realizados na Europa e nos EUA onde obteve-se diâmetros entre 20 e 40 mm (EISENBIES et al., 2014a; SPINELLI et al., 2011; SPINELLI et al., 2009), parcialmente devido ao rápido crescimento e, parcialmente por todos os talhões estarem na primeira rotação, fase em que a biomassa está concentrada em um único fuste ao invés de ser distribuído em diversas rebrotas. Aparentemente, indivíduos com elevado DAP não prejudicaram esta nova colhedora. Esta é uma das maiores preocupações na utilização de forrageiras para colheita de plantios brasileiros de eucalipto.

Os gráficos da Figura 3 e 4 mostram que a capacidade de processamento continua aumentando juntamente com a produtividade florestal. A redução na granulometria acarreta um efeito negativo na capacidade, pois são necessários mais cortes por unidade de massa, assim, reduzindo o fluxo de material para a colhedora. Diversos estudos conduzidos com picadores de madeira convencionais demonstram de forma empírica este mecanismo e reportam perda da capacidade entre 15% (SPINELLI e MAGAGNOTTI, 2012) e 30% (FACELLO et al., 2013) corroborando com os resultados de 19-30% estimado neste estudo. Isto talvez responda parcialmente a questão sobre o efeito da granulometria no desempenho da

máquina, colocado por Eisenbies et al. (2014b) após determinarem seu efeito na distribuição de partículas. Entretanto, uma resposta mais adequada poderia ser estabelecida pela determinação do conjunto dos efeitos (distribuição da granulometria e desempenho da colhedora) para o mesmo equipamento e cultura, o que não é o caso no momento. Trabalhos futuros deverão focar neste problema e prover dados de qualidade do produto final e desempenho da colhedora em diferentes granulometrias nas mesmas condições.

O aumento na capacidade de processamento ao colher o plantio de linhas duplas pode ser atribuído ao tamanho individual das árvores, consequência da distribuição do potencial de crescimento ao longo da grande quantidade de indivíduos. Forrageiras foram originalmente desenvolvidas para se colher gramíneas, portanto espera-se que seu desempenho seja melhor em plantios que possuam muitas árvores de menor porte, ao invés de poucos de grande porte (SPINELLI et al., 2009).

O fato de todos os talhões estarem na primeira rotação deve ser considerado com precaução ao avaliar os resultados gerados neste estudo, pois se a presença de um único fuste pode exercer uma força excessiva na máquina, então também é verdade que colher diversos fustes de rebrota representam um desafio adicional e, este estudo não avaliou o desempenho desta nova forma de colheita em sistema de rebrotas. Estudos conduzidos com *Poplar* e *Salix* nos EUA indicam que a forrageira conseguiu colher com desempenho satisfatório em ambos os sistemas.

Os resultados obtidos neste experimento corroboram com os resultados de pesquisas anteriores (Tabela 4), nos quais utilizaram como matéria-prima o *Poplar* e *Salix* que possuem uma produtividade florestal substancialmente menor.

Tabela 4. Comparações com outros estudos utilizando forrageiras adaptadas para colheita de SFCR

Espécie	País	Plataforma	Forrageira	Potência (kW)	PF (t ha ⁻¹)	CP (t h ⁻¹)	Aproveitamento (%)	Referência
<i>Eucalyptus</i>	Brasil	NH 130FB	FR9060	400	90 – 157	39 – 65	71	Neste estudo
<i>Poplar e Salix</i>	Bélgica	NH 130FB	FR9090	565	16	7,4	-	BERHONGARAY et al. (2013)
<i>Poplar e Salix</i>	Alemanha	NH 130FB	FR9050-60	343-400	36 – 84	32 – 61	28 – 68	SCHWEIER e BECKER (2012)
<i>Salix</i>	EUA	NH 130FB	FR9080	470	43 – 70	70 – 77	64	EISENBIES et al. (2014a)
<i>Poplar</i>	Itália	Claas HS2	Claas 840-60	254-306	7 – 72	11 – 56	79	SPINELLI et al. (2009)
<i>Poplar</i>	Itália	GBE	Claas 880-90	340-445	15 – 117	22 – 92	79	SPINELLI et al. (2009)
<i>Poplar e Salix</i>	Itália	Biopoplar	JD 7400	330	51 – 63	25 – 61	83	SPINELLI et al. (2011)
<i>Poplar e Salix</i>	Itália	HTM 1500	Krone Big X	440	30 - 98	45 – 62	90	SPINELLI et al. (2011)

Nota: PF = produtividade florestal; CP = capacidade de processamento; t = tonelada de matéria úmida; Aproveitamento = tempo produtivo (colheita e manobras) dividido sobre tempo total de colheita

As altas produções geradas no Brasil pelo eucalipto são próximas, mas nunca semelhantes aos melhores plantios de *Poplar* na Itália. Os resultados obtidos estão dentro das faixas da capacidade de processamento de estudos anteriores, que apresentam alta variação entre 7 a 90 t h⁻¹. Entretanto, valores centrais estão entre 30 e 60 t h⁻¹, que se equivalem com os encontrados neste estudo. Neste ponto, é importante ressaltar que os desempenhos atingidos nos trabalhos citados anteriormente foram em operações comerciais, onde a presença de um operador da colhedora experiente representa um papel fundamental. O operador deste ensaio estava bem familiarizado com o equipamento, porém operou a máquina apenas durante algumas semanas antes do início do ensaio. Portanto, espera-se que os níveis de produtividade sejam ainda maiores com o aumento na experiência por parte do operador.

Os níveis de aproveitamento deste estudo estão de acordo com o que se espera deste tipo de operação (Tabela 4). Estudos realizados na Itália apresentaram níveis de aproveitamento ligeiramente superiores, sendo uma das únicas avaliações realizadas em rotina comercial. Todos os outros representam operações experimentais que ainda necessitam de ajustes na logística. A espera por transbordo é o tempo improdutivo mais relevante em todos os casos e, principalmente, em experimentos. Assim, espera-se também uma melhora no aproveitamento do tempo.

Apenas um estudo fornece informações sobre o consumo de combustível desta mesma forrageira utilizada para colher SFCR (SCHWEIER e BECKER, 2012). Este estudo reportou um consumo de 3,5 litros por tonelada de matéria seca ou 1,6 litros por tonelada de matéria úmida, resultados similares aos encontrados na presente pesquisa.

Forrageiras modificadas não são as únicas opções disponíveis. Um SFCR pode ser colhido por diferentes máquinas, incluindo máquinas que cortam e transportam as toras (CIVITARESE et al., 2015) ou máquinas que arrastam as toras colhidas (SAVOIE et al., 2013; SAVOIE et al., 2014). Contudo, estudos recentes mostram que a utilização de forrageiras adaptadas representa a opção mais efetiva (BERHONGARAY et al., 2013; PECENKA e HOFFMANN, 2015). Porém, este sistema de colheita possui a desvantagem de produzir material úmido e, conseqüentemente, menor poder calorífico (PECENKA et al., 2014) e sujeitos a degradação por fungos (BARONTINI et al., 2014). Estes inconvenientes podem ser mitigados ao serem utilizados juntamente com outro material mais seco, além disso, a umidade talvez não represente um problema para as mais

novas bio-refinarias (EISENBIES et al., 2014b). Estudos futuros devem focar nas próximas rotações, visando determinar o efeito na colheita de indivíduos com menores DAPs e, possivelmente, com maiores níveis de produtividade florestal.

2.5 Conclusões

No geral, este estudo possui o mérito de apresentar o estado da arte do sistema de colheita utilizando corte e picagem mostrando que pode ser efetivamente utilizado em plantios energéticos no Brasil, apesar dos altos valores de produtividade florestal e DAP. Forrageiras modernas e de grande potência conseguem ser efetivamente empregadas nas condições da primeira rotação dos SFCR, independente do espaçamento empregado e do sistema de plantio (linhas simples ou duplas).

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Case New Holland (CNH) que disponibilizaram o equipamento para os ensaios e a CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – pela bolsa concedida ao primeiro autor.

2.6 Referências

BARONTINI, M. et al. Storage dynamics and fuel quality of poplar chips. **Biomass and Bioenergy**, v. 62, p. 17-25, 2014.

BERHONGARAY, G.; EL KASMIQUI, O.; CEULEMANS, R. Comparative analysis of harvesting machines on an operational high-density short rotation woody crop (SRWC) culture: One-process versus two-process harvest operation. **Biomass and Bioenergy**, v. 58, p. 333-342, 2013.

CAMPINHOS JR, E. Sustainable plantations of high-yield shape Eucalyptus trees for production of fiber: the Aracruz case. **New Forests**, v. 17, n. 1-3, p. 129-143, 1999.

CIVITARESE, V. et al. Open-Air Drying of Cut and Windrowed Short-Rotation Poplar Stems. **BioEnergy Research**, p. 1-7, 2015.

DANFORS, B.; LEDIN, S.; ROSENQVIST, H. **Short-rotation willow coppice: growers' manual**. Jordbrukstekniska Institute, 1998. 40 ISBN: 9170721238.

EISENBIES, M. H. et al. Evaluation of a single-pass, cut and chip harvest system on commercial-scale, short-rotation shrub willow biomass crops. **BioEnergy Research**, v. 7, n. 4, p. 1506-1518, 2014a.

EISENBIES, M. H. et al. Quality and variability of commercial-scale short rotation willow biomass harvested using a single-pass cut-and-chip forage harvester. **BioEnergy Research**, v. 8, n. 2, p. 546-559, 2014b.

FACELLO, A. et al. The effect of knife wear on chip quality and processing cost of chestnut and locust fuel wood. **Biomass and Bioenergy**, v. 59, p. 468-476, 2013.

FENNING, T. M.; GERSHENZON, J. Where will the wood come from? Plantation forests and the role of biotechnology. **Trends in Biotechnology**, v. 20, n. 7, p. 291-296, 2002.

GONZALEZ, R. et al. Exploring the potential of Eucalyptus for energy production in the Southern United States: financial analysis of delivered biomass. Part I. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 2, p. 755-766, 2011.

GUERRA, S. P. S. et al. Heating value of eucalypt wood grown on SRC for energy production. **Fuel**, v. 137, p. 360-363, 2014.

IBA. Statistics of the Brazilian Tree Industry, Report 2015. Brazilian Tree Industry. Brasília, p.64., 2015

KORHONEN, J. et al. Factors driving investment in planted forests: a comparison between OECD and non-OECD countries. **International Forestry Review**, v. 16, n. 1, p. 67-77, 2014.

MAGAGNOTTI, N. et al. A new guide for work studies in forestry. **International Journal of Forest Engineering**, v. 24, n. 3, p. 249-253, 2013.

PECENKA, R.; HOFFMANN, T. Harvest technology for short rotation coppices and costs of harvest, transport and storage. **Agronomy Research**, v. 13, n. 2, p. 361-371, 2015.

PECENKA, R. et al. Development of bio-physical properties during storage of poplar chips from 15 ha test fields. **Biomass and Bioenergy**, v. 65, p. 13-19, 2014.

SAVOIE, P. et al. Harvest of Short-Rotation Woody Crops in Plantations with a Biobaler. **Energy and Power Engineering**, v. 5, n. 02, p. 39, 2013.

SAVOIE, P.; HÉBERT, P. L.; ROBERT, F.-S. Novel willow header adapted to a pull-type forage harvester: development and field experiments. In: 2014 Montreal, Quebec, Canada – July 13-16, 2014.

SCHWEIER, J.; BECKER, G. New Holland forage harvester's productivity in short rotation coppice: evaluation of field studies from a German perspective. **International Journal of Forest Engineering**, v. 23, n. 2, p. 82-88, 2012.

SEDJO, R. A. The potential of high-yield plantation forestry for meeting timber needs. **New Forests** v. 17, p. 339-359, 1999.

SIRY, J. P.; CUBBAGE, F. W.; AHMED, M. R. Sustainable forest management: global trends and opportunities. **Forest Policy and Economics**, v. 7, n. 4, p. 551-561, 2005.

SLEIGHT, N. J. et al. Change in Yield Between First and Second Rotations in Willow (*Salix* spp.) Biomass Crops is Strongly Related to the Level of First Rotation Yield. **BioEnergy Research**, p. 1-18, 2015.

SPINELLI, R.; MAGAGNOTTI, N. The effect of raw material, cut length, and chip discharge on the performance of an industrial chipper. **Forest Products Journal**, v. 62, n. 7, p. 584-589, 2012.

SPINELLI, R. et al. Upsized harvesting technology for coping with the new trends in short-rotation coppice. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 27, n. 4, p. 551-557, 2011.

SPINELLI, R.; NATI, C.; MAGAGNOTTI, N. Using modified foragers to harvest short-rotation poplar plantations. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 5, p. 817-821, 2009.

SPINELLI, R.; VISSER, R. J. Analyzing and estimating delays in wood chipping operations. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 3, p. 429-433, 2009.

STAPE, J. L. et al. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1684-1694, 2010.

VOLK, T. A. et al. The development of short-rotation willow in the northeastern United States for bioenergy and bioproducts, agroforestry and phytoremediation. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, n. 8, p. 715-727, 2006.

3. CAPÍTULO 2: Avaliação econômica da colheita mecanizada de um sistema florestal de curta rotação (SFCR): estudo de caso⁵

Oguri, G.; Guerra, S. P. S.; Takitane, I. C.; Caterina, G. L.; Esperancini, M. S. T.

Faculdade de Ciências Agrônomicas / Universidade Estadual Paulista
Rua José Barbosa de Barros, 1780 Botucatu - SP

RESUMO: O uso de colhedoras de forragem adaptadas para a colheita de biomassa florestal faz parte de um sistema de colheita consolidado em países da América do Norte e Europa, não existindo registro do seu uso em plantios florestais brasileiros. Estas máquinas são capazes de colher árvores inteiras e processá-las em cavacos, necessitando auxílio de um conjunto de transbordo acoplado ao trator para coleta e retirada dos cavacos da área de produção. Com o intuito de implantar esse novo sistema de colheita no Brasil, utilizou-se estes equipamentos em um sistema florestal de curta rotação (SFCR) de eucalipto. Objetivou-se avaliar economicamente este tipo de colheita em plantios no Brasil. Os resultados foram gerados em duas unidades monetárias, € h⁻¹ e € t⁻¹. Os custos finais encontrados foram menores comparados com resultados de outros trabalhos da bibliografia utilizando o mesmo tipo de equipamento em países de clima temperado.

Palavras-chave: biomassa florestal, colheita florestal, custo de colheita

⁵ Futuramente, esse capítulo será traduzido para a língua inglesa e se tornará capítulo de um livro internacional. Os valores de aquisição dos equipamentos são estimados. Os autores não garantem a rentabilidade do projeto. A citação de marcas e modelos dos equipamentos não indicam recomendação por parte do autor.

**Economic evaluation of short rotation eucalyptus plantation harvesting system:
a case study**

ABSTRACT: Modified forager use for forest biomass production is already a consolidated system in European and North American countries. However, in Brazil, so far there are no records of using this harvesting system. These machines are able to cut the trees and produces wood chips in a single-pass process requiring a tractor-pulled silage trailer to collect the wood chips. In order to make this harvest reality was used an Eucalyptus short rotation coppice (SRC). Focusing on an economic analysis of a forager machine attached to a cutting header adapted to Brazilian plantations. The economic results in € h^{-1} and € t^{-1} found, were lower when compared to the literature studies that used the same machines in temperate countries.

Keywords: forest biomass, forest harvesting, harvesting cost

3.1 Introdução

No Brasil, o *Eucalyptus* é um gênero promissor na produção de energia renovável por meio de sistemas florestais de curta rotação (SFCR) (GUERRA et al., 2012) uma vez que a superfície coberta pelas plantações destas espécies destinadas para a indústria é de, aproximadamente, 5,6 milhões de hectares (IBA, 2015). Plantios comerciais convencionais (3 x 2 m de espaçamento colhidos aos 6 a 8 anos de idade) conseguem atingir produtividades médias de 45 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ com o melhoramento genético e com condições edafoclimáticas ideais (GONÇALVES et al., 2013). Além disso, o eucalipto possui uma alta eficiência na captura e aproveitamento de nutrientes e principalmente, alta taxa de aproveitamento da água (STAPE et al., 2004). Quando utilizado o eucalipto em SFCR (colheitas aos 2 a 3 anos de idade) consegue-se produzir mais biomassa em um menor período quando comparado aos plantios convencionais, podendo atingir 120 m³ ha⁻¹ em apenas um ano (GUERRA et al., 2014).

Em um sistema florestal de curta rotação (SFCR) há o aumento da densidade populacional visando a alta produção de biomassa com baixo custo de produção (SPINELLI et al., 2009). Entretanto, o cultivo de espécies de rápido crescimento, como o eucalipto, para esta finalidade é caracterizado pela constante retirada de biomassa da área e, conseqüentemente, alta exportação de nutrientes, exigindo fertilizações extras para manter a fertilidade do solo e alta taxa de produtividade (MITCHELL et al., 1999). Por estes motivos, este sistema demanda operações altamente eficientes, especialmente a colheita que contribui com, aproximadamente, 50% do custo total (SPINELLI et al., 2009). Além disso, como uma fonte de energia, os cavacos precisam ter tamanhos uniforme (SPINELLI et al., 2011) e baixa teor de água. Este último parâmetro de qualidade é diretamente ligado ao seu preço de venda (NYSTRÖM e DAHLQUIST, 2004) e ao poder calorífico (ERGÜL e AYRILMIS, 2014). Para as termelétricas é importante que os cavacos entregues possuam baixa variação na umidade para evitar ineficiências durante o processo de combustão (NYSTRÖM e DAHLQUIST, 2004).

A colheita florestal convencional é composta por dois sistemas diferentes: colheita de toras curtas (CTC) e a colheita de toras longas (CTL). No primeiro sistema, o equipamento responsável pela colheita é conhecido por cabeçote Harvester, realizando o corte de base, derrubando a árvore, removendo parcialmente a casca e os galhos,

segmentando a tora em comprimento pré-determinado e outra máquina, o Forwarder, que coleta, transporta e empilha as toras processadas no limite do talhão para facilitar o seu carregamento (NURMINEN et al., 2006). No sistema de CTL, são necessários dois equipamentos para processar as toras, o Feller-buncher e o processador. O primeiro é responsável por derrubar as árvores inteiras e o segundo, remover os galhos e a casca. As toras são, posteriormente, transportadas para os carregadores pelo Skidder (GHAFARIYAN et al., 2011). Atualmente no Brasil, o sistema de CTC é comumente utilizado mais para realizar colheitas em plantios de primeira rotação e a CTL, nas demais rotações (rebrotas). Ambos sistemas necessitam de outro equipamento para processar as toras em cavacos, conhecido por picadores. Estes podem ser classificados em móveis ou estacionários (SPINELLI e MAGAGNOTTI, 2010) ou então, pelo seu sistema de picagem, sendo de tambor (rolo-facas) ou discos (MANZONE e BALSARI, 2015). Os picadores de tambor costumam ser mais produtivos comparados ao sistema de discos (SPINELLI et al., 2013), mas resultam em maior variação no tamanho dos cavacos (SPINELLI et al., 2005).

Em alguns países na Europa e América do Norte, o uso de forrageiras modificadas para colheita florestal é estudado desde os anos 90. Estas máquinas possuem como características a transformação de árvores inteiras em cavacos de madeira em uma única operação e, visualmente, se assemelham a colheita de cana-de-açúcar. Este tipo de colheita é conhecido como sistema de colheita e cavaqueamento. Alguns trabalhos encontrados na bibliografia mundial analisaram o desempenho operacional de algumas forrageiras adaptadas disponíveis no mercado internacional, sendo o *Poplar* spp. e o *Salix* spp. os gêneros florestais mais comumente utilizados (GHAFARIYAN et al., 2011; SCHWEIER e BECKER, 2012; EISENBIES et al., 2014).

A introdução das forrageiras adaptadas em plantios florestais no Brasil é recente. No ano de 2012, a empresa New Holland iniciou o processo de importação de uma forrageira com o intuito de colher plantios florestais de curta rotação (Figura 1).



Figura 1. Pilha de cavaco e a forrageira em um SFCR de eucalipto

Essa máquina é composta por uma forrageira com cabeçote florestal acoplado, equipado com duas serras circulares, responsáveis pelo corte de base, localizadas abaixo de duas torres alimentadoras; um *push-bar*, além de dois rolos alimentadores horizontais, nos quais direcionam as árvores para dentro da forrageira. O picador desta forrageira é do tipo rolo-facas, no qual foram instaladas 16 facas divididas em duas seções.

A escolha correta do tipo de colheita que será mais viável para cada finalidade é importante para gerar lucro na produção, uma vez que a colheita e a picagem representam o principal item no custo total (SGROI et al., 2015). Cada sistema de colheita possui vantagens e desvantagens (CULSHAW e STOKES, 1995) que devem ser consideradas nesta escolha. A Figura 2 representa o processo produtivo de cada sistema de colheita citado.

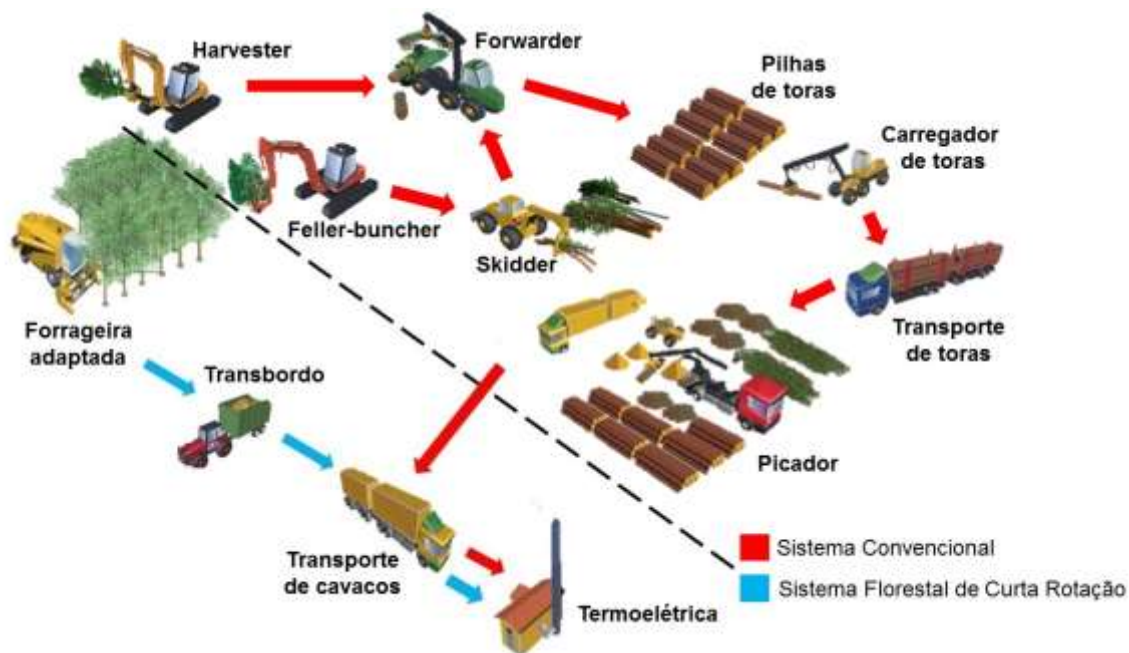


Figura 2. Esquema simplificado do processo de colheita convencional e colheita de SFCR. Adaptado de (EUFRADE JUNIOR et al.)

Conduziu-se um estudo de caso com o objetivo de avaliar economicamente o uso deste novo sistema de colheita no Brasil utilizando uma forrageira adaptada e um transbordo acoplado a um trator em um SFCR de eucalipto.

3.2 Material e métodos

A colheita foi realizada no interior do estado de São Paulo (48°24'43"W, 22°58'10"S), em uma área de 1,7 ha com híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* manejados no SFCR. O plantio possuía espaçamento de 3 x 1 m (3.333 plantas ha⁻¹) e foi colhido aos 2,8 anos de idade com diâmetro médio da base de 10 cm e 9 cm de altura do solo. O terreno possui a declividade máxima de 6%. O clima no local é mesotérmico caracterizado por invernos secos e temperaturas médias de 20°C. A precipitação média anual é de 1.500 mm, sendo 58% dela concentrada entre os meses de janeiro e junho. O potencial de evapotranspiração anual é de 945 mm com 33% ocorridos no verão (CUNHA e MARTINS, 2009).

O sistema integrado de colheita escolhido era composto por uma forrageira New Holland acoplada por uma plataforma florestal da mesma fabricante auxiliados por dois tratores New Holland e quatro transbordos TMA (Tabela 1).

Tabela 1. Descrição dos equipamentos utilizados.

COLHEDORA FR9060 / PLATAFORMA 130FB	
Fabricante	CNH (Case New Holland)
Motor: marca / modelo	Iveco / Cursor 13TCD
Potência máx. (ISO 14396) a 2000 rpm (kW / cv)	435 / 591
Número de facas	16 (2x8)
TRATOR TM 7040	
Fabricante	CNH (Case New Holland)
Motor: marca	New Holland
Potência a 2.220 rpm (kW / cv)	132 / 180
TRANSBORDO VTX 10.000	
Fabricante	TMA
Capacidade de carga (kg)	10.000
Capacidade volumétrica (m ³)	24

Foi utilizada a metodologia proposta pela ASABE (2011a) para estimar os custos finais que são apresentados em duas unidades: custo por tempo e por unidade de material colhido.

Os custos fixos (CF) são compostos por depreciação, juros, taxas, abrigo e seguro (TAS), que foram estimados para todos os equipamentos utilizados durante a colheita (forrageira, tratores e transbordos) e estão detalhados na Equação 1:

$$CF = \frac{\left\{ \left[\frac{V_i + V_f}{2} \times r \right] + \left[\frac{V_i - V_f}{V_u} \right] + TAS \right\}}{u} \quad [1]$$

Onde:

CF = custo fixo (€ h⁻¹)

V_i = valor inicial ou de aquisição (€)

V_f = valor final ou de venda (€)

r = taxa de juros (% ao ano)

V_u = vida útil ou econômica (anos)

TAS = custo de taxas, seguro e abrigo; % do valor inicial (€ ano⁻¹)

u = horas de uso no ano

Os custos variáveis (CV) são compostos por despesas como o combustível, óleos e lubrificantes, reparos e manutenções, mão-de-obra aplicados da forrageira e dos tratores. Para aquisição do consumo de combustível do trator foi instalado um medidor de fluxo (fluxômetro), marca OVAL, modelo M-III, interligado em um coletor de dados (*datalogger*), marca Campbell Scientific, modelo CR100. Este fluxômetro envia o número de pulsos com a quantidade de combustível que foi consumido e a quantidade que retorna da bomba de injeção de combustível para o *datalogger* que calcula diferença dos pulsos. Os dados de consumo de combustível da colhedora foram obtidos por meio do computador de bordo da própria FR9060 (*Intelliview*). Estimou-se os custos de óleo e lubrificantes com a porcentagem de 15% do custo de combustível.

De acordo com a ASABE (2011b), os custos de reparo e manutenção pode ser determinado pela Equação 2 utilizando os fatores de reparo e manutenção (RF1 e RF2):

$$CRM = \frac{P \times FR1 \times \left(\frac{h+u}{1000}\right)^{RF2} - P \times FR1 \times \left(\frac{h}{1000}\right)^{RF2}}{u} \quad [2]$$

Onde:

CRM = custo de reparo e manutenção para o total de horas de uso acumulado (€ h⁻¹)

RF1 e RF2 = fatores de reparos e manutenção

P = preço de aquisição (€)

h = horas acumuladas de uso

u = horas de uso no ano

O custo de mão-de-obra foi estimado com base no salário mensal e horas de trabalhos, incluindo o fator de correção de 25% devido ao tempo ocioso, ou seja, o tempo gasto em reparos, abastecimento das máquinas, entre outros. A jornada diária de trabalho foi de dois turnos de quatro horas cada. Os salários e encargos sociais foram estimados com base nos dados fornecidos pelas empresas florestais parceiras.

Os dados utilizados para a análise de custos são apresentados na Tabela 2. Alguns dados referentes a colhedora foram estimados pois o produto ainda não é comercial no território nacional. Os preços em reais (R\$) foram convertidos para o euro (€) utilizando a taxa de câmbio média de 2015 no valor de €3,16 segundo o site oficial do Banco

Central do Brasil (www.bcb.gov.br). O custo variável do transbordo constituiu-se apenas de reparos e manutenção.

Tabela 2. Dados de custos dos equipamentos utilizados

Descrição		Colhedora*	Trator	Transbordo
Preço estimado de aquisição	€	316.500,00	55.380,00	28.500,00
Quantidade utilizada	n	1	2	4
Vida útil estimada	anos	7	9	12
Horas de uso anual	h	600	1.500	n.a.
Valor residual	%	10,00	10,00	10,00
Taxa de juros	%	5,00**	5,00	5,00
Abrigo	%	0,75	0,75	0,75
Seguro	%	0,25	0,25	0,25
Consumo de combustível	l h ⁻¹	80	25	n.a.
Custo do combustível	€ l ⁻¹	0,80	0,80	n.a.
Fator de reparo 1		0,03	0,003	0,16
Fator de reparo 2		2,0	2,0	1,6
Salário do operador	€ mês ⁻¹	633,00	633,00	n.a.
Encargos sociais	%	125,00	125,00	n.a.

Nota: * conjunto FR9060 e 130FB / ** segundo KTBL (KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT, 2014) / n.a. = não aplicável

Para a estimativa do custo por unidade produzida utilizou-se a capacidade de processamento (CP) expresso em toneladas secas por hora, uma vez que os cavacos são produzidos a partir de árvores em pé com um teor de umidade médio de 52%.

A produtividade (P) por área foi calculada por meio da Equação 3.

$$P = \frac{D \times E}{1000 \times T} \quad [3]$$

Onde:

P = produtividade (ha h⁻¹)

D = distância percorrida durante a colheita (m)

E = espaçamento entre as linhas de plantio (m)

T = tempo de duração da distância percorrida (h)

3.4 Resultados e discussões

A produtividade e a capacidade de processamento calculadas neste estudo foram de $0,44 \text{ ha h}^{-1}$ e $31,0 \text{ t}_{\text{seca}} \text{ h}^{-1}$, respectivamente. Utilizando a mesma colhedora em plantio de *Poplar* no sistema de curta rotação na Alemanha, pesquisadores obtiveram uma média de $0,90 \text{ ha h}^{-1}$ e uma CP de $14,6 \text{ t}_{\text{seca}} \text{ h}^{-1}$ (SCHWEIER e BECKER, 2012). Ensaios conduzidos nos EUA na colheita de *Salix* resultaram em produtividades entre $1,8$ e $2,3 \text{ ha h}^{-1}$ e CP entre $23,9$ e $24,9 \text{ t}_{\text{seca}} \text{ h}^{-1}$, necessitando velocidades entre 8 a 10 km h^{-1} , nas quais são irreais para as condições oferecidas por um SFCR (EISENBIES et al., 2014). Ambos estudos citados foram conduzidos em países de clima temperado, onde os gêneros mais utilizados como fonte de matéria-prima são o *Salix* spp. e o *Poplar* spp. Estes gêneros são usualmente colhidos aos 3 a 4 anos de idade e possuem uma densidade básica média de 350 e 410 kg m^{-3} (THARAKAN et al., 2003), respectivamente, e o *Eucalyptus* spp., 430 kg m^{-3} (GARCIA, 2013), esta diferença pode explicar a maior CP encontrada neste estudo.

A produtividade da colheita por área está relacionada com a velocidade da colheita, que é limitada pelas condições dos talhões, tais como, declividade, tipo de solo, presença de tocos antigos nas entrelinhas, diâmetro das árvores, entre outros; e também pela experiência do operador e potência da colhedora. A Tabela 3 apresenta os custos operacionais do sistema que utiliza o conjunto formado pela colhedora, pelos dois tratores e quatro transbordos.

Tabela 3. Custos operacionais do sistema

	Colhedora		Tratores		Transbordos	
	€ h ⁻¹	€ t _{seca} ⁻¹	€ h ⁻¹	€ t _{seca} ⁻¹	€ h ⁻¹	€ t _{seca} ⁻¹
Custos fixos						
Depreciação	67,81	4,97	7,38	0,54	5,70	0,42
Juros	14,50	1,06	2,03	0,15	2,09	0,15
Abrigo	3,96	0,29	0,55	0,02	0,57	0,04
Seguro	1,32	0,10	0,18	0,01	0,19	0,01
CFT	87,59	6,42	10,15	0,71	8,54	0,63
Custos variáveis						
Combustível	64,05	4,70	40,03	2,93	-	-
Óleos e lubrificantes	9,61	0,70	12,01	0,88	-	-
Manutenção	5,70	0,42	0,50	0,04	5,81	13,21

Operador	4,94	0,36	9,89	0,73	-	-
CVT	84,30	6,18	62,43	4,58	5,81	13,21
CT	258,83	18,95				

Nota: CFT = custos fixos totais; CVT = custos variáveis totais; CT = custo total (1 colhedora, 2 tratores e 4 transbordos); taxa de juros = 5,0%; * taxa de câmbio = € 1,00 = R\$ 3,16

No estudo realizado por Schweier e Becker (2012) o custo total estimado foi de € 281 h⁻¹ e € 19,70 t_{seca}⁻¹. O custo individual da colhedora por unidade de tempo encontrado por Berhongaray et al. (2013) foi de € 212,50 h⁻¹. Apesar do elevado valor dos encargos sociais sobre o salário do operador e a elevação do câmbio, os custos operacionais estão abaixo dos encontrados na bibliografia. Esta diferença é ainda mais expressiva devido ao incremento médio anual dos SFCR de eucalipto e, seus reflexos sobre a capacidade de processamento gerada pela colhedora neste sistema.

A Tabela 4 mostra a porcentagem que cada item contribuiu na formação do custo total de cada equipamento.

Tabela 4. Participação de cada elemento na formação do custo total individual

Custos	Colhedora	Trator (%)	Transbordo
Custos Fixos			
Depreciação	39,5	10,2	39,7
Juros	8,4	2,8	14,5
Abrigo	2,3	0,8	4,0
Seguro	0,8	0,3	1,3
Custos Variáveis			
Combustível	37,3	55,2	-
Lubrificantes	5,6	16,5	-
Reparos e manutenção	3,3	0,7	40,5
Operador	2,9	13,5	-

A depreciação e o combustível são os dois fatores que mais contribuíram para o custo total da colhedora, justificado pelo elevado preço do equipamento e do consumo de combustível, respectivamente. A experiência do operador possui grande influência no consumo de combustível da colhedora, pois é necessário adequar a velocidade de colheita com as condições do plantio com o intuito de produzir mais cavacos em menos tempo sem desperdiçar árvores e combustível além de preservar a vida útil dos discos de cortes e do conjunto de facas. Entretanto, esta forrageira ainda é um equipamento não-

comercial no Brasil assim, a vida útil e as horas de uso anual são estimados e, portanto, com a adaptação dos plantios florestais para este tipo de colheita, ambos parâmetros podem ser ainda maiores reduzindo a depreciação da colhedora.

Em relação ao trator, a maior parte do custo total está relacionado ao diesel consumido e, novamente, a experiência do operador é determinante. A rotação de trabalho adequada para cada etapa da colheita, a utilização correta da lastragem, o tipo de pneus e a sua calibração interna são fatores que influenciam significativamente no desempenho de um trator (MONTEIRO et al., 2011; BERHONGARAY et al., 2013).

O dimensionamento da frota é importante para reduzir o tempo ocioso da colhedora, mas esta análise demanda estudos de tempos completo e cálculo da distância máxima entre talhão e a área de descarga dos cavacos visando otimizar a logística do processo. Neste estudo a quantidade do maquinário necessário para esta área experimental foi feito a partir do usual.

Uma vez que a biomassa produzida tem como finalidade a produção de energia, o poder calorífico contido neste material tornou-se relevante. Guerra et al. (2014) conduziram um estudo adotando o mesmo clone no plantio, no mesmo município e densidade de plantio muito próxima desse estudo visando quantificar o poder calorífico de um SFCR sob diferentes espaçamentos e níveis de adubação. Aos 2 anos de idade, no espaçamento de 2,8 x 1,0 m (3571 plantas ha⁻¹) e aplicando a adubação convencional obteve-se uma média de 20 GJ t⁻¹ ou 761 GJ ha⁻¹. Convertendo para megawatt-hora, um dia de colheita seria capaz de produzir cerca de 2.500 GWh. Esta energia é suficiente para gerar eletricidade por três horas em uma cidade europeia com 542.000 residências (KAVGIC et al., 2013) ou 16 horas em uma cidade brasileira de grande porte que abriga em torno de 2.000.000 de habitantes (PEREIRA e ASSIS, 2013). Obviamente, esta associação tem que ser considerada apenas como ilustrativa e informativa, pois não inclui custo relativos as perdas na geração e na transmissão de energia, entre outros fatores.

3.5 Conclusões

A utilização de forrageira adaptada para colheita de eucalipto em um sistema florestal de curta rotação brasileira apesar de colher menos área por unidade de tempo atingiu uma maior quantidade de material colhido por área quando comparada com

sistemas já consolidados de *Salix* e *Poplar* devido a diferença da densidade básica da madeira.

Mesmo com elevados valores de encargos sociais e taxa de câmbio em elevação, o custo total calculado foi inferior as colheitas em países de clima temperado sendo a depreciação e o consumo de combustível os principais componentes do custo total.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Case New Holland (CNH) que disponibilizaram o equipamento para os ensaios e a CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – pela bolsa concedida ao primeiro autor.

3.6 Referências

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **ASABE Standards 2011**. ASABE Standards EP496.3 - Agricultural machinery management data. St. Joseph, Michigan, USA: ASABE: 6 p. 2011a.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. **ASABE Standards 2011**. ASABE Standards D497.7 - Agricultural machinery management data. St. Joseph, Michigan, USA: ASABE: 8 p. 2011b.

BERHONGARAY, G.; EL KASMIQUI, O.; CEULEMANS, R. Comparative analysis of harvesting machines on an operational high-density short rotation woody crop (SRWC) culture: One-process versus two-process harvest operation. **Biomass and Bioenergy**, v. 58, p. 333-342, 2013.

CULSHAW, D.; STOKES, B. Mechanisation of short rotation forestry. **Biomass and Bioenergy**, v. 9, n. 1, p. 127-140, 1995.

CUNHA, A. R.; MARTINS, D. Classificação climática para os municípios de Botucatu e São Manuel, SP. **Irriga**, v. 14, n. 1, p. 1-11, 2009.

EISENBIES, M. H. et al. Evaluation of a single-pass, cut and chip harvest system on commercial-scale, short-rotation shrub willow biomass crops. **BioEnergy Research**, v. 7, n. 4, p. 1506-1518, 2014.

ERGÜL, E.; AYRILMIS, N. Effect of outdoor storage conditions of wood chip pile on the technological properties of wood-based panel. **Biomass and Bioenergy**, v. 61, p. 66-72, 2014.

EUFRADE JUNIOR, H. J. et al. Sustainable use of eucalypt biomass grown on short rotation coppice for bioenergy. **Biomass and Bioenergy**, v. 90, p. 15-21, 2016.

GARCIA, É. A. **Qualidade energética da madeira de eucalipto em função do espaçamento, da adubação e da idade conduzida no sistema florestal de curta rotação.** 2013. 57 Tese (Doutor em Ciência Florestal). Universidade Estadual Paulista Botucatu/SP.

GHAFFARIYAN, M. et al. Biomass harvesting in Eucalyptus plantations in Western Australia. **Southern Forests: a journal of forest science**, v. 73, n. 3-4, p. 149-154, 2011.

GONÇALVES, J. L. D. M. et al. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 6-27, 2013.

GUERRA, S. P. S. et al. Heating value of eucalypt wood grown on SRC for energy production. **Fuel**, v. 137, p. 360-363, 2014.

GUERRA, S. P. S. et al. **Eucalipto adensado: manejo para florestal energéticas.** Bioenergia: desenvolvimento, pesquisa e inovação. LEMOS, E. G. D. M. ;STRADIOTTO, N. R. São Paulo, Brasil: Ed. Unesp: 1069 p. 2012.

IBA. Statistics of the Brazilian Tree Industry, Report 2015. Brazilian Tree Industry. Brasília, p.64. 2015

KAVGIC, M. et al. Uncertainty and modeling energy consumption: Sensitivity analysis for a city-scale domestic energy model. **Energy and Buildings**, v. 60, p. 1-11, 2013.

KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT. **KTBL 2014: Datensammlung.** Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. KTBL 2014: Datensammlung: Auflage 2014.

MANZONE, M.; BALSARI, P. Productivity and woodchip quality of different chippers during poplar plantation harvesting. **Biomass and Bioenergy**, v. 83, p. 278-283, 2015.

MITCHELL, C.; STEVENS, E.; WATTERS, M. Short-rotation forestry—operations, productivity and costs based on experience gained in the UK. **Forest Ecology and Management**, v. 121, n. 1, p. 123-136, 1999.

MONTEIRO, L. D. A.; LANÇAS, K. P.; GUERRA, S. P. S. Desempenho de um trator agrícola equipado com pneus radiais e diagonais com três níveis de lastros líquidos. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 3, p. 551-560, 2011.

NURMINEN, T.; KORPUNEN, H.; UUSITALO, J. Time consumption analysis of the mechanized cut-to-length harvesting system. **Silva Fennica**, v. 40, n. 2, p. 335, 2006.

NYSTRÖM, J.; DAHLQUIST, E. Methods for determination of moisture content in woodchips for power plants: a review. **Fuel**, v. 83, n. 7, p. 773-779, 2004.

PEREIRA, I. M.; ASSIS, E. S. Urban energy consumption mapping for energy management. **Energy Policy**, v. 59, p. 257-269, 2013.

SCHWEIER, J.; BECKER, G. New Holland forage harvester's productivity in short rotation coppice: evaluation of field studies from a German perspective. **International Journal of Forest Engineering**, v. 23, n. 2, p. 82-88, 2012.

SGROI, F. et al. Economic assessment of Eucalyptus (spp.) for biomass production as alternative crop in Southern Italy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 614-619, 2015.

SPINELLI, R. et al. Comparing the efficiency of drum and disc chippers. **Silva Fennica**, p. 1-11, 2013.

SPINELLI, R.; HARTSOUGH, B. R.; MAGAGNOTTI, N. Testing mobile chippers for chip size distribution. **International Journal of Forest Engineering**, v. 16, n. 2, p. 29-35, 2005.

SPINELLI, R.; MAGAGNOTTI, N. Comparison of two harvesting systems for the production of forest biomass from the thinning of Picea abies plantations. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 25, n. 1, p. 69-77, 2010.

SPINELLI, R.; NATI, C.; MAGAGNOTTI, N. Using modified foragers to harvest short-rotation poplar plantations. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 5, p. 817-821, 2009.

SPINELLI, R. et al. Physical characterization of commercial woodchips on the Italian energy market. **Fuel**, v. 90, n. 6, p. 2198-2202, 2011.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1, p. 17-31, 2004.

THARAKAN, P. et al. Energy feedstock characteristics of willow and hybrid poplar clones at harvest age. **Biomass and Bioenergy**, v. 25, n. 6, p. 571-580, 2003.