



Determinação da eficiência energética em máquinas de colheita florestal em sistema *Full-tree*

Determination of energetic efficiency in forest harvesting machinery in *Full-tree* system

Determinación de la eficiencia energética de las máquinas de tala forestal en un sistema de *Árbol completo*

DOI: 10.55905/rdelosv17.n54-009

Originals received: 03/05/2024

Acceptance for publication: 03/25/2024

Antônia Jayne Farias da Silva

Graduada em Engenharia Florestal

Instituição: Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais

Endereço: Montes Claros – Minas Gerais, Brasil

E-mail: jaynelg@hotmail.com

Stanley Schettino

Doutor em Ciências Florestais

Instituição: Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais

Endereço: Montes Claros – Minas Gerais, Brasil

E-mail: schettino@ufmg.br

Christian Dias Cabacinha

Doutor em Ciências Florestais

Instituição: Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais

Endereço: Montes Claros – Minas Gerais, Brasil

E-mail: cabacinha@ica.ufmg.br

Luciano José Minette

Doutor em Ciências Florestais

Instituição: Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica, Universidade Federal de Viçosa

Endereço: Viçosa - Minas Gerais, Brasil

E-mail: minette@ufv.br

Denise Ransolin Soranso

Doutora em Ciências Florestais

Instituição: Instituto de Engenharia e Gestão da Produção, Universidade Federal de Itajubá

Endereço: Itajubá - Minas Gerais, Brasil

E-mail: denise_soranso@unifei.edu.br



RESUMO

Face ao aumento das emissões de carbono na atmosfera e a urgente necessidade de busca de alternativas energéticas mais eficientes em todos os setores da cadeia produtiva, este estudo objetivou determinar a eficiência energética de máquinas utilizadas na colheita florestal operando em sistema *full tree* e sua correlação com a volumetria das florestas e a produtividade das máquinas. Foram analisados dados coletados em áreas de uma empresa florestal, produtora de eucalipto, localizada nas regiões dos vales dos Rios Jequitinhonha e São Francisco, Estado de Minas Gerais. Foi analisado o rendimento energético das máquinas *Feller Buncher*, *Skidder* e Garra Traçadora, operando em sistema *full tree* e sua correlação com a volumetria das florestas e a produtividade das mesmas. Os resultados apontam que a variável produtividade da floresta tem forte correlação positiva a produtividade do *Feller Buncher*, média correlação positiva com a do *Skidder* e baixa correlação positiva com a da Garra Traçadora. Seguindo essa tendência, todas as máquinas apresentaram fortíssima correlação negativa entre produtividade e eficiência energética, demonstrando que um acréscimo na produtividade das mesmas acarreta, em ordem inversamente proporcional, uma significativa melhoria da eficiência energética da operação, independente da atividade realizada. Conclui-se a melhoria da eficiência energética em máquinas de colheita florestal oferece vantagens significativas que vão desde a economia de custos e a redução do impacto ambiental até o aumento da produtividade e a conformidade com regulamentações. Portanto, é uma prática importante para o setor florestal moderno, que busca equilibrar o uso sustentável dos recursos naturais com a eficiência operacional.

Palavras-chave: consumo de combustível, operações florestais, mecanização florestal, governança ambiental, rendimento energético.

ABSTRACT

Given the increasing carbon emissions in the atmosphere and the urgent need to seek more efficient energy alternatives in all sectors of the production chain, this study aimed to determine the energy efficiency of machines used in forest harvesting operating in a full-tree system and its correlation with forest volume and machine productivity. Data collected in areas of a forestry company, producer of eucalyptus, located in the regions of the Jequitinhonha and São Francisco Rivers, State of Minas Gerais, were analyzed. The energy efficiency of the Feller Buncher, Skidder, and Grapple Skidder machines operating in a full-tree system was analyzed, along with their correlation with forest volume and their productivity. The results indicate that the forest productivity variable has a strong positive correlation with the productivity of the Feller Buncher, a moderate positive correlation with that of the Skidder, and a low positive correlation with that of the Grapple Skidder. Following this trend, all machines showed a very strong negative correlation between productivity and energy efficiency, demonstrating that an increase in their productivity results, in inversely proportional order, in a significant improvement in the energy efficiency of the operation, regardless of the activity performed. It is concluded that improving energy efficiency in forest harvesting machines offers significant advantages ranging from cost savings and reduced environmental impact to increased productivity and compliance with regulations. Therefore, it is an important practice for the modern forestry sector, which seeks to balance the sustainable use of natural resources with operational efficiency.

Keywords: fuel consumption, forest operations, forest mechanization, environmental governance, energy yield.



RESUMEN

Ante el aumento de las emisiones de carbono a la atmósfera y la urgente necesidad de buscar alternativas energéticas más eficientes en todos los sectores de la cadena productiva, este estudio tuvo como objetivo determinar la eficiencia energética de las máquinas utilizadas en el aprovechamiento forestal operando en un sistema completo de árboles y su correlación con el volumen de bosques y la productividad de las máquinas. Se analizaron datos recolectados en áreas de una empresa forestal productora de eucalipto, ubicadas en los valles de los ríos Jequitinhonha y São Francisco, estado de Minas Gerais. Se analizó el rendimiento energético de las máquinas Feller Buncher, Skidder y Traçadora, operando en un sistema de árbol completo y su correlación con el volumen de bosques y su productividad. Los resultados indican que la variable productividad forestal tiene una fuerte correlación positiva con la productividad del Feller Buncher, una correlación positiva media con la del Skidder y una correlación positiva baja con la del Tracer Claw. Siguiendo esta tendencia, todas las máquinas mostraron una correlación negativa muy fuerte entre productividad y eficiencia energética, demostrando que un aumento en su productividad conduce, en orden inversamente proporcional, a una mejora significativa en la eficiencia energética de la operación, independientemente de la actividad realizada. En conclusión, mejorar la eficiencia energética en las máquinas cosechadoras forestales ofrece importantes ventajas que van desde el ahorro de costes y la reducción del impacto ambiental hasta el aumento de la productividad y el cumplimiento de la normativa. Por lo tanto, es una práctica importante para el sector forestal moderno, que busca equilibrar el uso sostenible de los recursos naturales con la eficiencia operativa.

Palabras clave: consumo de combustible, operaciones forestales, mecanización forestal, gobernanza ambiental, rendimiento energético.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a humanidade ainda é dependente de fontes de carbono fóssil para obtenção de energia, representando aproximadamente 86,4% da necessidade energética global. As fontes de petróleo, com seu caráter finito e poluidor, fazem com que a busca de alternativas ao seu uso seja uma constante, como as chamadas fontes de energia limpa, onde a biomassa, energia solar, energia hidrelétrica, energia eólica, etc. se destacam por tal característica.

A fim de conter o avanço das mudanças climáticas e permitir a autonomia da sustentabilidade, é necessário transformar a economia global. Governos do mundo todo e diversos setores buscam soluções para tal mudança. No setor florestal, investimentos ligados à redução das emissões de carbono vêm crescendo cada vez mais, com a aplicação das práticas ESG (*Environmental, Social and Governance* / Governança Ambiental e Social). São exemplos



as certificações, redução na geração de resíduos, investimentos diretos, ranqueamento de empresas, entre outros (IBÁ, 2023).

Além dos investimentos nas operações industriais, o setor de base florestal brasileiro tem investido firmemente em sua expansão comercial. Essa tendência continua forte, sobretudo em relação à mudança global de hábitos, onde se procura cada vez mais produtos sustentáveis. Diante desse cenário, o setor de árvores plantadas tem sido um dos exemplos na construção dessa “economia verde”. (IBÁ, 2023) Ainda de acordo com um levantamento de dados exclusivo da IBÁ (indústria brasileira de árvores), estão em processo de confirmação ou já foram confirmados bioinvestimentos na ordem dos R\$ 57,2 bilhões até 2024.

Desde a década de 1970 já se operava com máquinas no Brasil, mas foi a partir de 1994, com a abertura das importações, o custo elevado de mão de obra e a necessidade de um trabalho mais ergonômico, que a colheita florestal mecanizada se tornou mais intensiva. A partir dos anos 2000, com o crescimento exponencial da mecanização, observa-se a utilização de máquinas mais adaptadas às diversas atividades do setor e às condições ergonômicas do operador florestal. Isso faz com que a colheita florestal atualmente seja essencialmente mecanizada e o grau de mecanização no país só não é maior devido à dificuldade da colheita em terrenos declivosos, materiais com mais de um fuste por cepa e baixo volume por árvore. (Machado, 2014).

De acordo com Cortez et al. (2008), a quantidade de energia gerada nas operações florestais, diferente do que se pensa, não é apenas resultado do consumo de combustível, mas também daquela que é gerada na fabricação e distribuição de máquinas e equipamentos, do óleo lubrificante e hidráulico, do trabalho humano, entre outros.

Segundo Oliveira Junior et al. (2009), a partir de um trabalho feito sobre balanço energético dos métodos de colheita mecanizada existentes, no ano de 1972 gastou-se em média 180MJ.m^{-3} , com o consumo de combustível representando cerca de 10% no custo total da colheita de madeira. Ainda, os autores criaram uma matriz de dados referente as operações de colheita mecanizada em plantios de eucalipto, com a finalidade de papel e celulose, e idade de corte de sete anos com uma produção de $300\text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$. A partir disso foi apontado que, além do combustível, outros fatores também demandam energia do sistema produtivo, como matéria-prima, processo de fabricação e manutenção. Na pesquisa realizada por esses autores, foi determinado que o sistema *full tree* apresenta uma demanda energética 20% maior quando comparada ao sistema de toras curtas.



Assim, percebe-se que o entendimento e a busca pela melhoria da eficiência energética da colheita florestal ainda é um desafio a ser superado. Para isso, é necessário investir em tecnologias que reduzam o consumo de combustível e outros insumos, bem como em processos de produção mais eficientes e, nessa linha, mais sustentáveis.

Segundo o Vauhkonen (2018), a aquisição e utilização de máquinas florestais resulta em um alto investimento, e sua rentabilidade depende principalmente de sua taxa de uso e eficiência energética. Atualmente, no mercado existem indicadores direcionais de eficiência, no entanto, nenhuma ferramenta pode explicar com precisão as diferenças encontradas em diferentes resultados. Ainda, afirma o autor, a eficiência energética é afetada pela habilidade do operador de operar a máquina e pela capacidade planejada de seu próprio trabalho. Isso inclui a capacidade de alterar as configurações da máquina, aumentando o rendimento e o consumo de combustível. Os níveis de pressão hidráulica das máquinas e os consideráveis ajustes individuais feitos pelo computador também afetam significativamente a eficiência energética.

Um estudo de caso apresentado por uma empresa de colheita florestal brasileira apontou que, entre as principais ações realizadas em busca de eficiência energética no sistema *full tree* estão a substituição de máquinas de maior desgaste e consumo de diesel por outras mais modernas e a troca de implementos, como conjuntos traçadores, de menor para maior porte. A capacitação contínua e o aperfeiçoamento profissional dos colaboradores foram outras medidas adotadas pela empresa (MAIS FLORESTAS, 2023).

Algumas empresas também fazem a adoção de simulados e programas computacionais, como é o caso do EcoDrive, que realiza o monitoramento da eficiência de trabalho, entregando ao operador quais níveis de energia e combustível devem ser usados para as diferentes situações em campo (Vauhkonen, 2018). Além disso, um planejamento passivo e cuidadoso tende a melhorar a eficiência energética, mantendo a mesma eficiência e rendimento, com menos combustível e eliminando movimentos desnecessários. Entretanto, ainda assim os métodos atuais de apuração do consumo de combustível (usualmente em litros/hora trabalhada) parecem não ser suficientes para demonstrar a eficiência energética da colheita florestal mecanizada.

Sob essa ótica, na busca de fornecer subsídios satisfatórios para a tomada de decisões quando do dimensionamento das máquinas de acordo com as características dos povoamentos a serem colhidos, este estudo aponta sua importância no aspecto científico (pesquisa), tecnológico, econômico e ambiental.



O objetivo do estudo é determinar a eficiência energética de máquinas utilizadas na colheita florestal operando em sistema *full tree* e sua correlação com a volumetria das florestas e a produtividade das máquinas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 COLETA DE DADOS

Os dados foram coletados em áreas de uma empresa florestal, produtora de eucalipto, localizada nas regiões dos vales dos Rios Jequitinhonha e São Francisco, Estado de Minas Gerais, localizadas num raio de 300 km da cidade de Itamarandiba, (situada geograficamente no ponto 42°51'32" de longitude a Oeste de Greenwich e 17°51'25" de latitude a Sul da linha do Equador). A altitude média é de 910 m e o clima predominante é o Aw – tropical chuvoso de savana, ou seja, inverno seco e chuvas máximas no verão, e a estação chuvosa ocorre entre os meses de outubro e março (Nascimento et al., 2011).

A área de estudo era plantada com um clone híbrido de eucalipto (*Eucalyptus urophiila* x *E. grandis*), com produtividade média de 245m³/ha, e idade de corte de 7 anos, com espaçamento de 3 x 3 m e índice médio de sobrevivência de 95%, sendo o relevo plano a suave ondulado. Desta forma, chega-se aos sete anos com 1.055 árvores vivas por hectare e apresentando individualmente um volume médio de 0,2322 m³/árvore. Aos sete anos de idade, a madeira apresenta densidade básica média de 0,450 g/cm³ ou 0,45 t/m³.

A colheita é realizada através do sistema de árvores inteiras (*full-tree*), sendo utilizadas as seguintes máquinas: *feller buncher* marca Caterpillar, modelo 522, equipado com cabeçote marca J de Souza, modelo CDJ14a, utilizado para realizar a atividade de derrubada das árvores; *skidder* Caterpillar, modelo 545C, com pinças, para realizar a atividade de extração das árvores derrubadas até a margem das estradas; e garras traçadoras marca J de Souza modelo GJ850rt, instaladas em máquinas Caterpillar, modelo 320D-FM-BWW, para realizar a atividade de traçamento da madeira nas margens dos talhões. Todas as máquinas avaliadas utilizavam óleo diesel como combustível.



2.2 DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A determinação da eficiência energética se deu a partir do consumo de combustível das máquinas utilizadas nas atividades de colheita florestal (*feller buncher*, *skidder* e garra traçadora), considerando a variação nas produtividades de cada atividade (máquina) conforme as variações de produtividade das florestas. Para tanto, foi calculado o rendimento energético (g/kW) por unidade de madeira produzida (m³), de acordo com as equações 1 e 2.

$$RE = \frac{Ce}{Prod} \quad (1)$$

onde:

RE = rendimento energético da atividade de colheita por unidade (g/kW/m³);

Ce = consumo específico de combustível da máquina de colheita (g/kWh);

Prod = produtividade da máquina de colheita (m³/h).

$$Ce = \frac{Q}{N} \times R \quad (2)$$

onde:

Ce = consumo específico de combustível da máquina de colheita (g/kWh);

Q = consumo de combustível da máquina de colheita (l/h);

N = potência do motor da máquina de colheita (kW);

R = densidade do combustível utilizado na máquina de colheita (kg/m³)

Foi avaliado se os valores encontrados para rendimento energético das atividades de colheita florestal, apresentaram associação entre si, com os valores de produtividade das florestas e com os valores de consumo de combustível das máquinas. Para tanto, obteve-se o grau de associação, efetuando a análise da matriz de coeficiente da correlação de Pearson (r), pelo teste t a 5% de probabilidade, sendo considerada correlação forte quando $r \geq |0,50|$, média quando $|0,50| > r > |0,30|$ e baixa quando $r \leq |0,30|$, de acordo com Cohen (1988).



Em relação aos gráficos de dispersão, os dois eixos (X e Y) representam a tendência de associação linear entre as variáveis com uma reta passando por esses dois pontos. A relação linear é mais forte quando essa é mais próxima de uma linha reta. Ou seja, quanto mais próximos forem os pontos da linha reta, maior é a correlação linear (Filho et al, 2014). As análises foram realizadas em ambiente Excel e as análises estatísticas foram realizadas através do software STATISTICA for Windows (Statsoft Inc., 1995).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De forma a verificar a associação entre o rendimento energético, produtividade das florestas e produtividade das máquinas de colheita florestal, operando no sistema *full tree* durante o período de estudo, os resultados da análise da matriz do coeficiente de correlação de Pearson (r) por meio do teste t a 5% de probabilidade, são apresentados na Tabela 1 e nas Figuras 1 a 3.

Tabela 1 - Matriz de coeficientes de correlação linear de Pearson entre as variáveis de estudo

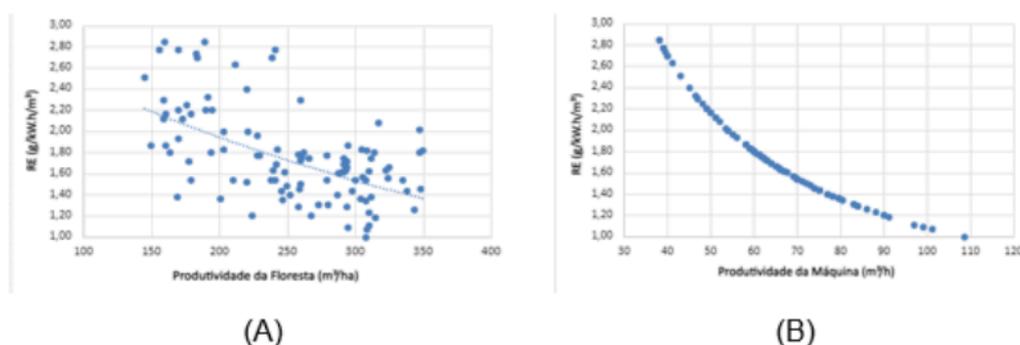
Variáveis	<i>Feller Buncher</i>		<i>Skidder</i>		Garra Traçadora	
	PF	PM	PF	PM	PF	PM
PM	0,534*	-	0,277*	-	0,104 ^{n.s.}	-
RE	-0,574*	-0,951*	-0,298*	-0,970*	-0,150 ^{n.s.}	-0,989*

* Significativo a 5% de probabilidade de erro, pelo teste t. ^{ns} Não significativo.

PM = Produtividade da Máquina; RE = Rendimento Energético; PF = Produtividade da Floresta.

Fonte: Elaborada pelos Autores, 2024

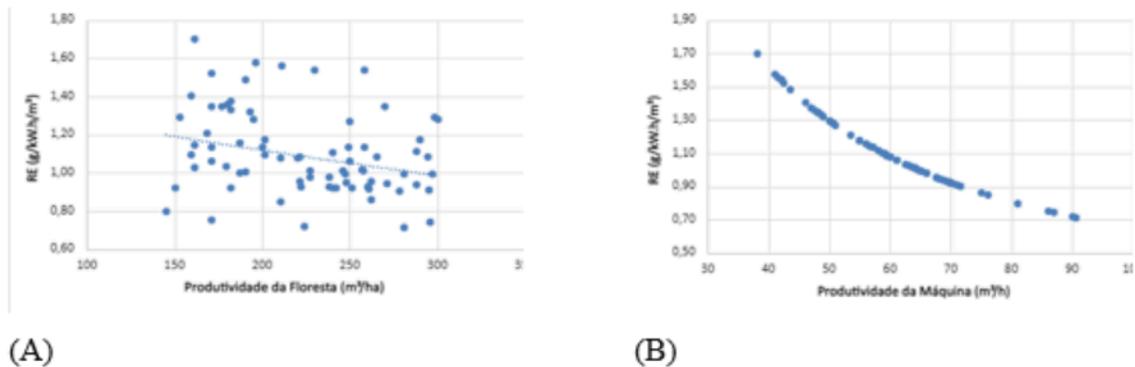
Figura 1 – Rendimento energético do *Feller Buncher* (g/kW.h/m³) em relação a produtividade da floresta (m³/ha) (A) e em relação a produtividade da máquina (m³/h) (B)



Fonte: Elaborada pelos Autores, 2024

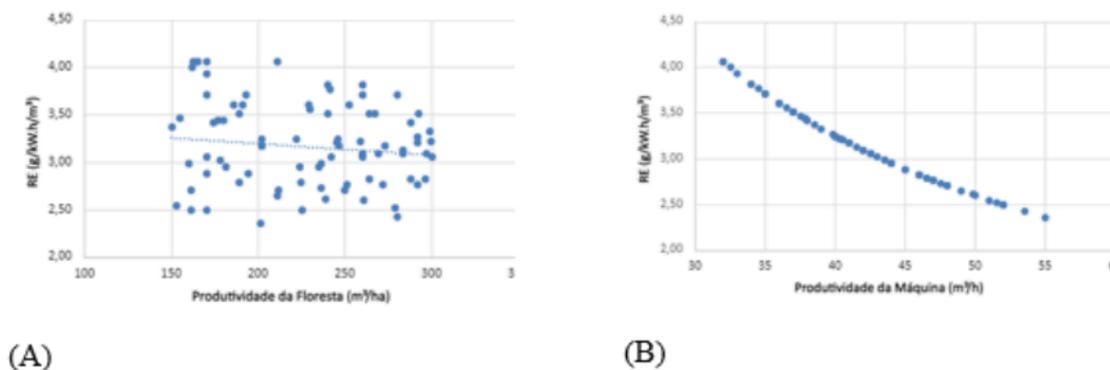


Figura 2 - Rendimento energético do *Skidder* (g/kW.h/m³) em relação a produtividade da floresta (m³/ha) (A) e em relação a produtividade da máquina (m³/h) (B)



Fonte: Elaborada pelos Autores, 2024

Figura 3 - Rendimento energético da Garra Traçadora em relação a produtividade da floresta (m³/ha) (A) e em relação a produtividade da máquina (m³/h) (B)



Fonte: Elaborada pelos Autores, 2024

Os resultados apontam que a variável produtividade das florestas tem uma forte correlação positiva com a produtividade do *Feller Buncher*, média correlação positiva com a do *Skidder* e baixa correlação positiva com a da Garra Traçadora. Resultados semelhantes foram encontrados por Schettino et al. (2015), quando demonstraram maiores produtividades das máquinas de colheita com o incremento da volumetria das florestas.

Nessa mesma vertente, de forma negativa, as correlações entre a produtividade das florestas e o rendimento energético das máquinas colheita apresentaram comportamento semelhante. Vale ressaltar que o sinal negativo desta correlação é desejável, visto que, quanto menor for o valor assumido pela variável rendimento energético, melhores serão os seus efeitos (menor quantidade de energia é necessária para a produção de uma unidade de volume de madeira).



Por sua vez, a variável rendimento energético, objeto desse estudo, demonstrou correlação negativa quase perfeita quando associada a produtividade das máquinas, indicando que, nas condições avaliadas, qualquer acréscimo de produtividade das máquinas de colheita implica em melhoria do rendimento energético da atividade. Tal constatação se deu para todas as máquinas avaliadas, independentemente da atividade que essas estavam executando.

O *Feller Buncher* é a máquina que apresenta, positivamente, a maior resposta a volumetria da floresta e que o acréscimo de produtividade do mesmo é diretamente proporcional ao incremento na volumetria dos povoamentos, corroborando os resultados encontrados por Fernandes et al. (2009), Simões et al. (2014) e Schettino et al. (2015). Oliveira Junior et al. (2009) afirmam que isso é verificado devido ao volume médio individual das árvores, que tende a ser maior quanto o maior for a volumetria das florestas, considerando o mesmo espaçamento e número de árvores por hectare, caso deste estudo. Os autores afirmam, ainda, ser possível pressupor que o tempo gasto para cortar uma árvore de 0,11 m³ seja igual ao de outra de 0,25 m³. Desta forma, o rendimento do feller buncher em termos de volume por unidade de tempo cresce à medida que se aumenta o volume médio por árvore.

O sistema de extração mecanizada com *Skidders* é beneficiado pelo aumento do volume do povoamento, embora não na mesma proporção que o *Feller Buncher*. De acordo com OLIVEIRA et al. (2006), isso se deve à relação entre produtividade e altura das árvores, que é maior em povoamentos mais produtivos, pois a área de apreensão da pinça dessa máquina permanece constante, resultando em um maior volume arrastado com árvores mais longas. Em contraste, a garra traçadora mostrou baixa sensibilidade à produtividade florestal, embora houvesse uma correlação positiva. Estudos anteriores destacaram que o rendimento da garra traçadora é afetado pelo volume de madeira e pelo arranjo dos feixes na pilha, com destaque para o volume médio das árvores, pois o acréscimo no volume e no peso dessas pode dificultar o manuseio com a garra traçadora durante o processamento (Lopes et al., 2008).

Correlacionando esse ganho de produtividade das máquinas com o rendimento energético, tem-se que em motores diesel, caso das máquinas de colheita florestal, o regime de trabalho se dá sob uma potência nominal, com rotação e alimentação de combustível constantes (Almeida et al., 2010). Dessa forma, quanto mais trabalho for realizado pela máquina (produtividade), melhor será a eficiência energética. Há ainda que se considerar que a colheita florestal mecanizada em sistema *full tree* pode responder por até 10% do total de combustível



necessário para todo o ciclo de produção florestal (SOUZA et al., 2019) e, sob essa ótica, os ganhos de eficiência energética serão extrapolados para a esfera ambiental ao reduzir as emissões de CO₂ por unidade de madeira produzida.

O consumo de combustível pode ser apresentado como unidade de volume por unidade de tempo (L.h⁻¹), nesse caso não se considera a influência da variação da temperatura e nem a quantidade de potência gerada. Também é possível ser feita a medição por meio de unidade de massa por unidade de tempo (kg.h⁻¹), aqui se considera o fator temperatura, porém não contempla a potência gerada. Já no consumo específico, (forma mais técnica de se medir), refere-se à unidade de massa por unidade de potência (g.kWh⁻¹), esta pode ser usada para comparar motores, tratores e equipamentos de tamanho e formas diferentes (Kim et al., 2011; Ramalingam et al., 2028). Contudo, cabe destacar, que baixo o consumo horário de combustível pode proporcionar uma falsa impressão de vantagem, visto que seu cálculo não leva em consideração a quantidade de madeira produzida (Santos et al., 2021).

Sob essa ótica, há ainda que se considerar que máquinas mais eficientes do ponto de vista energético consomem menos combustível por unidade de madeira produzida, resultando em custos operacionais mais baixos para a operação de colheita florestal. Isso pode representar uma economia significativa a longo prazo. Ainda, máquinas de colheita florestal mais eficientes frequentemente têm melhor desempenho, o que pode resultar em uma maior produtividade e isso significa que uma quantidade maior de madeira ou produtos florestais pode ser colhida em um período de tempo mais curto. Merece destaque também o fato de que máquinas mais eficientes tendem a experimentar menos desgaste e, portanto, requerem menos manutenção. Isso pode economizar tempo e dinheiro, além de evitar paradas não programadas.

Em outra vertente, verifica-se o fato de que em muitas regiões, existem regulamentos ambientais rigorosos que estabelecem limites para as emissões de máquinas industriais. A melhoria da eficiência energética pode ajudar as operações de colheita a cumprir essas regulamentações e evitar penalizações. Com isso, a adoção de práticas sustentáveis, como a melhoria da eficiência energética, pode melhorar a imagem da empresa perante os consumidores, investidores e reguladores, o que pode ser benéfico para o relacionamento com partes interessadas.

Embora não tenha sido objeto deste estudo, os resultados sugerem que a utilização de máquinas com maiores potência, muitas vezes preteridas em função de maiores valores de



aquisição, podem representar uma vantagem em relação ao rendimento energético das atividades de colheita florestal. Tal fato se dá pela possibilidade de operar em menores rotações nominais de trabalho (Santos et al., 2021) e, conseqüentemente, um menor consumo de combustível e maior eficiência energética por unidade de madeira produzida. Isso representa um menor custo operacional e, indiretamente, uma melhor eficiência ambiental das atividades (McEWAN et al., 2020) o que, a médio e longo prazos, pode gerar retornos econômico-financeiros em relação ao maior custo de aquisição.

Por fim, os resultados apresentados indicam a importância do entendimento de quais são as variáveis e como estas influenciam na eficiência energética das atividades de colheita florestal, como se comportam individualmente e em conjunto, de forma a fornecer subsídios para o planejamento das operações relacionadas à colheita da madeira e, concomitantemente, garantir um melhor rendimento nas operações e os benefícios ambientais associados as atividades.

4 CONCLUSÕES

Todas as máquinas apresentaram fortíssima correlação negativa entre produtividade e eficiência energética, demonstrando que um acréscimo na produtividade das mesmas acarreta, em ordem inversamente proporcional, uma melhoria da eficiência energética da operação, independentemente da atividade realizada.

A produtividade das florestas tem uma forte correlação positiva a produtividade o *Feller Buncher*, média correlação positiva com a do *Skidder* e baixa correlação positiva com a da Garra Traçadora. As correlações entre a produtividade das florestas e o rendimento energético das máquinas colheita apresentaram correlação semelhante em ordem e grandeza, entretanto de forma negativa.

A redução do consumo de combustível diminui a emissão de poluentes atmosféricos e as emissões de gases de efeito estufa por unidade de madeira produzida, contribuindo para a redução do impacto ambiental da colheita florestal. Isso é especialmente importante em um contexto de preocupações com as mudanças climáticas.

A utilização de máquinas de colheita florestal eficientes em termos energéticos pode gerar uma vantagem competitiva aos produtores florestais, uma vez que podem oferecer produtos florestais a preços mais competitivos devido aos custos operacionais mais baixos.



A melhoria da eficiência energética em máquinas de colheita florestal oferece vantagens significativas que vão desde a economia de custos e a redução do impacto ambiental até o aumento da produtividade e a conformidade com regulamentações. Portanto, é uma prática importante para o setor florestal moderno, que busca equilibrar o uso sustentável dos recursos naturais com a eficiência operacional.



REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R.A.S.; TAVARES-SILVA, C.A.; SILVA, S.L. Desempenho energético de um conjunto trator-semeadora em função do escalonamento de marchas e rotações do motor. **Agrarian**, v. 3, n. 7, p. 63-70, 2010. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/agrarian/article/view/1086>

COHEN, J. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. New Jersey: Lawrence Earlbaum Associates. 1998.

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S.; GÓMEZ, E.O. **Biomassa para energia**. Campinas, SP. Editora da Unicamp. 2008.

FERNANDES, H.C.; LOPES, S.E.; TEIXEIRA, M.M.; MINETTE, L.J.; RINALDI, P.C.N.; BERNARDES, A.M. Avaliação das características técnica e econômica de um sistema de colheita florestal de árvores inteiras. **Scientia Forestalis**, v. 37, n. 83, p. 225-232, 2009. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr83.aspx>

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório IBÁ 2023**. São Paulo: ESGTech, 2023. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/.pdf>.

KIM, S.C.; KIM, K.U.; KIM, D.C. Prediction of fuel consumption of agricultural tractors. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 27, n. 5, 705-709. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.39565>

LOPES, S.E.; FERNANDES, H.C.; SANTOS, N.T.; RINALDI, P.C.N. Avaliação técnica e econômica de uma garra traçadora operando em diferentes produtividades. **Scientia Forestalis**, v. 36, n. 79, p. 215-222, 2008. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr79.aspx>

MACHADO, C.C. **Colheita Florestal**. 3.ed., Viçosa, MG: Ed. UFV. 2014.

MAIS FLORESTAS. Empresa Reflorestar investe em eficiência energética na colheita mecanizada. 2023. Disponível em: <https://www.maisfloresta.com.br/empresa-reflorestar-investe-em-eficiencia-energetica-na-colheita-mecanizada/>. Acesso em 3 Nov 2023.

McEWAN, A.; MARCHI, E.; SPINELLI, R.; BRINK, M. Past, present and future of industrial plantation forestry and implication on future timber harvesting technology. **Journal of Forestry Research**, v. 31, n. 2, 339-351, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01019-3>

NASCIMENTO, A.C.; LEITE, A.M.P.; SOARES, T.S.; FREITAS, L.D. Avaliação técnica e econômica da colheita florestal com *feller buncher*. **Cerne**, v. 17, n. 1, p. 9-15, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-77602011000100002>

OLIVEIRA JUNIOR, E.D.; SEIXAS, F. BATISTA, J.L.F. Produtividade de *feller-buncher* em povoamento de eucalipto em relevo acidentado. **Floresta**, v. 39, n. 4, p. 905-912, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/ufv.v39i4.16327>



OLIVEIRA, R.J.; MACHADO, C.C.; SOUZA, A.P.; LEITE, H.G. Avaliação técnica e econômica da extração de madeira de eucalipto com “clambunck skidder”. **Revista Árvore**, v. 30, n.2, p. 267-275, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000200014>

RAMALINGAM, S.; RAJENDRAN, S.; GANESAN, P. Performance improvement and exhaust emissions reduction in biodiesel operated diesel engine through the use of operating parameters and catalytic converter: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, part 2, 3215-3222, 2028. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.069>

SANTOS, D.W.F.N., VALENTE, D.S.M., FERNANDES, H.C., SOUZA, A.P.; VOLPATO, C.E.S. Parâmetros técnicos, econômicos e ambientais de máquinas florestais em função de configurações do motor e bomba hidráulica. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 130, e3520, 2021. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n130.13>

SCHETTINO, S.; MINETTE, L.J; SOUZA, A.P. Correlação entre volumetria de florestas de eucalipto e produtividade e custos de máquinas de colheita de madeira. **Árvore**, v. 39, n. 5, p. 935-942, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622015000500016>

SIMÕES, D.; FENNER, P.T.; ESPERANDINI, M.S.T. Produtividade e custos do feller-buncher e processador florestal em povoamento de eucalipto de primeiro corte. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 3, p. 621-630. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/1980-509820142403010>

SOUZA, C.L.; SCHETTINO, S.; SILVA, D.D.; GUIMARÃES, N.V. Balanço de Carbono do processo de produção de madeira de reflorestamento no Norte de Minas Gerais. **Caderno de Ciências Agrárias**, v. 11, p. 01-08, 2019. DOI: <https://doi.org/10.35699/2447-6218.2019.15160>
STATSOFT, Inc. **STATISTICA for Windows, Release 5.0**. Computer program manual. Tulsa, OK: StatSoft, Inc. 1995.

VAUHKONEN, H. **Eficiência energética de máquinas**. 2018. Disponível em: <https://issuu.com/opinioesbr/docs/op-cp-51-site-issuu-200512?fr=sYjUyNzEzODcxNTU>. Acesso em 13 Nov 2023.

