

Disponibilidade hídrica e fertilização mineral nas características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden

Water availability and mineral fertilization in the characteristics of wood and charcoal of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden

Raissa Tavares Silva¹, Carlos Roberto Sette Júnior², Mariana Pires Franco³, Mario Tomazello Filho⁴, Jean Paul Laclau⁵, Gilles Chaix⁵

Resumo

As alterações na qualidade da madeira das árvores de *Eucalyptus* causadas pela fertilização e disponibilidade hídrica podem influenciar as características da biomassa e do carvão vegetal. O objetivo deste trabalho foi avaliar as características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis* sob o efeito da fertilização com potássio e sódio (controle; 4,5 kmol ha⁻¹ de KCl e 4,5 kmol ha⁻¹ de NaCl) e disponibilidade hídrica (100% e 63% das chuvas, com exclusão artificial por lonas em polietileno). Árvores de *Eucalyptus* de cada tratamento de fertilização x disponibilidade hídrica, com cinco anos de idade, foram cortadas e obtidas amostras, na altura do DAP para a caracterização energética e física da biomassa e do carvão vegetal. A aplicação da fertilização com K e Na não influenciou as características energéticas e físicas da biomassa e do carvão vegetal. A exclusão parcial da água da chuva na plantação florestal de *Eucalyptus grandis* promoveu alterações nas características da biomassa e do carvão vegetal, com redução do teor de cinzas, aumento da densidade da madeira e do carvão vegetal e rendimento gravimétrico do carvão vegetal.

Palavras-chave: Bioenergia; Potássio; Sódio; Exclusão artificial da chuva

Abstract

Changes in the wood quality of *Eucalyptus* trees caused by fertilization and water availability may influence the characteristics of biomass and charcoal. The aim of this study was to evaluate the effects of potassium and sodium fertilization (control; 4.5 kmol ha⁻¹ of KCl and 4.5 kmol ha⁻¹ of NaCl) and water availability (100% and 63% rainfall with artificial exclusion) on the energetic and physical characteristics of biomass and charcoal. *Eucalyptus* trees of each fertilization x water availability treatments, at five years old, were cut down and the samples were taken at the DBH for the energetic and physical characterization of biomass and charcoal. The application of fertilization with K and Na did not influence the energetic and physical characteristics of biomass and charcoal. The partial exclusion of rainwater in the *Eucalyptus grandis* forest plantation promoted changes in the characteristics of biomass and charcoal, with reduction of ash content, and increase of wood and charcoal density and the charcoal gravimetric yield.

Keywords: Bioenergy; Potassium; Sodium; Artificial exclusion of rain

^I Engenheira Florestal, MSe., Pesquisadora Autônoma, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Goiás, Rod. Goiânia-Nova Veneza, km 0, CEP 74690-900, Goiânia (GO), Brasil. raissatvs@gmail.com (ORCID: 0000-0003-0682-1355)

^{II} Engenheiro Florestal, Dr., Professor do Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Goiás, Rod. Goiânia-Nova Veneza, km 0, CEP 74690-900, Goiânia (GO), Brasil. crsettejr@hotmail.com (ORCID: 0000-0002-1007-2345)

^{III} Engenheira Florestal, Dr^a, Pesquisadora Autônoma, Departamento de Ciências Florestais, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", ESALQ/USP, Avenida Pádua Dias, 11, CEP 13418-900, Piracicaba (SP), Brasil. ma.pires@hotmail.com (ORCID: 0000-0002-4253-3126)

^{IV} Engenheiro Agrônomo, Dr., Professor do Departamento de Ciências Florestais, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", ESALQ/USP, Avenida Pádua Dias, 11, CEP 13418-900, Piracicaba (SP), Brasil. mtomazel@usp.br (ORCID: 0000-0002-9814-0778)

^V Engenheiro Florestal, Dr., Pesquisador do Centro de Cooperação Internacional em Pesquisa Agronômica para o Desenvolvimento, CIRAD, Av. Agropolis, 34398, Montpellier, França. jean-paul.laclau@cirad.fr (ORCID: 0000-0002-2506-214X) / gilles.chaix@cirad.fr (ORCID: 0000-0003-2015-0551)



Introdução

O crescimento populacional e econômico aliado às atividades antrópicas como o uso de combustíveis fósseis e as mudanças no uso da terra (URZEDO *et al.*, 2013) tem promovido mudanças climáticas globais, com o aumento da temperatura média e irregularidade no regime de chuvas (INTERGOVERNMENTAL PANEL OF CLIMATE CHANGES, 2014). O aumento das temperaturas e as alterações da frequência e intensidade das chuvas, como resultado da mudança do clima, podem ocasionar diversos efeitos nas plantações florestais, como a redução do crescimento das árvores e alterações nas características da madeira (CABRAL *et al.*, 2010; WU *et al.*, 2011).

Da mesma forma, a expansão populacional e a aceleração econômica e tecnológica têm aumentado rapidamente a demanda energética global. Os combustíveis fósseis, como o petróleo e o carvão mineral, são amplamente utilizados desde a Revolução Industrial e continuam como principais fontes de geração de energia global, com 31 e 29%, respectivamente, da matriz energética global, com as fontes renováveis representando apenas 13% (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2017).

O Brasil se destaca pela grande oferta de energias renováveis: 43,5% da matriz energética e 81,7% da matriz elétrica (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2017). A geração hidroelétrica é a principal fonte de energia elétrica, porém, a sua participação tem diminuído ao longo dos anos, entre outros fatores, pela alteração/redução do regime das chuvas, que reduzem os níveis dos reservatórios em todo o país. Este fato demonstra a vulnerabilidade do setor hidroelétrico frente às mudanças climáticas, concretizando a necessidade da procura por outras fontes de energia, especialmente as renováveis.

Neste contexto, destaca-se a participação da biomassa florestal na matriz energética brasileira em função da representatividade do setor florestal nacional e sua perspectiva de crescimento entre as mais sustentáveis do mundo, totalizando uma área de 7,8 milhões de hectares de árvores plantadas, sendo 5,6 milhões de hectares com espécies do gênero *Eucalyptus* (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2017). A consolidação das espécies do gênero *Eucalyptus* se dá, principalmente, devido à sua alta adaptabilidade às condições edafoclimáticas, diversidade de espécies e à possibilidade de usos múltiplos da sua madeira.

Grande parte das plantações florestais de eucalipto está estabelecida em regiões de baixa fertilidade, particularmente pobres em potássio (K) e submetidas a grandes períodos de *deficit* hídrico (GONÇALVES *et al.*, 2004). Desta forma, a fertilização mineral torna-se prática indispensável para manter o balanço de nutrientes e garantir a produtividade dos plantios (EPRON *et al.*, 2012). Estudos científicos indicam os efeitos da aplicação de fertilizantes e da disponibilidade de água no crescimento, produtividade e qualidade da madeira de diferentes espécies de *Eucalyptus* (BENLLOCH-GONZÁLEZ *et al.*, 2008; SETTE JUNIOR *et al.*, 2010; FREITAS *et al.*, 2015). As alterações na qualidade da madeira indicadas na literatura em função da fertilização e disponibilidade hídrica podem influenciar nas características energéticas e físico-mecânicas da biomassa e dos produtos derivados, como o carvão vegetal.

Do total de área plantada com espécies de eucalipto, 14% são destinadas para a produção de carvão vegetal. Considerado um dos insumos mais importantes da indústria siderúrgica nacional, o carvão vegetal registrou consumo de 4,6 milhões de toneladas no Brasil em 2016, sendo 82% produzidos a partir de madeira oriunda de árvores plantadas. (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2017). Da mesma forma, a utilização da madeira de espécies de eucalipto na sua forma *in natura*, como lenha e cavaco, representou 20% do total de madeira produzida no ano de 2016 (SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO, 2017).

Cabe destacar que pesquisas em campo, com árvores de mais de quatro anos e que tratam da interação da fertilização mineral e da exclusão parcial de chuvas na qualidade da madeira, nunca foram realizadas em áreas tropicais (CASTRO *et al.*, 2017). Considerando que a produção de biomassa para bioenergia e sua qualidade podem ser influenciadas pela fertilização

e disponibilidade hídrica, torna-se fundamental o entendimento da interação destes fatores e sua influência na qualidade do carvão vegetal produzidos com a madeira de eucalipto. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar as características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis*, sob o efeito da fertilização mineral com potássio e sódio e da disponibilidade hídrica.

Material e métodos

Local do estudo e delineamento experimental

O experimento de campo está localizado na Estação Experimental de Ciências Florestais da ESALQ/USP, na cidade de Itatinga-SP (23°02' S e 48°38' W, 857 m de altitude), por meio do convênio do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP e do Centro de Cooperação Internacional em Pesquisa Agronômica para o Desenvolvimento, CIRAD/França (Figura 1).

O clima da região é caracterizado como mesotérmico úmido (Cwa), segundo Köppen, com precipitação média anual de 1360 mm, temperatura média anual de 19°C e temperatura média mensal variando de 15°C a 25°C, nos meses mais frios e mais quentes, respectivamente. O solo da área experimental é Latossolo Vermelho Amarelo distrófico de textura média.

Três meses antes da implantação do experimento foi realizado o corte do povoamento anterior de *Eucalyptus grandis* e limpeza dos resíduos. Maquere (2008) caracterizou detalhadamente os atributos químicos do solo até 6 metros de profundidade; os resultados evidenciaram deficiência severa de K em todo o perfil do solo, que apresentou teor médio de K e Na trocável de 0,02 cmol_c kg⁻¹, até 5 cm de profundidade, e inferior a 0,01 cmol_c kg⁻¹, entre 5 e 600 cm de profundidade.

O experimento divide-se em seis tratamentos e três parcelas por tratamento, apresentando no total dezoito parcelas. O plantio das mudas de *Eucalyptus grandis* foi realizado em 2010, em espaçamento 3 x 2 m e as parcelas compostas por 12 linhas com 12 árvores por linha (144 árvores). Três linhas externas compõem a bordadura dentro de cada parcela, resultando em uma unidade experimental de 36 árvores centrais.

A fertilização básica realizada no plantio foi constituída por 75 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Superfosfato Simples), 80 kg ha⁻¹ de N (NH₄(SO₄)₂) e 20 kg ha⁻¹ FTE BR 12 (12 micronutrientes), distribuídos em covetas ao lado das mudas. Também foi distribuído a lanço e sem incorporação 2000 kg de calcário dolomítico. A aplicação de P, micronutriente e a calagem foi realizada durante o plantio e a fertilização com N, K e Na (4,5 kmol ha⁻¹ na forma de KCl e NaCl), respectivamente, assim como a instalação das calhas para reduzir a chuva (Figura 1), foram realizadas três meses após o plantio. As mudas já haviam crescido acima das calhas, o que não afetou o crescimento dos galhos laterais.

Os tratamentos estudados foram definidos por (i) dois regimes hídricos: 100% das chuvas (+A) e 63% das chuvas (-A), com exclusão artificial por 1700 m² de lonas em polietileno; a área coberta com as lonas representa 37% da área total do experimento e (ii) três doses de fertilizantes: 0 kmol ha⁻¹ de K e Na (controle, representado pela letra C), 4,5 kmol ha⁻¹ de KCl e 4,5 kmol ha⁻¹ de NaCl, sendo ambas doses de KCl e NaCl não limitantes para o crescimento do eucalipto na área (ALMEIDA *et al.*, 2010). Os tratamentos foram identificados da seguinte maneira:

- C/+A: controle + 100% de chuva;
- Na/+A: sódio + 100% de chuva;
- K/+A: potássio + 100% de chuva;
- C/-A: controle + 63% de chuva;
- Na/-A: sódio + 63% de chuva; e
- K/-A: potássio + 63% de chuva.

Figura 1 – Delineamento experimental com árvores de *Eucalyptus grandis*. Detalhe da redução de chuva por faixas de polietileno.

Figure 1 – Experiment with *Eucalyptus grandis* trees. Rain reduction detail by polyethylene strips.



Fonte: Autores (2017)

Este experimento é único e dotado de ineditismo, possibilitando-se estudar as interações entre a disponibilidade de água e a fertilização com K e Na sobre os processos fisiológicos e a qualidade da madeira e dos produtos da madeira (biomassa e carvão vegetal) durante a rotação.

Seleção, corte e preparo das amostras

Com base nos inventários florestais realizados a cada seis meses na área experimental, foram selecionadas nove árvores, com cinco anos de idade (corte em 2015), por tratamento de fertilização e regime hídrico (três árvores por parcela; três parcelas por tratamento), pertencentes à classe de área basal média e na bordadura interna das parcelas, totalizando 54 árvores amostradas. As árvores selecionadas foram cortadas e obtidos toretes de madeira de 50 cm de comprimento da região do DAP (1,30 metros de altura). De cada torete, foram retirados dois discos de madeira com espessura de 5 cm cada, sendo um disco destinado à determinação da densidade básica da madeira e o outro para a produção de carvão vegetal. O restante do torete foi triturado e moído para a caracterização da biomassa *in natura*.

Dos discos de madeira destinados para a produção de carvão vegetal foram retiradas cunhas opostas, secas em estufa a 103 ± 2 °C (até atingirem massa constante) e carbonizadas em forno mufla equipado com controle de temperatura e tempo, com temperatura final de 450 °C, a uma taxa de aquecimento de $1,67$ °C min^{-1} , permanecendo estabilizado na temperatura final por um período de 30 minutos (ARANTES *et al.*, 2013).

Análises realizadas

As características energéticas e físicas da biomassa e do carvão vegetal foram determinadas conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1 – Síntese das análises realizadas na caracterização energética e física da biomassa e do carvão vegetal.

Table 1 – Synthesis of the analyzes performed in the energetic and physical characterization of biomass and charcoal.

Amostra	Preparo	Produto	Parâmetros	Métodos/Normas
Disco de madeira	Cunhas opostas	-	Densidade básica (DB)	ABNT NBR 11941 (2003)
Disco de madeira	Cunhas opostas	Carvão vegetal	Análise Imediata	ASTM E872-82 (2013) e ASTM D1102-84 (2013)
			Poder calorífico superior (PCS) em bomba calorimétrica	ASTM D5865 (2013)
			Densidade relativa aparente (DRA)	Hidrostático
			Densidade energética	PCS*DRA
			Rendimento gravimétrico	(Peso carvão/Peso seco) *100
Torete de madeira	Triturado e moído	Biomassa em pó	Análise imediata	ASTM E872-82 (2013) e ASTM D1102-84 (2013)
			Poder calorífico superior (PCS) em bomba calorimétrica	ASTM D5865 (2013)
			Densidade a granel (DG)	ABNT NBR 6922 (1981)
			Densidade energética da madeira	PCS*DB
			Densidade energética da biomassa	PCS*DG

Análises estatística

Na análise estatística dos resultados foram aferidos os *outliers*, a distribuição dos dados e a heterogeneidade da variância. As diferenças entre os tratamentos foram avaliadas por meio da análise de variância, em blocos completamente casualizados para o dispositivo experimental em *split-plot* e quando se detectou efeito significativo, foi aplicado o teste de Tukey, a 5% de significância.

Resultados e discussão

Características da biomassa

Os valores médios da análise imediata e do poder calorífico superior (PCS) da madeira, para cada um dos 6 tratamentos, encontram-se na Tabela 2 e estão de acordo com os apresentados na literatura para os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo e para o PCS (PEREIRA *et al.*, 2016; SANTOS *et al.*, 2016). A análise de variância indicou não haver diferença significativa entre os tratamentos de fertilização x disponibilidade hídrica para os teores de materiais voláteis, carbono fixo e PCS, bem como para os efeitos isolados de fertilização (Controle, K e Na; considerando 100% das chuvas) e disponibilidade hídrica (63% e 100%).

Foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos para o teor de cinzas com (-A) e sem exclusão (+A) da água da chuva: 0,15 a 0,29% e 0,47 a 0,50%, respectivamente (Tabela 2), não sendo detectado efeito significativo da aplicação do potássio e do sódio. De acordo com Klautau (2008), a composição química das cinzas, constituída basicamente por cálcio (Ca), potássio (K), magnésio (Mg), fósforo (P), sódio (Na), ferro (Fe), silício (Si) e zinco (Zn) pode ser afetada principalmente pela disponibilidade destes minerais no solo. Sette Junior *et al.*

(2013) estudando a translocação de nutrientes na madeira de *Eucalyptus grandis* determinaram o aumento da concentração de K e Na no tronco das árvores de eucalipto com a aplicação destes nutrientes no solo.

Tabela 2 – Análise imediata e poder calorífico superior da biomassa, por tratamento.

Table 2 – Proximate analysis and the higher heating value of eucalyptus biomass per treatment.

Disponibilidade hídrica	Tratamentos	MV (%)	CF (%)	CZ (%)	PCS (kcal kg ⁻¹)
100%	C/+A	84,65 a	14,85 a	0,50 a	4235,89 a
	Na/+A	83,49 a	16,03 a	0,48 a	4277,03 a
	K/+A	82,67 a	16,86 a	0,47 a	4264,95 a
Média		83,60 A	15,91 A	0,48 A	4259,29 A
63%	C/-A	82,55 a	17,20 a	0,25 b	4256,10 a
	Na/-A	83,07 a	16,70 a	0,15 b	4262,88 a
	K/-A	83,65 a	16,06 a	0,29 b	4273,21 a
Média		83,09 A	16,65 A	0,23 B	4264,06 A

Em que: MV = materiais voláteis; CF = carbono fixo; CZ = cinzas; PCS = poder calorífico superior. Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si. Minúscula: efeito dos tratamentos e Maiúscula: efeito da disponibilidade hídrica.

Os maiores e significativos teores de cinzas observados na madeira, na condição 100% (0,48%) em relação a 63% (0,23%) de disponibilidade de água da chuva se deve, possivelmente, à maior absorção dos minerais no solo, pelas raízes das árvores, com a presença da água, promovendo o aumento da concentração do K e do Na no tronco das árvores de eucalipto, conforme indicado anteriormente no estudo desenvolvido por Sette Junior *et al.* (2013). Segundo Sands e Mulligan (1990), quando há disponibilidade hídrica no solo, ocorre maior absorção de nutrientes pelas plantas: a difusão, definida pela Lei de Fick, ou movimento de moléculas a favor do gradiente de concentração das plantas é favorecido pelo aumento do conteúdo de água, que diminui a concentração de sais das raízes e conseqüentemente aproxima os íons das raízes dos vegetais havendo maior absorção dos nutrientes (MARSCHNER, 1995).

Os valores médios obtidos para o *Eucalyptus grandis*, independentemente dos tratamentos de fertilização x disponibilidade hídrica, estão de acordo com o apresentado na literatura para densidade a granel (PEREIRA *et al.*, 2016), densidade básica (SANTOS *et al.*, 2011; SEREGHETTI *et al.*, 2015), densidade energética da biomassa (PEREIRA *et al.*, 2016) e densidade energética da madeira (ELOY *et al.*, 2016).

A densidade a granel da biomassa apresentou médias variando de 0,16 a 0,21 g cm⁻³, diferindo estatisticamente e apresentando menores valores nos tratamentos C/+A e C/-A, não sendo detectado efeito significativo da disponibilidade hídrica (valores médios de 0,19 g cm⁻³) (Tabela 3). É desejável que resíduos lignocelulósicos apresentem maiores valores de densidade a granel, pois fatores como os custos com o transporte e a densidade energética são essenciais na viabilidade econômica das energias renováveis. A baixa densidade a granel inviabiliza o transporte a maiores distâncias por ocupar grandes volumes, além do baixo conteúdo energético contido por unidade volumétrica, características presentes na maioria das biomassas de origem vegetal (NHUCHHEN; BASU; ACHARYA, 2014).

Quanto à densidade básica da madeira, o Tratamento Na/+A (aplicação de sódio com 100% de água das chuvas) apresentou densidade média de 0,41 g cm⁻³, significativamente menor

em relação aos tratamentos C/-A, Na/-A e K/-A (Tabela 3). Castro *et al.* (2017), avaliando as árvores de eucalipto do mesmo experimento, em idades variando de 1 a 3 anos, também observaram este comportamento em relação ao Tratamento Na/+A. Existem poucas pesquisas que tratam do efeito da aplicação do Na nas plantas e conseqüentemente nas características madeira, como a densidade básica, dificultando a discussão dos resultados. Apesar dos avanços indicados nos recentes trabalhos científicos (SUBBARAO *et al.*, 2003; EPRON *et al.*, 2012; FREITAS *et al.*, 2015) outros esclarecimentos sobre a atuação do Na nas árvores ainda são necessários, como seu transporte interno e o desenvolvimento de estratégias de sobrevivência à salinidade (KRONZUCKER; BRITTO, 2011). Recomenda-se a realização de mais estudos acerca dessa temática, bem como da interação do sódio com a disponibilidade de água, possibilitando a indicação da sua utilização em larga escala, substituindo parcialmente o K na fertilização de plantações florestais de eucalipto.

Tabela 3 – Densidade a granel e energética da biomassa; densidade básica e energética da madeira, por tratamento.

Table 3 – Bulk and energy densities of biomass; wood basic and energetic densities per treatment.

Disponibilidade hídrica	Tratamentos	DGB (g cm ⁻³)	DBM (g cm ⁻³)	DEB (Gcal m ⁻³)	DEM (Gcal m ⁻³)
100%	C/+A	0,16 b	0,43 ab	0,72 b	1,80 ab
	Na/+A	0,21 a	0,41 b	0,92 a	1,74 b
	K/+A	0,20 a	0,42 ab	0,85 a	1,75 b
Média		0,19 A	0,42 B	0,83 A	1,76 B
63%	C/-A	0,17 b	0,45 a	0,88 a	1,86 ab
	Na/-A	0,21 a	0,45 a	0,73 b	1,89 ab
	K/-A	0,19 a	0,46 a	0,84 a	1,95 a
Média		0,19 A	0,45 A	0,82 A	1,90 A

Em que: DGB = densidade a granel da biomassa em pó; DEB = densidade energética da biomassa em pó; DBM = densidade básica da madeira; DEM = densidade energética da madeira. Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si. Minúscula: efeito dos tratamentos e Maiúscula: efeito da disponibilidade hídrica.

A média da densidade básica da madeira das árvores de *Eucalyptus grandis* submetidas à exclusão artificial dos níveis de precipitação em 37% (63% de disponibilidade hídrica) foi de 0,45 g cm⁻³, sendo superior às árvores no tratamento com 100% de disponibilidade hídrica, com média de 0,42 g cm⁻³. Alguns pesquisadores verificaram o aumento da densidade da madeira de *Eucalyptus grandis* em regiões sujeitas ao estresse hídrico (GONÇALEZ *et al.*, 2009). As plantas afetadas pelo estresse hídrico reduzem sua taxa de crescimento, ou seja, alteram a atividade cambial, bem como reduzem a área foliar, aumentam a biomassa das raízes e alteram a estrutura do xilema a fim de evitar cavitação (CARTER; WHITE, 2009). Principalmente em consequência da redução da taxa de crescimento, ocorre o espessamento da parede celular devido à deposição de carboidratos, aumentando assim a densidade da madeira (PANSHIN; DE ZEEUW, 1980).

As densidades energéticas, tanto da biomassa quanto da madeira, para os seis tratamentos, possuem as mesmas tendências observadas para as densidades a granel e básica, respectivamente, e as pequenas variações do PCS (Tabela 2), por serem diretamente dependentes destas para suas determinações. A densidade a granel e a densidade básica são os parâmetros que mais influenciam a densidade energética. Na análise dos fatores isolados não foram observadas diferenças significativas

para a densidade energética da biomassa em pó, diferentemente da análise da densidade energética da madeira, apresentando diferença entre os tratamentos da disponibilidade hídrica (63 e 100 %).

Características do carvão vegetal

A análise de variância indicou efeito dos tratamentos apenas para o teor de cinzas no carvão vegetal (Tabela 4): Na/+A (2,10%) e Na/-A (0,77%), maior e menor teor observado, respectivamente. A maior porcentagem de cinzas observada no Tratamento Na/+A é decorrente, possivelmente, da maior disponibilidade de água, que favorece a maior absorção e acúmulo de minerais (SANDS; MULLIGAN, 1990), conforme já discutido para o teor de cinzas da biomassa. Recomendam-se estudos complementares sobre a ação do sódio nas plantas e sua interação com a disponibilidade de água para a melhor explicação dos comportamentos observados neste estudo. A média de 1,35% para o teor de cinzas do carvão vegetal do eucalipto, considerando todos os tratamentos, está dentro da faixa normalmente citada na literatura (BRAND *et al.*, 2015; SOUZA *et al.*, 2016).

Em relação aos teores de materiais voláteis, de carbono fixo e PCS no carvão vegetal: nos tratamentos e nos fatores isolados, não foram observadas diferenças significativas, podendo-se afirmar, assim como para a biomassa, que os tratamentos de fertilização x disponibilidade hídrica não influenciam essas variáveis. Os valores médios obtidos neste estudo para as três variáveis estão dentro da faixa de valores apontados na literatura (BRAND *et al.*, 2015; SANTOS *et al.*, 2016).

Tabela 4 – Análise imediata e poder calorífico superior do carvão vegetal, por tratamento.

Table 4 – Proximate analysis and the higher heating value of charcoal per treatment.

Disponibilidade hídrica	Tratamentos	MV (%)	CF (%)	CZ (%)	PCS (kcal kg ⁻¹)
100%	C/+A	28,61 a	69,98 a	1,41 b	7322,13 a
	Na/+A	29,23 a	68,67 a	2,10 a	7105,62 a
	K/+A	30,04 a	68,57 a	1,39 b	7182,90 a
Média		29,29 A	69,07 A	1,63 A	7203,55 A
63%	C/-A	30,92 a	67,72 a	1,36 b	7083,65 a
	Na/-A	28,56 a	70,66 a)	0,77 c	7131,94 a
	K/-A	30,04 a	68,87 a	1,09 bc	7239,23 a
Média		29,84 A	69,08 A	1,07 A	7151,61 A

Em que: MV = materiais voláteis; CF = carbono fixo; CZ = cinzas; PCS = poder calorífico superior. Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si. Minúscula: efeito dos tratamentos e Maiúscula: efeito da disponibilidade hídrica.

A inexistência de efeito significativo da disponibilidade hídrica e da aplicação de fertilizantes nos teores de materiais voláteis, carbono fixo e PCS do carvão vegetal seguem o mesmo comportamento observados para a biomassa antes da carbonização (Tabela 2). Estas variáveis são comumente influenciadas por outros fatores como temperatura e taxa de aquecimento da carbonização (VALE; DIAS; SANTANA, 2010) uma vez que estes desempenham um papel importante nas diversas reações químicas envolvidas durante a pirólise e influenciam nas características químicas e físicas dos produtos gerados. O PCS do carvão vegetal se mostrou superior em relação ao da biomassa, com incremento na ordem de 70%, em função dos efeitos da carbonização na biomassa, com destaque para o aumento dos teores de carbono fixo.

As médias da densidade relativa aparente do carvão vegetal variaram entre 0,28 a 0,34 g cm⁻³

(Tabela 5) e se mostraram semelhantes às encontradas por Santos *et al.* (2011), nas mesmas condições de carbonização do presente estudo. Da mesma forma do comportamento observado na densidade básica da madeira, o carvão vegetal produzido com a madeira das árvores submetidas à redução dos níveis de precipitação apresentou maiores e significativos valores em relação àquelas com disponibilidade de 100% da água da chuva, não sendo detectado efeito significativo da aplicação do K e Na, corroborando os estudos já citados que mostram aumento da densidade da madeira e, conseqüentemente do carvão vegetal, em árvores de regiões sujeitas a estresse hídrico.

A densidade energética dos seis tratamentos variou de 1,99 a 2,40 Gcal m⁻³ (Tabela 5) e está relacionada à energia em determinado volume. No caso do carvão vegetal, os valores de densidade energética são superiores aos da biomassa em função do aumento do PCS no material pirolisado, apesar da redução da densidade nos carvões, conforme observado neste estudo (Tabelas 2, 3 e 4).

As médias do rendimento gravimétrico para os seis tratamentos apresentam-se no intervalo de valores apontado por Pelaez-Samaniego, Garcia-Perez e Cortez (2008) para carvão vegetal: entre 25 e 37% com base na madeira seca. Carvões com maior densidade são oriundos de madeira com maior densidade e, conseqüentemente, apresentam maior rendimento em massa e maior liberação de energia durante a queima, com maior resistência mecânica. Não foram observados efeitos significativos da aplicação do K e do Na; com efeito significativo da disponibilidade hídrica: a redução dos níveis de precipitação induziu a formação de madeira de maior densidade básica, carvão vegetal de maior densidade relativa aparente e conseqüentemente, maior rendimento gravimétrico.

Tabela 5 – Densidade relativa aparente, energética e rendimento gravimétrico do carvão vegetal, por tratamento.

Table 5 – Apparent relative and energy densities and yield of charcoal per treatment.

Disponibilidade hídrica	Tratamentos	DRA (g cm ⁻³)	DE (Gcal m ⁻³)	RG (%)
100%	C/+A	0,29 ab	2,10 ab	28,59 ab
	Na/+A	0,29 ab	2,06 ab	26,14 b
	K/+A	0,28 b	1,99 b	28,26 ab
Média		0,29 B	2,05 B	27,66 B
63%	C/-A	0,34 a	2,37 a	32,21 a
	Na/-A	0,31 ab	2,19 ab	31,88 a
	K/-A	0,33 a	2,40 a	30,94 a
Média		0,33 A	2,32 A	31,68 A

Em que: DRA = densidade relativa aparente; DE = densidade energética; RG = rendimento gravimétrico. Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si. Minúscula: efeito dos tratamentos e Maiúscula: efeito da disponibilidade hídrica.

Para estudos futuros, recomenda-se: (i) a avaliação dos parâmetros de qualidade energéticas e físicas abordados neste estudo, em idades mais avançadas, para determinar as diferentes fases caracterizadas pela formação da madeira juvenil-transição-adulta, importante para a utilização da madeira para diversos fins, incluindo o energético; (ii) a determinação dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na biomassa de *Eucalyptus grandis*, sob a fertilização mineral e disponibilidade hídrica, para poder explicar melhor os comportamentos da madeira e do carvão vegetal observados neste estudo; (iii) estudos sobre os efeitos do sódio nas plantas e na qualidade da madeira de *Eucalyptus* spp., para a indicação da sua aplicação parcial em larga escala na fertilização das plantações florestais, em substituição ao potássio.

Com o cenário atual das mudanças climáticas, faz-se necessário o desenvolvimento de projetos de pesquisa para auxiliar na compreensão dos efeitos das alterações dos regimes hídricos e sua interação com a aplicação de fertilizantes minerais em plantações florestais de eucalipto. Esse trabalho apresenta resultados visando contribuir com a compreensão dos efeitos da disponibilidade hídrica e da aplicação de potássio e sódio na qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis*.

Conclusões

- A aplicação da fertilização com K e Na não influenciou as características energéticas e físicas da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis*.

- A exclusão parcial de 37% da água da chuva na plantação florestal de *Eucalyptus grandis* promoveu alterações nas características da madeira e do carvão vegetal, com redução do teor de cinzas, aumento da densidade da madeira e do carvão vegetal e rendimento gravimétrico do carvão vegetal.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6922**: Carvão vegetal - Ensaio físicos - Determinação da massa específica - Densidade a granel. Rio de Janeiro, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: madeira, determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ALMEIDA, J. C. R. *et al.* Positive growth response to NaCl application in Eucalyptus plantation established K-deficient soils. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1786-1795, apr. 2010.

AMERICAN STANDARD OF TESTING METHODS. **ASTM D5865-13**. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. West Conshohocken, 2013.

AMERICAN STANDARD OF TESTING METHODS. **ASTM E872-82**. Standard test method for volatile matter in the analysis of particulate wood fuels. Phyladelphia, 2013.

AMERICAN STANDARD OF TESTING METHODS. **ASTM D1102-84**. Standard Test Method for Ash in Wood. West Conshohocken, 2013.

ARANTES, M. D. C. *et al.* Características do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 423-431, jul./set. 2013.

BENLLOCH-GONZÁLEZ, M. *et al.* Starvation Inhibits Water-stress-induced stomatal closure. **Journal of Plant Physiology**, Amsterdam, v. 165, p. 623-630, 2008.

BRAND, M. A. *et al.* Qualidade do carvão vegetal para o consumo doméstico comercializado na Região Serrana Sul de Santa Catarina. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 39, n. 6, p. 1165-1173, 2015.

CABRAL, O. M. R. *et al.* The energy and water balance of a *Eucalyptus* plantation in southeast Brazil. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 388, p. 208-216, 2010.

CARTER, J. L.; WHITE, D. A. Plasticity in the Huber value contribute est homeostasis in leafwater relation sofa mallee Eucalypt With variation groundwater depth. **Tree Physiology**, Victoria, v. 29, p. 1407-1418, 2009.

CASTRO, V. R. *et al.* Efeito da aplicação do potássio, do sódio e da disponibilidade hídrica na densidade aparente a 12% de umidade do lenho juvenil de árvores de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 3, p. 1017-1027, jul./set. 2017.

- ELOY, E. *et al.* Efeito da idade e do espaçamento de plantio nas propriedades energéticas do *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 40, n. 4, 2016.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Balanco Energético Nacional 2017**: ano base 2016. Rio de Janeiro: EPE, 2016. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf. Acesso em: 01 abr. 2017.
- EPRON, D. *et al.* Do changes in carbon location account for the grow with response to potassium and sodium application subtropical *Eucalyptus* plantations. **Tree Physiology**, Victoria, v. 31, p. 1-13, 2012.
- FREITAS, P. C. *et al.* Efeito da disponibilidade hídrica e da aplicação de potássio e sódio nas características anatômicas do lenho juvenil de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 39, n. 2, p. 405-416, 2015.
- GONÇALEZ, J. C. *et al.* Influência do sítio nas propriedades da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 2, p. 251-255, 2009.
- GONÇALVES, J. L. M. *et al.* An evaluation of minimum and intensive soil preparation regarding fertility and tree nutrition. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (ed.). **Forest nutrition and fertilization**. Piracicaba: IPEF, 2004. p. 13-64.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório IBÁ 2016**. Brasília: IBA, 2017. Disponível em: http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2016_.pdf. Acesso em: 26 jun. 2017.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL OF CLIMATE CHANGES. **Climate change 2014**: Synthesis report. Geneva: Switzerland, 2014. 56 p.
- KLAUTAU, J. P. **Análise experimental de uma fornalha a lenha de fluxo co-corrente para secagem de grãos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- KRONZUCKER, H. J.; BRITTO, D. T. Sodium transport in plants: a critical review. **New Phytologist**, London, v. 189, p. 54-81, 2011.
- MAQUERE, V. **Dynamics of mineral elements under a fastgrowing Eucalyptus plantations in Brazil: implications for soil sustainability**. 2008. Thesis (Ph. D. in Forest Science) – Agro Paris Tech, Paris, 2008.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd ed. London: Academic Press, 1995. 189 p.
- NHUCHHEN, D. R.; BASU, P.; ACHARYA, B. A. Comprehensive Review on Biomass Torrefaction. **International Journal of Renewable Energy & Biofuels**, Semarang, v. 14, p. 56, 2014.
- PANSHIN, A. J.; DEZEEUW, C. **Text book of wood technology**. 4th, New York: Mcgraw-Hill, 1980. 722 p.
- PELAEZ-SAMANIEGO, M. R.; GARCIA-PEREZ, M.; CORTEZ, L. B. Improvements of Brazilian carbonization industry as part of the creation of a global biomass economy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Belfast, v. 12, n. 4, p. 1063-1086, may 2008.
- PEREIRA, M. P. C. F. *et al.* Torrefação de cavacos de eucalipto para fins energéticos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 36, n. 87, p. 269-275, jul./set. 2016.
- SANDS, R.; MULLIGAN, D. R. Water and nutrient dynamics and tree growth. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 3, p. 91-111, 1990.
- SANTOS, D. R. S. *et al.* Potencial de espécies de bambu como fonte energética. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 111, p. 751-758, 2016.

SANTOS, R. C. *et al.* Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.

SEREGHETTI G. C. *et al.* Efeito do espaçamento no crescimento e na densidade básica da madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em florestas de ciclo curto. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 30, n. 3, p. 257-262, 2015.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Sistema nacional de informações florestais**. Brasília: SFB, 2016. Disponível em: <http://www.florestal.gov.br/snif/producao-florestal/consumo>. Acesso em: 26 mai. 2017.

SETTE JUNIOR, C. R. *et al.* Crescimento em diâmetro do tronco de árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill. ex. Maiden e a relação com as variáveis climáticas e fertilização mineral. **Revista Arvore**, Viçosa, MG, v. 34, n. 6, 2010.

SETTE JUNIOR, C.R. *et al.* Source-driven remobilization of nutrientes within stem wood in *Eucalyptus grandis* plantations. **Trees**, [s. 1.], v. 27, p. 827-839, 2013.

SOUZA, N. D. *et al.* Estudo de caso de uma planta de carbonização: avaliação de características e qualidade do carvão vegetal visando uso siderúrgico. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 23 n. 2, p. 270-277, 2016.

SUBBARAO, G. V. *et al.* Sodium: a functional plant nutrient. **Plant Science**, London, v. 22, p. 391-416, 2003.

URZEDO, D. I. de *et al.* Effects of organic and inorganic fertilizers on greenhouse gas (GHG) emissions in tropical forestry. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 310, p. 37-44, 2013.

VALE, A. T.; DIAS, I. S.; SANTANA, M. A. E. Relação entre as propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 137- 145, 2010.

WU, Z. *et al.* Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: A meta-analysis of experimental manipulation. **Global Change Biology**, London, v. 17, p. 927-942, 2011.