

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RODRIGO SIMETTI

BIOMASSA DE CINCO ESPÉCIES DE *Eucalyptus* PARA USO COMO
BIOCOMBUSTÍVEL

CURITIBA

2016

RODRIGO SIMETTI

BIOMASSA DE CINCO ESPÉCIES DE *Eucalyptus* PARA USO COMO
BIOCOMBUSTÍVEL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia Florestal. Área de concentração: Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

Orientadora: Prof. Dra. Ghislaine Miranda Bonduelle

Coorientador: Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva

CURITIBA

2016



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Setor CIÊNCIAS AGRÁRIAS
Programa de Pós Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL
Código CAPES: 40001016015P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **RODRIGO SIMETTI**, intitulada: "**BIOMASSA DE CINCO ESPÉCIES DE Eucalyptus PARA USO COMO BIOCOMBUSTÍVEL**", após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua

Aprovação.

Curitiba, 05 de Abril de 2016.


Prof GHISLAINE MIRANDA BONDUELLE (UFPR)
(Presidente da Banca Examinadora)


Prof EDSON ALVES DE LIMA (EMBRAPA)


Prof JORGE LUIS MONTEIRO DE MATOS (UFPR)



AGRADECIMENTOS

Foram muitas pessoas que contribuíram para que esse trabalho fosse realizado, aqueles que contribuíram na minha formação acadêmica e de convívio pessoal.

Agradeço primeiramente a minha família, pais e irmãos, por todo o apoio dado durante a jornada de desenvolvimento desse trabalho. Especialmente a minha namorada e meu filho por toda compreensão e por estarem ao meu lado nessa jornada.

No convívio acadêmico agradeço à professora Ghislaine Miranda Bonduelle, por sua orientação, todo o tempo empenhado durante os anos para que esse trabalho fosse possível e pela confiança depositada. Ao professor Dimas Agostinho da Silva, pela sua coorientação, pelo espaço e estrutura cedidos, além da imensurável quantidade de café fornecida. Aos colegas e membros do Laboratório de Energia de Biomassa da Universidade Federal do Paraná (UFPR), principalmente Clarice de Andrade, Fernando A. Ferraz, Karine A. Pelanda e Sandra L. S. Mayer; por todo esforço, tempo e incentivo; vocês foram de fundamental importância para que esse trabalho fosse possível. Ao laboratório de Química da Madeira da UFPR e sua equipe.

Ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da UFPR que possibilitou a realização do trabalho. Aos demais colegas e técnicos administrativos do Departamento de Tecnologia e Engenharia Florestal da UFPR.

À empresa Stora Enso Florestal por ceder o material biológico, assim como o suporte para a coleta desse mesmo, para a realização desse estudo.

Aos demais amigos e colegas de convívio, e todos aqueles que de alguma forma contribuíram para que fosse possível a realização e êxito desse trabalho.

RESUMO

Esse trabalho teve por objetivo avaliar o potencial da biomassa de cinco espécies de *Eucalyptus* como fonte de energia e, também, matéria-prima para a produção de carvão vegetal. Foram utilizadas as espécies *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunnii*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e o híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (*Eucalyptus urograndis*) provenientes de plantios arbóreos comerciais com 7 anos de idade, localizados no bioma Pampa no estado do Rio Grande do Sul. Foram avaliadas as propriedades energéticas dos compartimentos da árvore: madeira, casca, galho e folha; além da biomassa seca e o estoque de energia destes compartimentos. Utilizando o compartimento madeira foi produzido carvão vegetal, com temperatura de 450 °C e taxa de aquecimento de 2 °C min⁻¹, no qual foram avaliadas as propriedades energéticas. A partir desse processo foram avaliados os rendimentos de carvão vegetal, licor pirolenhoso, gases não condensáveis, carbono fixo e energia. Na avaliação energética dos diferentes compartimentos houve pouca variação entre as espécies, o compartimento da casca destacou-se pelo alto teor de cinzas, enquanto o compartimento folhas apresentou o maior poder calorífico superior. Para biomassa seca e estoque de energia a espécie *E.dunnii* foi a que apresentou resultados superiores e a espécie *E.benthamii* os inferiores. Em relação a produção de carvão vegetal e qualidade do mesmo, as espécies apresentaram diferenças para o teor de cinzas e materiais voláteis, densidade relativa aparente e rendimentos. A espécie *E.benthamii* apresentou os melhores resultados de rendimentos em carvão vegetal, energia e carbono fixo, enquanto a espécie *E.dunnii* apresentou os resultados inferiores para essas mesmas propriedades. As espécies estudadas apresentam potencial para a produção de energia via combustão direta e para a produção de carvão vegetal.

Palavras-chave: Análise termogravimétrica. Biorredutor. Propriedades tecnológicas da madeira. Qualidade carvão. Recursos Florestais.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the potential of biomass of five species *Eucalyptus* as an energy source and raw material for the production of charcoal. In this study were used the species *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunnii*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* and hybrid *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (*Eucalyptus urograndis*) from commercial arboreal plantations 7 years old, located in the “*pampa gaucha*” region in the Rio Grande do Sul state. Energy properties of tree compartments were evaluated: stem wood, stem bark, leaf and branches; and the dry biomass and energy stock of these compartments. The stem wood was used to produce charcoal, with the final temperature of 450 ° C and a heating rate of 2 ° C min⁻¹, which were evaluated energy properties, this process were evaluated yields of charcoal, pyrolignous liquid, no condensable gases, fixed carbon and energy. The energy evaluation of the different compartments showed little variation among species, the stem bark compartment highlighted by high ash content, while the leaves compartment showed the largest higher calorific value. For dry biomass and energy stock the *E.dunnii* was the species that showed superior results and *E.benthamii* lower results. In to charcoal production and quality of the same species showed differences for ash and volatiles, apparent relative density and yields. The *E.benthamii* stood out positively in relation to income in charcoal, energy and fixed carbon, while the *E.dunnii* showed lower results for these same properties. The species showed low variation between the technological properties so that all have the potential for energy production.

Keywords: Thermo-gravimetric analysis. Bioreducer. Wood technological properties. Charcoal quality. Forest resources.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVO	10
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
3 REVISÃO DA LITERATURA	11
3.1 BIOMASSA PARA ENERGIA	11
3.1.1 Madeira	12
3.1.2 Carvão vegetal	14
3.2 PROCESSOS DE CONVERSÃO	15
3.2.1 Combustão	15
3.2.2 Pirólise.....	16
3.3 O GÊNERO <i>EUCALYPTUS</i>	17
3.3.1 <i>Eucalyptus benthamii</i> Maiden et Cabbage	18
3.3.2 <i>Eucalyptus dunnii</i> Maiden.....	18
3.3.3 <i>Eucalyptus grandis</i> W. Hill ex Maiden	19
3.3.4 <i>Eucalyptus saligna</i> Sm.	19
3.3.5 <i>Eucalyptus urograndis</i>	20
4 MATERIAL E MÉTODOS	21
4.1 MATERIAL BIOLÓGICO E ÁREA DE ESTUDO	21
4.2 COLETA DO MATERIAL E PREPARAÇÃO	22
4.3 DETERMINAÇÃO DA BIOMASSA SECA (BIO)	22
4.4 CARBONIZAÇÃO.....	23
4.5 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	24
4.5.1 Densidade básica e densidade relativa aparente.....	25
4.5.2 Composição química imediata e molecular	25
4.5.3 Poder calorífico	26
4.5.4 Estoque de energia (EE)	26
4.5.5 Densidade energética (DE)	26
4.5.6 Rendimento em carbono fixo (RCF) e rendimento energético (RE)	26
4.5.7 Análise termogravimétrica	27
4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	27
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
5.1 BIOMASSA E ENERGIA	29
5.1.1 Poder calorífico e análise química imediata	29
5.1.2 Densidade básica (DB) e densidade energética (DE) da madeira	31
5.1.3 Biomassa seca (BIO) e estoque de energia (EE).....	33
5.2 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DA MADEIRA.....	40
5.3 PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL	42
5.4 CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA E DO CARVÃO	47
6 CONCLUSÕES	51
7 RECOMENDAÇÕES	52
8 REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

O custo de energia no cenário brasileiro subiu mais de 6 vezes na última década, e a indústria de base florestal, com exceção do setor de celulose, é grande consumidora de energia de origem externa em seus processos. Esse fator aliado aos demais custos da cadeia produtiva de madeira elevou o custo de produção desse material (IBÁ, 2015).

Novas alternativas de redução de custos devem ser buscadas para tornar a indústria de base florestal mais competitiva e a otimização de uso dos recursos florestais aparece como uma das opções viáveis para o setor.

O Brasil apresenta área total de plantios arbóreos comerciais de 7,60 milhões de hectares, sendo que somente os plantios do gênero *Eucalyptus* ocupam 5,47 milhões de hectares, que correspondem 72,0% de toda a área utilizada para esse tipo de plantio. Em 2013 o consumo de madeira na indústria foi de 185,3 milhões de m³ e desses 23,5 milhões de m³ foram para a produção de carvão vegetal (IBÁ, 2015). Neste setor, o Brasil destaca-se como o maior produtor e consumidor mundial de carvão vegetal do mundo, tendo como principal destino as indústrias de aço, ferro-gusa e ferroligas. Além deste aspecto, deve-se considerar que o uso de carvão vegetal em substituição ao carvão mineral possibilita a mitigação de emissões de dióxido de carbono para o setor siderúrgico e incorpora uma fonte renovável de energia e carbono para esses processos.

A biomassa deixada em campo após a colheita representa valores de 4 a 20% da biomassa acima do solo, dependendo de diversos fatores como espécie, clone, espaçamentos, cuidados silviculturas, ambiente e manejo do sítio.

Em 2013 a energia de biomassa representou 27% da matriz energética brasileira (EPE, 2014). O gênero *Eucalyptus* é o mais utilizado para produção de bioenergia, e para esse fim são utilizados sistemas florestais com rotação de até sete anos de idade.

Portanto o presente trabalho procura contribuir de forma à obter informações referentes as propriedades energéticas de florestas de *Eucalyptus* de curta rotação para combustão direta e produção de carvão vegetal

2 OBJETIVO

Esse trabalho tem como objetivo avaliar o potencial da biomassa e do carvão vegetal de *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunnii*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus urograndis* para o uso como biocombustível.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Quantificar a produção de biomassa e energia de cinco espécies de *Eucalyptus* nos diferentes compartimentos da árvore: madeira, casca, folhas e galhos

Produzir e avaliar a qualidade do carvão vegetal proveniente das madeiras estudadas.

Correlacionar as propriedades energéticas e químicas das madeiras e do seu carvão vegetal.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 BIOMASSA PARA ENERGIA

A biomassa é a a forma mais antiga de energia utilizada pela humanidade, principalmente aquela proveniente da madeira. O termo biomassa engloba a madeira, resíduos florestais, culturas agrícolas, plantas, resíduos sólidos domésticos e materiais resultantes da fotossíntese, onde a energia solar juntamente com água e gás carbônico são convertidos em matéria orgânica. (DEMIRBAŞ, 2001)□

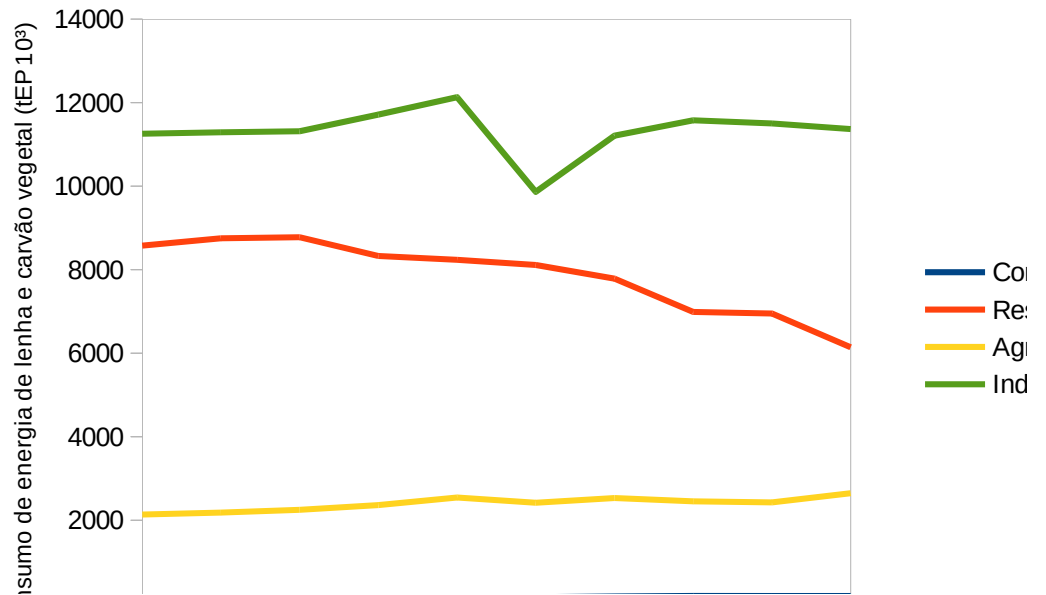
A biomassa forneceu no ano de 2014 para a matriz energética brasileira um total de 68.820.000 tEP¹ (EPE, 2014), ou seja 27%, de forma que o país se diferencia dos demais países em desenvolvimento por esse montante, dado que outros países apresentam preferência por fontes fósseis.

O uso da biomassa vegetal como fonte de energia apresenta vantagens ambientais em relação a fontes fósseis. A biomassa absorve dióxido de carbono durante seu crescimento e libera o mesmo durante a combustão, dessa forma é um combustível considerado de emissões neutras.

Na Figura 1 é apresentado o histórico de consumo de energia proveniente de lenha e carvão vegetal e madeira por setor no Brasil, durante o período de 2004 até 2013. É possível observar que houve uma queda para o consumo no ano de 2009 para o setor industrial e ocorre a redução do consumo residencial durante o período avaliado.

1 tEP = Tonelada equivalente de petróleo. 1tEP = 10000 kcal kg⁻¹ (EPE,2015)

FIGURA 1 - CONSUMO DE LENHA E CARVÃO VEGETAL PARA ENERGIA POR SETOR PARA O BRASIL



Fonte: EPE (2014)

A produção de biomassa para o uso energético em larga escala depende de plantios voltados especificamente para fins energéticos. O Brasil já conseguiu alcançar produtividade de 40 toneladas hectare⁻¹ ano⁻¹ para *Eucalyptus*, sendo mundialmente uma potencia nessa área (HALL; HOUSE; SCRASE, 2005). O conceito de florestas energéticas teve inicio na década de 1980, define plantações com grande quantidade de árvores por unidade de área e curta rotação, com idades de até sete anos, tendo como finalidade a produção de maior biomassa por área no menor espaço de tempo. (MAGALHÃES, 1982)

3.1.1 Madeira

Até o final dos anos 70 a madeira era a principal fonte de energia primária do Brasil, seguindo a tendências dos países mais desenvolvidos de utilizar derivados de petróleo e energia elétrica. Essa tendencia tem apresentado inversão nos últimos anos, devido a fatores como oferta das fontes de uso e vantagens econômicas, aliados a oportunidades ambientais que a madeira apresenta (BRITO, 2013)□. A madeira, na forma de lenha, foi responsável por 6,3% da energia consumida no Brasil em 2014. (EPE,2014)

Das características da madeira para energia se destacam a composição química elementar, composição química imediata, o poder calorífico e a densidade. Sendo que a composição química elementar apresenta notável uniformidade entre diferentes espécies. (BRITO; BARRICHELO, 1979; DEMIRBAŞ, 2001; DEMIRBAS, 2004; VITAL; CARNEIRO; PEREIRA, 2013)□

A madeira é constituída pelas macromoléculas de lignina, celulose e hemiceluloses, sendo a combinação dessas duas últimas chamada de holocelulose. Ainda ocorrem outros componentes com menor representatividade, em relação a massa total, que são chamados de extrativos, e influenciam nas propriedades físicas e energéticas da madeira.

Os teores de holocelulose, lignina e extrativos representam na madeira aproximadamente 69%, 27% e 4% (Neves et al, 2011; Silva et al, 2005). Os teores de extrativos e lignina tendem a aumentar com a idade da árvore e apresentam maiores concentrações próximo à base. De forma oposta o teor de holocelulose tende a diminuir com idade e próximo a base.

O poder calorífico depende dos teores de carbono e hidrogênio, sendo esses os elementos que tem maior contribuição na energia liberada durante a combustão, onde tem efeitos opostos, o carbono aumenta o poder calorífico e o hidrogênio reduz. O poder calorífico varia entre 3000 kcal.kg⁻¹ e 5400 kcal.kg⁻¹, sendo que coníferas apresentam poder calorífico cerca de 2% maior que folhosas. O teor de cinzas geralmente é menor que 1% da massa seca da madeira (CARNEIRO et al., 2013b, 2014). Enquanto os valores para o teor de carbono fixo variam entre 9 e 24%, e os teores de materiais voláteis de 81 até 90%, para a madeira.(BRITO; BARRICHELO, 1979; CARNEIRO et al., 2013b)□□

A densidade da madeira é importante parâmetro tecnológico para a definição e classificação de uso dessa matéria prima (JANKOWSKY, 1979; ELOY, 2015). É uma propriedade estrutural que reflete nas propriedades físicas, no comportamento anisotrópico, e tem a característica que reflete a quantidade de material disponível por unidade de volume. Para espécies florestais do gênero *Eucalyptus* são encontrados valores de densidade que variam de 300 kg m⁻³ e 750 kg m⁻³ (ELOY, 2015; SANTOS et al, 2011; TOMAZELLO FILHO, 1987). Madeiras comerciais tem densidade na faixa de 300 a 550 kg m⁻³ (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1987), enquanto madeiras tropicais costumam apresentar densidades superiores a 1040 kg m⁻³. (RAGLAND, AERTS, BAKER, 1991)

Zobel e Jett (1995) definem a densidade básica como a propriedades mais relevante no que tange a qualidade da madeira e rendimento de seus produtos energéticos. Maior teor de lignina e maior densidade favorecem a produção de carvão vegetal, pois estão associados a maiores rendimentos gravimétricos, maior teor de carbono fixo e maior densidade aparente do carvão. (PEREIRA; SCHAITZA; BAGGIO, 2000)

Os fatores que afetam a densidade básica da madeira são relativos a alterações na espessura da parede das fibras, redução do lume ou aumento do comprimento das fibras e no teor de extrativos. (VITAL; CARNEIRO; PEREIRA, 2013)

3.1.2 Carvão vegetal

O carvão vegetal é o principal redutor utilizado nas indústrias nacionais de ferro-gusa, ferroligas e aços. Porém o carvão industrial só teve sua maturidade na produção depois da década de 1960 (ROSILLO-CALLE, BEZZON; 2005). Do consumo de energia no Brasil no ano de 2014 teve participação de 1,5% do total. (EPE,2014)

A madeira para produção de carvão vegetal deve apresentar maior teor de lignina e menor teor de holocelulose, além de maior densidade (VITAL; CARNEIRO; PEREIRA, 2013)□. Teores de carbono e hidrogênio elevados, e baixos teores de cinzas e oxigênio são desejados em madeiras para produção de carvão (DERMIBAS, 2004; PROTÁSIO et al, 2011). Essas propriedades estão ligadas a redução da energia disponível com o aumento do teor de cinzas e da energia útil entre a ligação C-O ser inferior a presente na ligação C-C. (BILGEN; KAYGUSUZ, 2008)

O carvão vegetal da madeira é a combinação dos produtos resultantes da degradação da celulose, das hemiceluloses e da lignina. (BYRNE; NAGLE, 1997). A resistência térmica da madeira como um composto único esta relacionado a rigidez, complexidade e grau de condensação da estrutura formada por esses três componentes. (ANDRADE et al, 2004)

O processo de produção de carvão vegetal a partir da madeira consiste em aquecer a madeira, com temperaturas superiores acima de 200 °C, modificando a

sua composição química. Nesse processo ocorre o desprendimento das frações mais voláteis e o aumento no teor de carbono.

O teor de materiais voláteis deve ser inferior a 25% no carvão vegetal, dado que essa característica é inversamente proporcional ao carbono fixo nesse tipo de material e compromete a eficiência do carvão como redutor. Mas deve ser uma característica controlada pois proporciona o acendimento e controla a velocidade de combustão. O carvão produzido para fins siderúrgicos apresenta o teor de materiais voláteis entre 20% e 25%. (SANTOS, 2008)

O teor de cinzas presente no carvão vegetal está relacionado com o teor de cinzas da madeira e com o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, uma vez que o material inorgânico é inerte no processo de produção, portanto a quantidade absoluta de cinzas do material é mantida, enquanto a matéria orgânica reduz. O teor de cinzas do carvão é, portanto, maior que o teor de cinzas da madeira. Para Santos (2008) o teor de cinzas ideal na siderurgia é inferior a 1%. Santos et al. (2011) relataram para carvão de clones de *Eucalyptus* valores de 0,39% e 0,76%. Costa et al. (2014) para carvão utilizando madeira do cerrado encontraram valores de 2,4% a 5,2%.

O carvão vegetal com finalidade siderúrgica apresenta o teor de carbono fixo entre 75% e 80%, mas quanto maior o teor de carbono fixo maior será a produtividade dos altos-fornos (SANTOS, 2008). Associado à esses teores de carbono fixo do carvão vegetal, o poder calorífico superior é de aproximadamente 7500kcal kg⁻¹.

3.2 PROCESSOS DE CONVERSÃO

A conversão da biomassa em energia, conhecida também como bioenergia, dispõe de uma vasta gama de processos que dependem, entre outros fatores, do tipo e qualidade da biomassa, uso final e infraestrutura disponível. Os processos de conversão da biomassa em energia podem ser divididos em dois tipos: termoquímicos (combustão, pirólise, gaseificação e liquefação) e bioquímicos (digestão e fermentação) (MCKENDRY, 2002) □ .

3.2.1 Combustão

A combustão é uma reação química exotérmica, uma vez que libera calor, juntamente com luz, fumaça e gases. É o processo de oxidação-redução entre combustível e comburente. Combustíveis sólidos, como a madeira, primeiramente se transformam em gases para então ocorrer a combustão (BRITO; BARRICHELO, 1979; CARNEIRO et al., 2013b). Estão envolvidos na combustão transferência simultânea de calor e massa, reações químicas e fluxo de fluidos, tornando-a um processo complexo, diferenciando a madeira usada para combustão direta daquela utilizada para produção de carvão vegetal (DEMIRBAS, 2004; VITAL; CARNEIRO; PEREIRA, 2013)

A combustão pode ser dividida em seis etapas distintas: I - Secagem (até 200 °C) a perda de massa dessa etapa depende do teor de umidade inicial da biomassa; II – Emissão de voláteis (até 400 °C); III – Ignição dos voláteis (até 600 °C); IV – Combustão dos voláteis (até 800 °C); V – Extinção da chama (acima de 800 °C), a perda de massa é constante nessa etapa; VI – Combustão dos resíduos de carbono, ocorre pouca perda de massa e ao final desse processo restam as cinzas. (NOGUEIRA; LORA, 2003; BRAND, 2010)

Para que ocorra uma combustão completa, aquela onde todos os componentes da biomassa são oxidados por completo, deve haver oxigênio suficiente para as reações. Deste processo resultam altos teores de gás carbônico e índices insignificantes de fuligem e monóxido de carbono. Caso a combustão não seja completa a eficiência do processo é reduzida. (CARNEIRO et al., 2013b)

O calor resultante da combustão é usado somente para aquecimento, portanto, podendo ser usado para produção de vapor e posterior produção de energia mecânica ou energia elétrica. (CORTEZ; JUNIOR; ALMEIDA, 2013)

3.2.2 Pirólise

O processo de pirólise consiste na degradação de materiais macromoleculares utilizando somente calor na ausência de oxigênio. Durante esse processo fragmentos de baixo peso molecular se recombinaem em frações de alto peso molecular (MEIER; FAIX, 1999). Desse processo são obtidos três frações

uma sólida (carvão vegetal), uma líquida (licor pirolenhoso) e outra gasosa (gases não condensáveis). (MCKENDRY, 2002) □

A pirólise da biomassa apresenta cinco diferentes etapas: I – Secagem; II – Transição vítrea; III – Despolimerização e recondensação; IV – Devolatilização limitada e carbonização; V – Devolatilização extensiva e carbonização. (DEMIRBAS, 2004)

A pirólise de madeira para produção de carvão vegetal ocorre na presença controlada de oxigênio, em temperaturas na faixa de 350 °C à 500 °C. Esse processo tem como objetivo expulsar o oxigênio e concentrar o carbono da madeira, e como consequência ocorre o aumento do conteúdo energético do material final. (CARNEIRO et al., 2013a) □

Entre os fatores que afetam a pirólise as temperaturas de carbonização mais baixas favorecem a formação do produto sólido, assim como taxas de aquecimento menores. Porém com uso de temperaturas mais baixas a decomposição pode ser incompleta, ocasionando quantidades elevadas de material não “pirolisado”, chamado de tiço. (SHARMA; PAREEK; ZHANG, 2015)

Carneiro et al. (2013a) destacam a temperatura de carbonização, a taxa de aquecimento e a pressão como fatores de destaque no processo de pirólise. □ O aumento da temperatura de carbonização acarreta em maior teor de carbono, e menores teores de hidrogênio e oxigênio. O aumento do teor de carbono fixo relacionado com o aumento da temperatura de carbonização ocasiona a redução do teor de materiais voláteis, da resistência mecânica e do rendimento do carvão vegetal.

A taxa de aquecimento apresenta relação inversa com o rendimento em carvão vegetal. Além disso, taxas maiores produzem carvão vegetal com mais fissuras e trincas, portanto, mais friável. (OLIVEIRA, 1988)

A produção de carvão vegetal em escala laboratorial utiliza parâmetros de carbonização em uma faixa ampla. Para a temperatura de carbonização são utilizadas temperaturas de carbonização variando 300 °C a 900 °C, porém para fins de siderurgia e carvão culinário as temperaturas mais recomendadas são entre 450 °C e 500 °C. Para esse mesmo fim as taxas de aquecimento comumente utilizadas são inferiores a 2 °C min⁻¹. (CARNEIRO, 2013a; PROTÁSIO et al., 2012, 2013a, 2014; TRUGILHO, 2001)

3.3 O GÊNERO *EUCALYPTUS*

São conhecidas entre 600 e 700 espécies do gênero *Eucalyptus*, que teve origem na Austrália, com exceção de duas espécies que são originárias de ilhas da Oceania (CENTRO DE INTELIGÊNCIA EM FLORESTAS, 2009)□. Devido ao grande número de espécies, o que facilita a introdução em diferentes condições edafoclimáticas, a produtividade e características da sua madeira, o gênero *Eucalyptus* tem sido apontado como uma das melhores opções para a produção de energia (COUTO; MÜLLER, 2013)□. É ideal que madeiras desse gênero apresentem densidade mínima de 550 kg m⁻³ para seu uso em fins energéticos. (PALUDZYSZYN FILHO; SANTOS, 2013)□

No Brasil a área total de plantios de *Eucalyptus* era de 5,56 milhões de hectares, em 2014, sendo os estados com maior área plantada Minas Gerais, São Paulo e Mato Grosso do Sul (IBÁ, 2015)□□. As espécies mais difundidas no país são *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna*, e *Eucalyptus urophylla*. O híbrido *E.grandis* x *E. urophylla* também tem destaque, devido a sua plasticidade ambiental. (COUTO, MULLER, 2013)

As florestas energéticas do gênero *Eucalyptus* utilizam sistemas com espaçamentos com área útil entre 3 e 9 m² (COUTO et al., 2002) e são manejados em rotações de quatro a sete anos. (COUTO, MÜLLER, 2013)

3.3.1 *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cabbage

Devido a eventos como a expansão das fronteiras agrícolas, incêndios e a inundação da área de sua ocorrência natural o *E.benthamii* chegou a ser considerada uma espécie em extinção (HIGA; PEREIRA, 2003)□. A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) realizou o plantio dessa espécie no Brasil em 1988, nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul; onde a mesma apresentou bom desenvolvimento (LIMA; SILVA; LAVORANTI, 2011)□. A espécie apresenta maior a tolerância a geadas, entre as espécies disponíveis para plantio comercial. (PALUDZYSZYN FILHO; SANTOS, 2013)

A madeira de *E. benthamii* é dimensionalmente instável, tendo índice de contração volumétrica e coeficiente anisotropia elevados, acarretando em alta

intensidade de defeitos na madeira serrada, alta tendência a empenamento; de forma que seu uso para madeira serrada não é aconselhável. (HIGA; PEREIRA, 2003)□

O *E. benthamii* apresenta densidade de 471 kg m⁻³ e 523 kg m⁻³; poder calorífico superior de 4679 kcal kg⁻¹ e 4613 kcal kg⁻¹ para estudos com 5 (SILVA et al., 2015)□ e 7 anos (SAMISTRARO et al., 2015)□ , respectivamente. Devido as suas características a espécie é recomenda para o potencial uso como lenha e carvão. (HIGA; PEREIRA, 2003; LIMA; SILVA; LAVORANTI, 2011; SILVA et al., 2015)□

3.3.2 *Eucalyptus dunnii* Maiden

O *E. dunnii* apresenta árvores com altura entre 30 e 45m com tronco ereto e cilíndrico. No Brasil é cultivada extensivamente na região do planalto catarinense e paranaense, apresentando tolerância ao frio dessas regiões (LORENZI et al., 2003)□. Depois do *E. benthamii* é a espécie com maior tolerância a geadas (PALUDZYSZYN FILHO; SANTOS, 2013)□. Pereira et al. (1986) destacaram a espécie como uma das principais alternativas para plantios da região sul do Brasil, em relação à produção de biomassa.

A densidade básica do *E. dunnii* aos 7 anos é de 500 kg m⁻³ e seu poder calorífico superior 4613 kcal kg⁻¹ (SAMISTRARO et al., 2015)□. Sua madeira é classificada como de difícil secagem. (SEVERO, 2009)□

3.3.3 *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden

As árvores de *E. grandis* tem altura entre 20 e 40m e tronco retilíneo, sua casca é pulverulenta (LORENZI et al., 2003)□. A madeira tem densidade básica que varia entre moderadamente leve e pesada, 460 kg m⁻³ (HASELEIN et al., 2004)□, devido a isso seu plantio para fins energéticos não é aconselhado. Porém para climas sem geadas fortes, seu uso é recomendado para geração de produtos sólidos. (PALUDZYSZYN FILHO; SANTOS, 2013)□

O *Eucalyptus grandis* é a espécie mais cultivada no Brasil, entre os motivos está sua adaptação edafoclimática e a densidade básica moderada que permite

diversos usos, tendo sido empregada para produção de celulose e carvão vegetal. (COUTO; MÜLLER, 2008)

Para o uso energético Brito et al. (1983) classificaram a espécie como intermediária, em relação ao rendimento em carvão e a produtividade por área. Trugilho et al. (2001) encontraram rendimentos em carvão vegetal na faixa de 33% a 39%. Silva et al. (2012) encontraram poder calorífico superior para a madeira de *Eucalyptus grandis* de 4336 kcal kg⁻¹, e Lopes (2003) densidade básica de 460 kg m⁻³.

3.3.4 *Eucalyptus saligna* Sm.

O *E. saligna* apresenta casca lisa, tronco ereto e tem entre 20 e 30m de altura (LORENZI et al., 2003)□. Aos 7 anos apresenta densidade de 490 kg m⁻³ (TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996)□ sendo assim, seu plantio para fins energéticos não é recomendado, sendo comumente utilizado para esse fim na forma de resíduo. (PALUDZYSZYN FILHO; SANTOS, 2013)

Por outro lado, Brito et al. (1983) destacam a espécie para produção de carvão vegetal, devido ao seu teor de lignina e rendimento em carvão vegetal, porém destacam que o carvão da espécie apresenta densidade aparente baixa.

Ao avaliar clones de *Eucalyptus saligna* para a produção de carvão vegetal Trugilho et al. (2001) encontraram valores rendimentos em massa seca superiores a 37%.

3.3.5 *E. grandis* x *E. urophylla* (*Eucalyptus urograndis*)

O *E. urograndis* é um híbrido resultante do cruzamento das espécies *Eucalyptus grandis* W. Hill com *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, que apresenta o rápido crescimento e a boa forma da primeira espécie, combinados com a resistência a doenças, tolerância à seca e fácil brotação da segunda, fato que favorece sua utilização em sistemas em que há o interesse em se conduzir a plantação por talhadia. (PALUDZYSZYN FILHO; SANTOS, 2013)□

A densidade básica da madeira desse híbrido tende a ser maior do que do *E. grandis* e *E. urophylla*, com valores de até 623 kg m⁻³, apresentando melhor

rendimento e propriedades superiores na produção de papel em relação a essas espécies. É o cruzamento mais utilizado no Brasil para produção de polpa celulósica. (GONÇALEZ et al., 2014)

Na avaliação deste híbrido para a produção de carvão vegetal Oliveira et al. (2012) encontraram rendimentos em carvão na faixa de 33%, densidade aparente de 437 kg m⁻³ e PCS de 7631 kca kg⁻¹.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 MATERIAL BIOLÓGICO E ÁREA DE ESTUDO

Para esse estudo foram utilizados cinco materiais diferentes: *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunnii*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus urograndis* (hibrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*); todas com idade de 7 anos, provenientes de áreas de reflorestamento comercial da empresa StoraEnso Florestal localizados no Rio Grande do Sul. Os espaçamentos, locais e formas de plantio são apresentados na Tabela 1.

TABELA 1-MATERIAL BIOLÓGICO: FORMA DE PLANTIO, ESPAÇAMENTO UTILIZADO E LOCAL DA COLETA.

Espécie	Forma de plantio	Espaçamento (m)	Local
<i>E.benthamii</i>	Clonal	3,5 x 2,0	Cabanha da Prata
<i>E. dunnii</i>	Seminal	3,5 x 2,0	Chica Barbosa
<i>E. grandis</i>	Seminal	3,5 x 2,0	Chica Barbosa
<i>E. saligna</i>	Clonal	3,5 x 2,5	Antoniuzzi
<i>E. urograndis</i>	Clonal	3,5 x 2,5	Cabanha da Prata

FONTE: STORA ENSO FLORESTAL RIO GRANDE DO SUL (2014)

As fazendas Cabanha da Prata (29°48'19" S; e 55°34'12" W) e Chica Barbosa (29°46'27" S; e 55°34'37" W) estão localizadas no município de Alegrete, já a fazenda Antoniuzzi está localizada no município de São Francisco de Assis.

O clima da região é classificado como Cfa "Subtropical Mesotérmico" constantemente úmido na classificação de Köppen, com meses de frio, geadas de maio a agosto, calor intenso predominante em janeiro e fevereiro. A temperatura média do mês mais quente é superior a 22°C e a média anual é superior a 18°C. A precipitação varia de 1250 mm a 1500 mm, não havendo estação de seca definida. (MALUF, 2000) O solo da área de estudo é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico (EMBRAPA, 2006)

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios do inventário realizado nas áreas do experimento.

TABELA 2 - DADOS DENDROMÉTRICOS MÉDIOS DAS ESPÉCIES ESTUDADAS

Variável	Espécie				
	<i>E.benthamii</i>	<i>E.dunnii</i>	<i>E.grandis</i>	<i>E.saligna</i>	<i>E.urograndis</i>
DAP (cm)	16,5 (4,3)	17,49 (30,6)	18,09 (27,9)	19,97 (18,3)	18,68 (16,5)
Altura total (m)	29,8 (4,9)	23,52 (16,9)	26,05 (18,2)	28,36 (12,7)	30,11 (12,0)
Plantas ha ⁻¹	1066 ²	1066	1165	1092	1086
IMA (m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹)	57,26	47,61	53,27	59,7	59,8

FONTE: STORA ENSO FLORESTAL RIO GRANDE DO SUL (2014)

Em que: Valores entre parênteses representam o coeficiente de variação em porcentagem.

4.2 COLETA DO MATERIAL E PREPARAÇÃO

Foram amostradas nove árvores de cada espécie. As árvores foram selecionadas de acordo com o DAP, para que toda a amplitude diamétrica das espécies fosse amostrada, portanto as árvores coletadas apresentavam DAP variando entre 10 cm e 28 cm, conforme inventário florestal realizado anteriormente pela empresa (STORA ENSO FLORESTAL RIO GRANDE DO SUL, 2014). De cada árvore foram retirados seis discos, com aproximadamente 10cm de altura, nas posições: Base (10cm do solo), DAP (1,30m), 25%, 50%, 75% e 100% em relação à altura comercial, essa foi considerada até o diâmetro de 6cm com casca.

Os discos foram seccionados em quatro cunhas, sendo um par de cunhas opostas encaminhadas para determinação da densidade básica da madeira, uma cunha foi encaminhada para confecção de corpos de prova para carbonização e a outra para as análises químicas e energéticas da madeira.

4.3 DETERMINAÇÃO DA BIOMASSA SECA (BIO)

Para determinação da biomassa de madeira, de casca, de galho e de folha foi utilizado o método direto, no qual é realizada a derrubada e a pesagem dos

2 Para *E.benthamii* foi considerado o mesmo número de indivíduos por hectare do *E.dunnii*, uma vez que essa espécie apresenta o mesmo espaçamento e menor número de indivíduos dentro desse espaçamento. Essa medida foi realizada com finalidade de não penalizar a espécie *E.benthamii* nas estimativas por área, dado que essa espécie, diferente das demais, foi submetida à desbastes seletivos para criação de bancos de sementes.

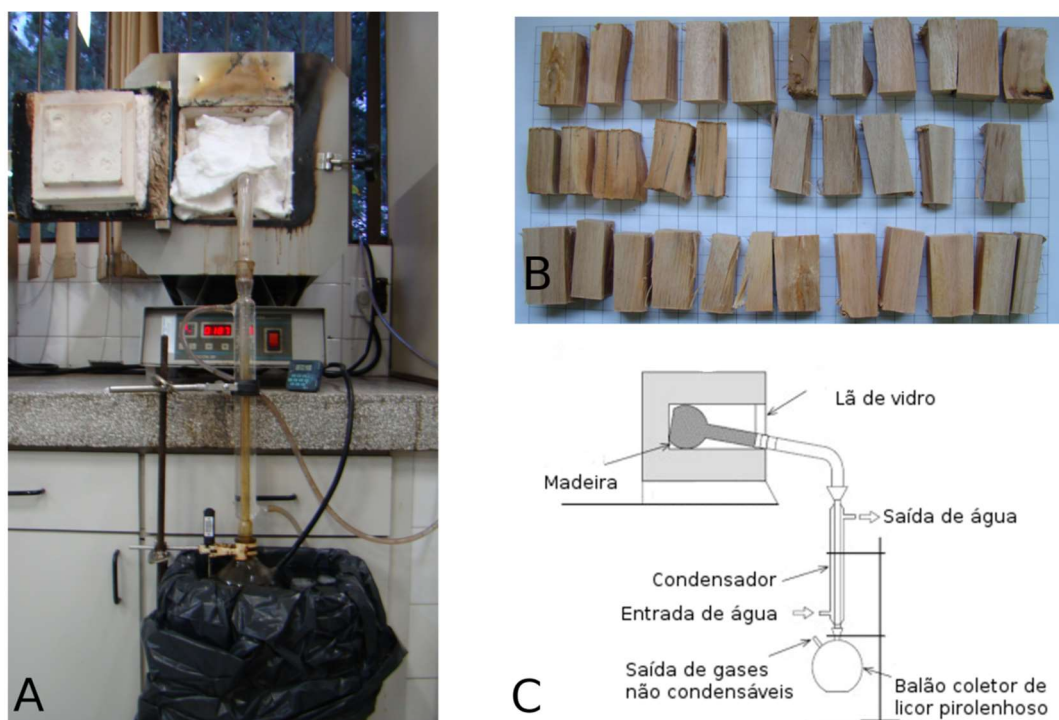
diferentes compartimentos das árvores ainda em campo (SANQUETTA, 2002). Casca e madeira foram pesadas juntas em campo, e separadas posteriormente em laboratório. De cada compartimento foram retiradas amostras para determinação do teor de umidade em laboratório, onde as amostras foram secas em estufa a 103 ± 2 °C.

Para o cálculo de biomassa por área foi utilizada a metodologia proposta por Santana et al. (2008), na qual a biomassa seca média de cada compartimento das nove árvores amostradas por espécie é multiplicada pelo número de indivíduos por hectare.

4.4 CARBONIZAÇÃO

As carbonizações foram realizadas em forno tipo mufla laboratorial com controle digital da taxa de aquecimento, temperatura e tempo de permanência (Figura 2A) . O sistema utilizado nas carbonizações apresentava coleta dos gases condensáveis (licor pirolenhoso), a capacidade do reator era de $1,06 \text{ dm}^3$, os gases não condensáveis foram expelidos para o ambiente (Figura 2C). As amostras foram picadas e secas antes da carbonização (Figura 2B). Foi utilizada uma taxa de aquecimento de 2°C min^{-1} partindo de 100°C até 450°C , com um tempo de permanência de 30 minutos nessa temperatura .

FIGURA 2 - SISTEMA DE PIROLISE UTILIZADO PARA AS CARBONIZAÇÕES



Do processo de carbonização foram determinados o rendimento em carvão vegetal (RCV), o rendimento em licor pirolenhoso (RLP) e o rendimento em gases não-condensáveis, esse último sendo por diferença da massa seca total para os outros rendimentos, conforme as equações abaixo:

$$RCV = \frac{MsCV}{MsM} \quad (1)$$

Em que: RCV = Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); MsCV = Massa seca de carvão vegetal (g); MsM = Massa seca de madeira (g)

$$RLP = \frac{MLP}{MsM} \quad (2)$$

Em que: RLP = Rendimento gravimétrico em licor pirolenhoso (%); MLP = Massa final de licor pirolenhoso (g); MsM = Massa seca de madeira (g)

$$RG = 100 - (RCV + RLP) \quad (3)$$

Em que: RG = Rendimento gravimétrico em gases não condensáveis (%);

RCV = Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); Rendimento gravimétrico em licor pirolenhoso (%)

4.5 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

As cunhas encaminhadas para as análises químicas e energéticas foram picadas e moídas em moinho de facas do tipo Wiley. Para cada árvore foi feita uma amostra composta pela madeira das cunhas de todas as alturas amostradas. Para as cascas foi feita uma amostra composta utilizando a casca das cunhas utilizadas na determinação da densidade básica. O carvão vegetal, as cascas, as folhas e os galhos foram moídos em um moinho analítico IKA Werke® A11. Após esse processo as amostras foram peneiradas utilizando um conjunto composto por peneiras de 35, 60, 200 e 270 mesh. O material retido na peneira de 35 mesh foi utilizado para determinação do poder calorífico superior e para a análise química imediata. O material retido na peneira de 60 mesh foi utilizado para determinação do teor de extrativos totais e lignina. O material retido na peneira de 270 mesh foi utilizado para as análises termogravimétricas.

4.5.1 Densidade básica e densidade relativa aparente

A densidade básica da madeira foi determinada de acordo com a norma NBR 11941 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2003)□, por meio do método de imersão em água. Para densidade básica média de cada posição foi considerada a média aritmética da densidade básica das duas cunhas opostas. Para densidade básica média de cada árvore foi considerada a média aritmética dos valores de cada posição de amostragem ao longo do fuste, com exceção do DAP, conforme a equação:

$$D_b = \frac{\sum_i^5 (D_{c1} + D_{c2})_i}{5} \quad (4)$$

Em que: D_b = Densidade básica (kg m^{-3}); D_{c1} = Densidade da cunha 1 (kg m^{-3}); D_{c2} = Densidade da cunha 2 (kg m^{-3}); i = Ponto de amostragem ao longo do fuste (1=Base, 2 = 25%, 3 = 50%; 4 = 75% e 5 = 100%)

A mesma metodologia foi adotada para determinação da densidade relativa aparente do carvão vegetal, porém como o material carbonizado estava em forma de cavacos, foram medidas cinco amostras de cada pirólise e a média aritmética de cada tratamento foi considerada como a densidade do material.

4.5.2 Composição química imediata e molecular

A composição química imediata dos materiais foi determinada de acordo com os procedimentos da norma NBR 8112 (ABNT, 1986)□, sendo determinados o teor de materiais voláteis (TMV), teor de cinzas (TCz) e o teor de carbono fixo (TCF), esse último obtido por diferença e todos esses em base seca.

A quantificação de extrativos totais foi realizada conforme NBR 14853 (ABNT, 2010)□, com a sequência etanol-tolueno (1:2, 6 horas), etanol (4 horas) e água quente (1 hora). O teor de lignina foi determinado conforme a norma NBR 7989 (ABNT, 2010b)□. O teor de holocelulose foi determinado por diferença do somatório dos teores de extrativos totais, lignina e cinzas.

4.5.3 Poder calorífico

O poder calorífico superior (PCS) foi determinado utilizando um calorímetro IKA WERKE® C5000 e o procedimento conforme NBR 8633 (ABNT, 1984)□.

4.5.4 Estoque de energia (EE)

O EE foi calculado pela multiplicação da massa seca de cada compartimento com seu respectivo poder calorífico superior, conforme a expressão

$$EE = BIO * PCS \quad (5)$$

Em que: EE = Estoque de energia (Mcal); BIO = Biomassa seca do compartimento (kg); PCS = Poder calorífico superior (kcal kg⁻¹)

4.5.5 Densidade energética (DE)

A DE foi obtida pela multiplicação da densidade básica, para madeira, ou da densidade relativa aparente, para o carvão, pelo poder calorífico superior de cada material, conforme a expressão:

$$DE = D * PCS \quad (6)$$

Em que: DE é a Densidade energética (kcal m⁻³); D é a densidade básica ou densidade relativa aparente (kg m⁻³); PCS é o poder calorífico superior (kcal kg⁻¹)

4.5.6 Rendimento em carbono fixo (RCF) e rendimento energético (RE)

O RCF foi calculado para cada uma das pirólises em função da multiplicação do teor de carbono fixo do carvão vegetal e do rendimento em carvão vegetal, conforme a expressão:

$$RCF = TCF * RGCV \quad (7)$$

Em que: RCF é o rendimento em carbono fixo (%); TCF é teor de carbono fixo do carvão vegetal (%); RCV é o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%)

O RE foi calculado para cada pirólise com base na equação a seguir:

$$RE = RCV * \left(\frac{PCSc}{PCSm} \right) \quad (8)$$

Em que: RE é o Rendimento energético (%); RCV é o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); PCSc e PCSm são os poderes caloríficos superiores do carvão e da madeira, respectivamente.

4.5.7 Análise termogravimétrica

As análises termogravimétricas (TG) foram realizadas em uma balança termogravimétrica Setaram SETSYS Evolution TGA . As amostras utilizadas eram provenientes da árvore com DAP mais próximo do DAP médio de cada espécie,

composta por todos os discos da árvore para madeira e de uma amostra mista para o carvão vegetal. Foi utilizado um gradiente de temperatura iniciando na temperatura ambiente até 600 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹. O gás de arraste utilizado foi argônio com fluxo de 20 mL min⁻¹.

A primeira derivada da curva TG (DTG) foi utilizada para estabelecer a taxa da perda de massa em função do tempo e os picos característicos de degradação do material.

4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O experimento foi avaliado utilizando-se um delineamento inteiramente casualizado (DIC). Na avaliação das propriedades energéticas dos compartimentos, produção de biomassa e estoque de energia foi utilizado um esquema fatorial considerando como fontes de variação: espécie e compartimento, DAP foi utilizado como covariável para a produção de biomassa e para o estoque de energia. Na avaliação da produção e qualidade do carvão vegetal foi utilizado um esquema simples considerando apenas a espécie como fator de variação

Foi realizada a análise de variância (ANOVA), e sendo observadas diferenças significativas entre as médias aplicou-se o teste de comparação múltipla de Tukey

Na checagem dos pressupostos das ANOVAs foi feita uma inspeção visual juntamente ao teste de Bartlett para homogeneidade das variâncias e ao teste de Shapiro-Wild para normalidade. Todos os testes foram realizados ao nível de 5% de significância.

Avaliou-se o coeficiente de correlação linear simples de Pearson (r) entre as características mensuradas na madeira e no carvão.

Para realização dos testes foi utilizado o software R 3.1.2 (R CORE TEAM, 2014) com os pacotes stats, ExpDes, e Hsmi.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 BIOMASSA E ENERGIA

5.1.1 Poder calorífico e análise química imediata

Não foi observada diferença significativa para os valores médios de PCS entre as cinco espécies estudadas nos compartimentos madeira e galhos. No compartimento casca os maiores valores de PCS foram observados nas cascas de *E.benthamii* e *E. dunnii*, 3986 kcal kg⁻¹ e 4151 kcal kg⁻¹, respectivamente (Tabela 3). Enquanto *E.saligna*, *E.grandis* e *E.urograndis* apresentaram os menores valores médios, não sendo estatisticamente diferentes entre si. O PCS das folhas variou entre 5074 kcal kg⁻¹ e 5652 kcal kg⁻¹. Entre os diferentes compartimentos da árvore, o PCS apresentou os menores valores médios no compartimento casca, entre 3620 kcal kg⁻¹ e 4151 kcal kg⁻¹, e os maiores valores médios no compartimento folha, sendo que madeira e galhos apresentaram valores médios intermediários que não se diferenciaram entre esses compartimentos.

Os valores médios de PCS estão de acordo com o observado por Eloy (2015) ao avaliar o comportamento dos mesmos compartimentos de *E.grandis* em diferentes espaçamentos, além de apresentar as mesmas diferenças entre os compartimentos. Enquanto Vale (2002) avaliando 47 espécies do cerrado brasileiro observou a tendência da casca apresentar maior PCS do que a madeira, para uma mesma espécie, da mesma forma que Eloy et al. (2015a,2015b) em trabalhos com *Acacia mearnsii* e *Mimosa scabrella*. Soares et al. (2015) ao avaliar o híbrido *E.urograndis* em idades entre 3 e 7 anos encontrou valores de PCS na faixa de 4200 kcal kg⁻¹ à 4800 kcal kg⁻¹, semelhantes aos do presente trabalho. Para *E.benthamii* com 5 e 13 anos, Nones et al. (2015) encontraram para madeira valores de 4067 e 4194 kcal kg⁻¹, respectivamente. Costa (2015) para *E.dunnii* aos 7 anos de idade encontrou valores de PCS de 4484 kcal kg⁻¹. Para o uso prático da biomassa como fonte de energia apenas diferenças maiores que 300 kcal kg⁻¹ são relevantes (BRAND, 2010)

TABELA 3-VALORES MÉDIOS PARA PODER CALORÍFICO SUPERIOR, TEORES CARBONO FIXO, MATERIAIS VOLÁTEIS E CINZAS; PARA CADA MATERIAL NOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS.

Variável	Compartimento	Espécie				
		E.benthamii	E.dunnii	E.grandis	E.saligna	E.urograndis
PCS (kcal kg ⁻¹)	Madeira ^{ns}	4626 aB (1,39)	4660 aB (6,94)	4532 aB (4,65)	4661 aB (1,17)	4585 aB (2,09)
	Casca	4151 aC (6,62)	3986 abC (6,05)	3620 cC (7,02)	3838 bcC (3,34)	3672 cC (3,45)
	Folhas	5394 bA (2,42)	5652 aA (2,44)	5206 bcA (3,03)	5081 cA (1,42)	5074 cA (1,90)
	Galhos ^{ns}	4536 aB (1,08)	4566 aB (0,91)	4562 aB (2,72)	4561 aB (2,72)	4504 aB (2,35)
TCF (%)	Madeira ^{ns}	15,56 aC (3,55)	14,80 aB (4,63)	14,59 aC (4,13)	15,67 aC (4,94)	15,14 aC (2,69)
	Casca	21,83 aA (9,76)	19,95 bA (6,29)	17,65 cB (7,74)	17,12 cC (4,58)	20,86 abB (4,52)
	Folhas	20,55 cB (2,78)	20,21 cA (5,71)	20,73 bcA (6,69)	23,65 aA (1,57)	22,21 abA (2,98)
	Galhos ^{ns}	20,99 aAB (3,92)	20,12 aA (6,25)	20,23 aA (4,98)	20,89 aB (5,20)	20,74 aB (4,28)
TMV (%)	Madeira ^{ns}	84,05 aA (0,58)	84,81 aA (0,85)	85,11 aA (0,74)	84,06 aA (0,90)	84,52 aA (0,47)
	Casca	71,76 cD (2,38)	74,78 abC (1,71)	73,47 bcC (2,05)	75,88 aB (2,13)	69,35 dD (1,93)
	Folhas	75,60 aC (0,72)	75,74 aC (1,93)	74,75 abC (1,96)	71,51 cC (1,58)	73,34 bC (0,82)
	Galhos ^{ns}	77,45 aB (1,27)	78,19 aB (1,71)	78,17 aB (1,20)	76,89 aB (1,70)	77,77 aB (1,25)
TCz (%)	Madeira	0,38 aD (21,90)	0,38 aD (14,22)	0,29 abD (27,28)	0,27 bD (21,67)	0,34 abD (32,20)
	Casca	6,32 bcA (24,23)	5,26 cA (23,73)	8,86 aA (24,24)	6,98 bA (16,98)	9,78 aA (12,96)
	Folhas ^{ns}	4,17 aB (21,90)	4,04 aB (10,27)	4,51 aB (19,77)	4,83 aB (17,19)	4,44 aB (16,34)
	Galhos ^{ns}	1,55 aC (20,64)	1,68 aC (21,65)	1,59 aC (10,32)	2,20 aC (20,27)	1,70 aC (7,89)

Em que: Médias seguidas por letras minúsculas iguais na linha não diferem entre as espécies. Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na coluna não diferem entre os compartimentos, para mesma propriedade. Valores entre parênteses são o coeficiente de variação em porcentagem. ns = Não significativo para o teste de F ao nível de 5% de probabilidade.

O teor de carbono fixo médio encontrado foi menor na madeira do que nos outros três compartimentos (casca, galhos e folhas) para todas as espécies, não havendo diferença significativa entre essas, variando de 14,59% a 15,67%. O maior TCF foi encontrado nas folhas do *E.saligna* e *E.urograndis*.

O teor de materiais voláteis foi maior na madeira, e menor em casca e folhas. Para madeira não houve diferença significativa entre as médias obtidas, variando de 84,05% a 85,11%. O compartimento casca apresentou o menor TMV, sendo o menor valor o do *E.urograndis* (69,35%).

O TCz foi menor na madeira, galhos, folhas e casca; nessa ordem para todas as espécies. O compartimento casca apresentou valores de TCz variando entre 9,78% e 5,26%, para *E.urograndis* e *E.dunnii*, respectivamente; já a madeira apresentou valores de 0,27% até 0,38%.

A composição química imediata dos materiais analisados esta de acordo com o que é relatado na literatura para espécies florestais, onde a casca apresenta maiores valores de TCF e TCz em relação a madeira (BRITO e BARRICHELO, 1978; ELOY et al., 2015a, 2015b, VALE et al., 2002).

Todos os materiais avaliados apresentam potencial para combustão direta. Porém o uso de materiais com elevados TCz, como casca e folhas, pode acarretar na emissão de partículas em chaminés de caldeiras, tornando necessário o uso de equipamentos que realizem a separação entre as partículas e os gases da combustão (BARRON, 1970; BRITO e BARRICHELO, 1978). Da mesma forma, valores elevados de TCz contribuem para formação de escórias e incrustações em queimadores e trocadores de calor (PELANDA et al., 2015).

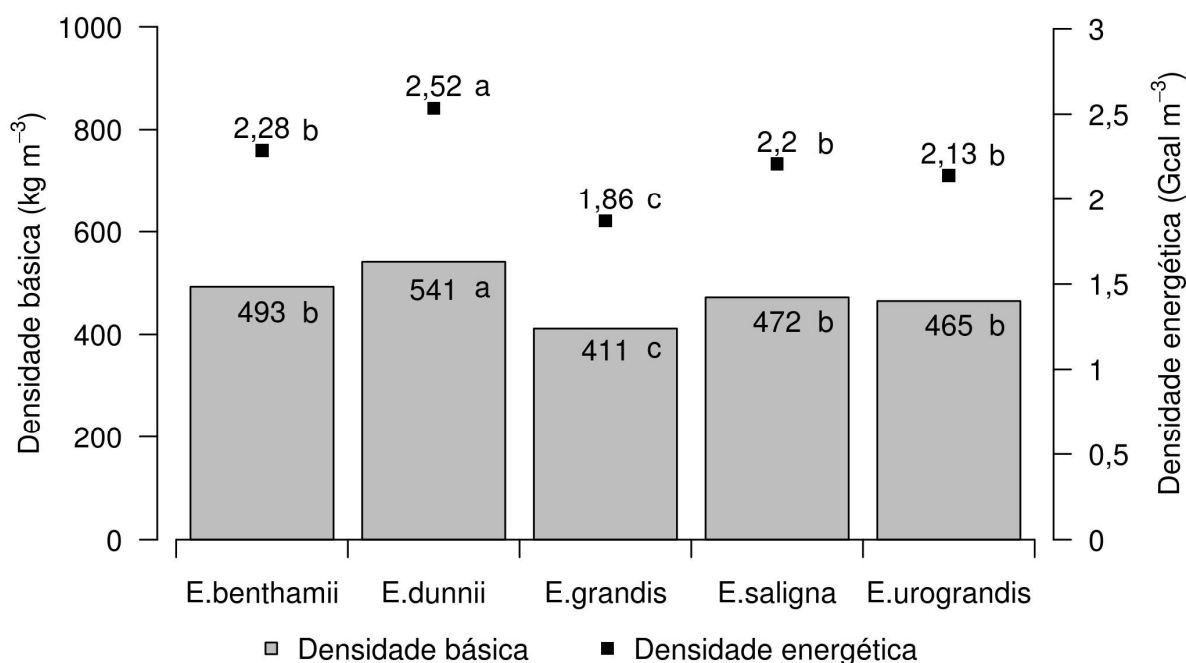
De forma geral quanto maior o TCz, menor será o PCS, dado que as cinzas são materiais inertes, portanto não participam do processo de combustão (BRAND, 2010, REIS et al., 2012). Porém ainda deve-se levar em conta as diferentes composições químicas do material orgânico, sendo que essa relação é válida quando são comparados materiais orgânicos semelhantes.

No que tange o TMV, valores mais elevados indicam um material mais reativo, ou seja, o material tem maior facilidade de queimar e também o processo de combustão será mais rápido, o que diminui o tempo de residência do combustível no combustor, contribuindo negativamente na eficiência energética (CHAVES et al., 2013).

5.1.2 Densidade básica (DB) e densidade energética (DE) da madeira

Para DB e DE as espécies apresentaram o mesmo comportamento sendo que o *E.dunnii* apresentou os maiores valores médios, 541 kg m^{-3} e $2,52 \text{ Gcal m}^{-3}$. As espécies *E.benthamii*, *E.saligna* e *E.urograndis* não apresentaram diferença significativa entre si para essas propriedades, com valores de 493 kg m^{-3} e $2,28 \text{ Gcal m}^{-3}$, 472 kg m^{-3} e $2,20 \text{ Gcal m}^{-3}$, e 462 kg m^{-3} e $2,13 \text{ Gcal m}^{-3}$, respectivamente. O *E.grandis* apresentou as menores DB e DE médios entre as espécie estudadas com valores de 411 kg m^{-3} e $1,86 \text{ Gcal m}^{-3}$ (Figura 3).

Esse comportamento para as duas propriedades é devido ao fato de não haver diferença significativa para o PCS entre as espécies, dado que a DE é resultado da multiplicação direta de PCS e DB. Para Moreira et al. (2012) a DB e o PCS variam entre espécies e indivíduos de uma mesma espécie, porém a primeira característica apresenta maior variação, concordando com os resultados encontrados.



Em que: Médias seguidas por letras minúsculas iguais não diferem entre as espécies, para a mesma propriedades

A DB é uma característica fundamental na avaliação de materiais para o uso como fonte bioenergia, porém não a única, devendo-se considerar ainda produção

de massa seca, teor de lignina e características anatômicas (PROTÁSIO et al., 2013a, PROTÁSIO et al., 2013b). Na literatura são relatados valores de DB para espécies florestais na faixa de 200 a 1080 kg m⁻³ (QUIRINO et al., 2005). Em estudo com madeiras do cerrado para uso energético foram observados valores na faixa de 200 a 780 kg m⁻³ (VALE et al., 2002).

Os valores encontrados no presente estudo são semelhantes aos encontrados por Protásio et al. (2014) ao avaliarem clones de *Eucalyptus spp.* com 3,5 e 4,5 anos de idade, que apresentaram valores de até 521 kg m⁻³. Eloy (2015) relata para *E.grandis* em diferentes espaçamentos, ao 5 anos de idade, valores na faixa 390 a 417 kg m⁻³. Protásio et al. (2013a) encontrou para clones de *E.grandis* e *E.urophylla* destinados a uso bioenergético, aos 3,5 anos de idade, valores superiores ao *E.grandis* do presente estudo, porém na mesma faixa que as demais espécies estudadas. Costa (2015) encontrou para *E.dunnii* aos 7 anos, densidade média de 535 kg m⁻³ e densidade energética de 2,39 Gcal m⁻³.

A DB apresenta a tendência de aumentar para um mesmo material com o aumento da idade (CARNEIRO et al., 2014; ELOY, 2015, PROTÁSIO et al.2014), isso devido ao aumento da espessura da parede celular e diminuição do diâmetro do lume das fibras.

Em relação a DE, a espécie *E.grandis* destaca-se negativamente, apresentando valor inferior ao relatado na literatura para a mesma espécie até mesmo em idades inferiores à do material estudado. Protásio et al. (2013a) encontraram para DE valores na faixa de 2,16 a 2,38 Gcal m⁻³; enquanto Eloy (2015) encontrou valores na faixa de 1,73 a 1,88 Gcal m⁻³, semelhantes ao presente trabalho, porém em material mais jovem.

Em trabalho com *E.benthamii*, *E.dunnii*, *E.grandis* e *E.urograndis*; Moreira et al. (2012) encontraram para DE valores de 2,23 Gcal m⁻³, 2,60 Gcal m⁻³, 2,20 Gcal m⁻³, 2,37 Gcal m⁻³; respectivamente.

5.1.3 Biomassa seca (BIO) e estoque de energia (EE)

Para BIO e o EE não houve diferença significativa entre os valores médios para os compartimentos madeira, folhas e galhos, somente o compartimento casca apresentou diferença significativa entre os valores médios para essas características

(Tabela 4). Para essas mesmas propriedades ainda foi avaliado o efeito do DAP de forma quantitativa. O DAP apresentou efeito significativo para as duas propriedades em todos os compartimentos. Para o compartimento casca houve efeito de interação entre espécie e DAP, dessa forma as propriedades da casca foram avaliadas separadamente para as espécies. Os ajustes lineares significativos são exibidos para BIO na Figura 4 e para o EE na Figura 5 .

A influência do DAP na produção de biomassa seca e no estoque de energia pode ser percebida pelo elevado coeficiente de variação em relação a média por espécie. Entre os compartimentos a madeira apresentou a maior produção de biomassa e conseqüentemente maior estoque de energia, galhos e folhas foram os compartimentos com menores.

TABELA 4-VALORES MÉDIOS PARA PRODUÇÃO DE BIOMASSA SECA E ESTOQUE DE ENERGIA ACIMA DO SOLO POR ESPÉCIE E NOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS

Variável	Compartimento	Espécie				
		<i>E. benthamii</i>	<i>E. dunnii</i>	<i>E. grandis</i>	<i>E. saligna</i>	<i>E. urograndis</i>
BIO (kg indivíduo ⁻¹)	Madeira ^{ns}	193,02 a (65,23)	206,28 a (54,78)	184,79 a (63,92)	206,26 a (59,42)	188,83 a (53,84)
	Casca	19,49 a (53,30)	13,99 ab (49,27)	10,27 b (30,63)	9,63 b (47,63)	8,08 b (36,12)
	Folhas ^{ns}	5,00 a (82,57)	7,54 a (86,29)	5,57 a (82,25)	4,59 a (91,12)	4,30 a (67,57)
	Galhos ^{ns}	7,38 a (93,70)	7,45 a (64,65)	6,45 a (99,48)	7,68 a (86,16)	5,86 a (76,20)
	Madeira ^{ns}	897,5 a (66,30)	971,3 a (57,23)	836,7 a (65,29)	964,6 a (59,83)	869,9 a (54,67)
	Casca	79,5 a (50,42)	55,1 ab (46,14)	37,2 b (31,43)	37,1 b (49,11)	21,7 b (37,63)
	Folhas ^{ns}	27,1 a (85,23)	42,8 a (87,13)	29,5 a (84,10)	23,4 a (91,34)	21,9 a (68,66)
	Galhos ^{ns}	33,4 a (93,02)	33,9 a (64,83)	29,3 a (100,03)	34,6 a (84,99)	25,8 a (76,95)

Em que: Médias seguidas por letras minúsculas iguais na linha não diferem entre as espécies. Valores entre parênteses são o coeficiente de variação em porcentagem. ns = Não significativo para o teste de F ao nível de 5% de probabilidade.

FIGURA 4 - ESTOQUE DE ENERGIA PARA OS COMPARTIMENTOS MADEIRA, CASCA, GALHO E FOLHA EM FUNÇÃO DO DAP

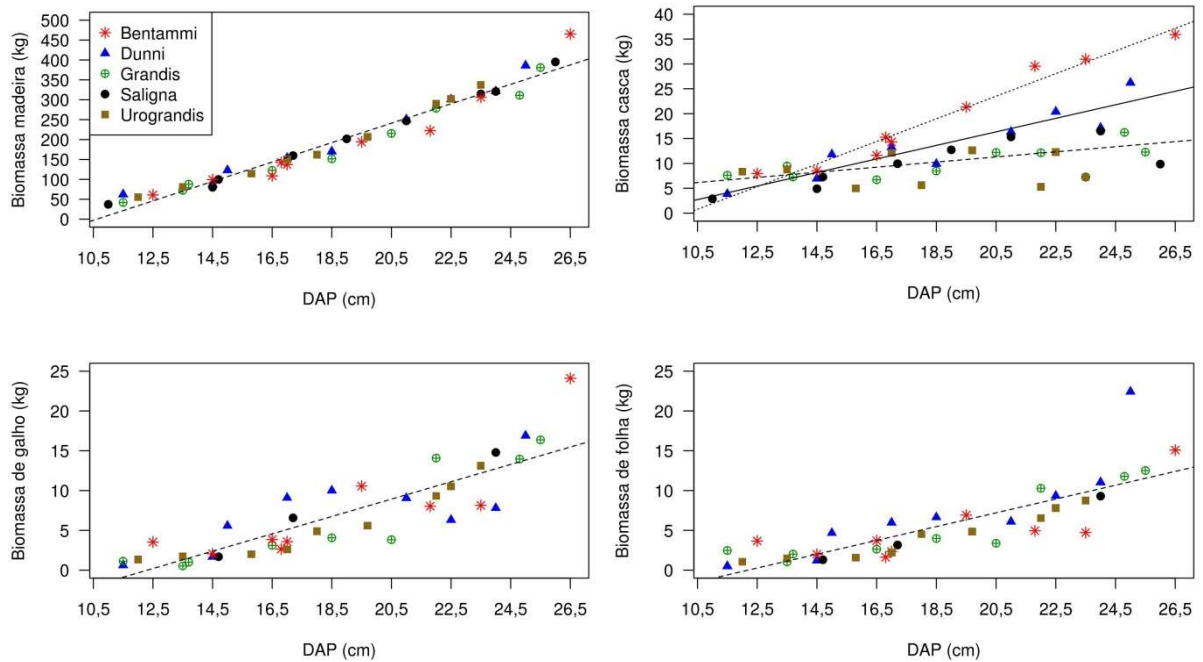
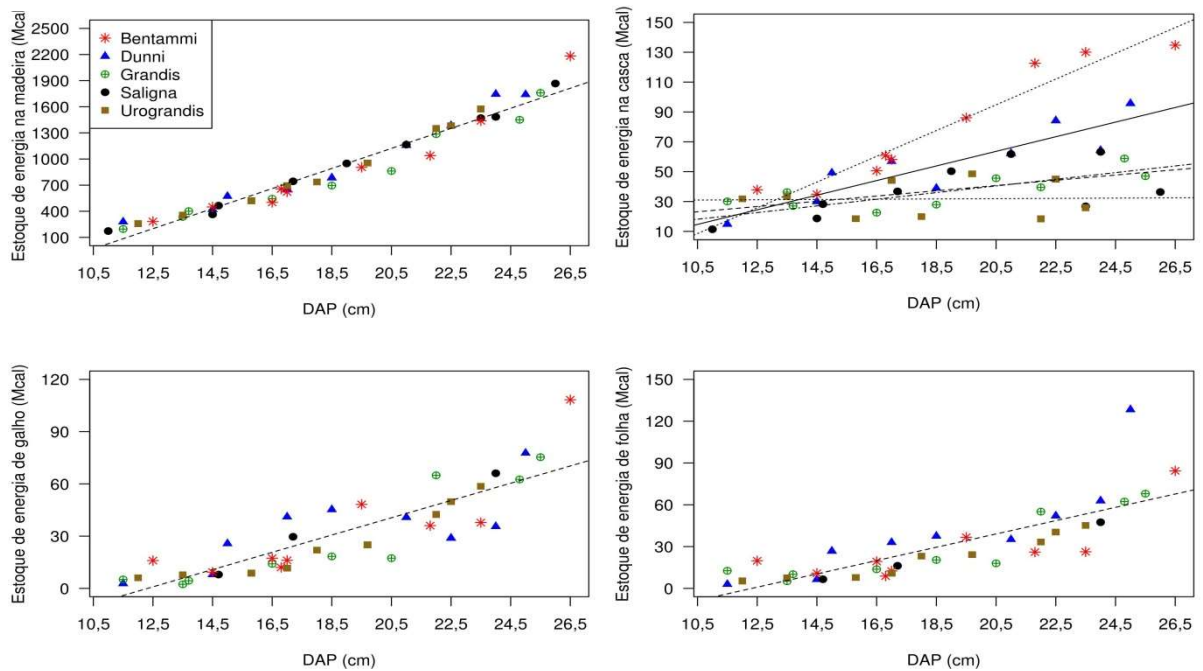


FIGURA 5 - ESTOQUE DE ENERGIA PARA OS COMPARTIMENTOS MADEIRA, CASCA, GALHO E FOLHA EM FUNÇÃO DO DAP



Ao avaliar a produção por BIO por hectare o *E.saligna* e *E.dunnii* destacam-se com uma produção de 225 Mg ha⁻¹ e 219 Mg ha⁻¹ para madeira, que também

apresentam os maiores valores de EE, 1053 Gcal ha⁻¹ e 1035 Gcal ha⁻¹. Na casca os maiores valores para essas mesmas duas propriedades foram observados para o *E.benthamii*, 20,77 Mg ha⁻¹ e 84,75 Gcal ha⁻¹, isso deve-se ao alto percentual de casca dessa espécie em relação as demais. Para o compartimento folhas os maiores valores foram observados no *E.dunnii*, com 8,03 Mg ha⁻¹ e 45,62 Gcal ha⁻¹. No compartimento galhos as espécies *E.dunnii*, *E.grandis* e *E.saligna* apresentaram os maiores valores, para BIO na faixa de 7,51 a 8,38 Mg ha⁻¹ ; e para EE 34,13 a 37,78 Gcal ha⁻¹ (Tabela 5).

Eloy (2015) relata que o aumento do espaçamento de plantio tem efeito negativo na produção de biomassa, porém Muller et al. (2005) citam que com o tempo a quantidade de madeira tende a se igualar em sítios com diferentes espaçamentos, isso ocorre devido ao fato de que em sítios mais densos a estagnação do crescimento acontece em idades mais jovens.

TABELA 5 - PRODUÇÃO DE BIOMASSA SECA E ESTOQUE DE ENERGIA POR HECTARE

Variável	Compartimento	Espécie					
		<i>E. benthamii</i>	<i>E. dunnii</i>	<i>E. grandis</i>	<i>E. saligna</i>	<i>E. urograndis</i>	
BIO (Mg ha ⁻¹)	Madeira	205 (85,8)	219 (87,7)	215 (89,2)	225 (90,4)	205 (91,9)	
	Casca	20,7 (8,7)	14,9 (5,9)	11,9 (5,0)	10,5 (4,2)	8,7 (3,9)	
	Folhas	5,3 (2,2)	8,0 (3,2)	6,4 (2,7)	5,0 (2,0)	3,9 (1,8)	
	Galhos	7,8 (3,3)	7,9 (3,2)	7,5 (3,1)	8,3 (3,4)	5,3 (2,4)	
	TOTAL	239	250	241	249	223	
	EE (Gcal ha ⁻¹)	Madeira	956 (86,5)	1035 (88,1)	974 (89,7)	1053 (91,0)	944 (93,4)
		Casca	84,7 (7,7)	58,7 (5,0)	43,3 (4,0)	40,5 (3,5)	23,5 (2,3)
		Folhas	28,8 (2,6)	45,6 (3,9)	34,3 (3,2)	25,5 (2,2)	19,9 (2,0)
		Galhos	35,6 (3,2)	36,1 (3,1)	34,1 (3,1)	37,7 (3,3)	23,5 (2,3)
		TOTAL	1105	1175	1086	1157	1011

Em que: Valores entre parênteses representam a participação percentual do compartimento em relação ao total por espécie.

A produção de massa seca encontrada no presente trabalho foi inferior a valores relatados na literatura. Brito et al (1983) encontraram valores para *E.saligna*, com 10 anos de idade, de 405,6 Mg ha⁻¹ e para *E.grandis* de 518,2 Mg ha⁻¹.

Os fatores que influenciam a produção de biomassa são diversos, podendo ser genéticos, edafoclimáticos e de manejo, todavia a variação da produtividade das diversas espécies do gênero *Eucalyptus* é associada principalmente ao tipo de solo, dado que os nutrientes disponíveis neste podem variar em uma ampla faixa de valores (BARROS; COMERFORD, 2002; GUIMARAES et al., 2015).

Em trabalho utilizando *E.benthamii* com idades de um, dois, três e quatro anos; Silva et al. (2004) observaram o aumento da alocação da biomassa nos compartimentos madeira e casca, e conseqüentemente diminuição dos outros dois compartimentos (galhos e folhas), com o aumento da idade; os autores observaram aos quatro anos de idade valores de 70,4%, 7,3%, 15,2% e 7,1% para madeira, casca, galhos e folhas; respectivamente. Para o presente trabalho, a BIO e o EE por hectare apresentaram valores médios superiores a 220 Mg e 1000 Gcal para todas as espécies.

Os ajustes lineares para BIO e EE apresentaram regressões significativas para os compartimentos madeira, folha e galhos, independente das espécies. No compartimento casca houve ajuste somente para *E.benthamii* e *E.dunnii*, demonstrando que para as demais espécies o DAP não influenciou nessas variáveis. Os melhores ajustes foram encontrados para o compartimento madeira (R² 0,96 e 0,95) , enquanto o compartimento folha apresentou os os menores ajustes (R² 0,66 e 0,64) (Tabela 6).

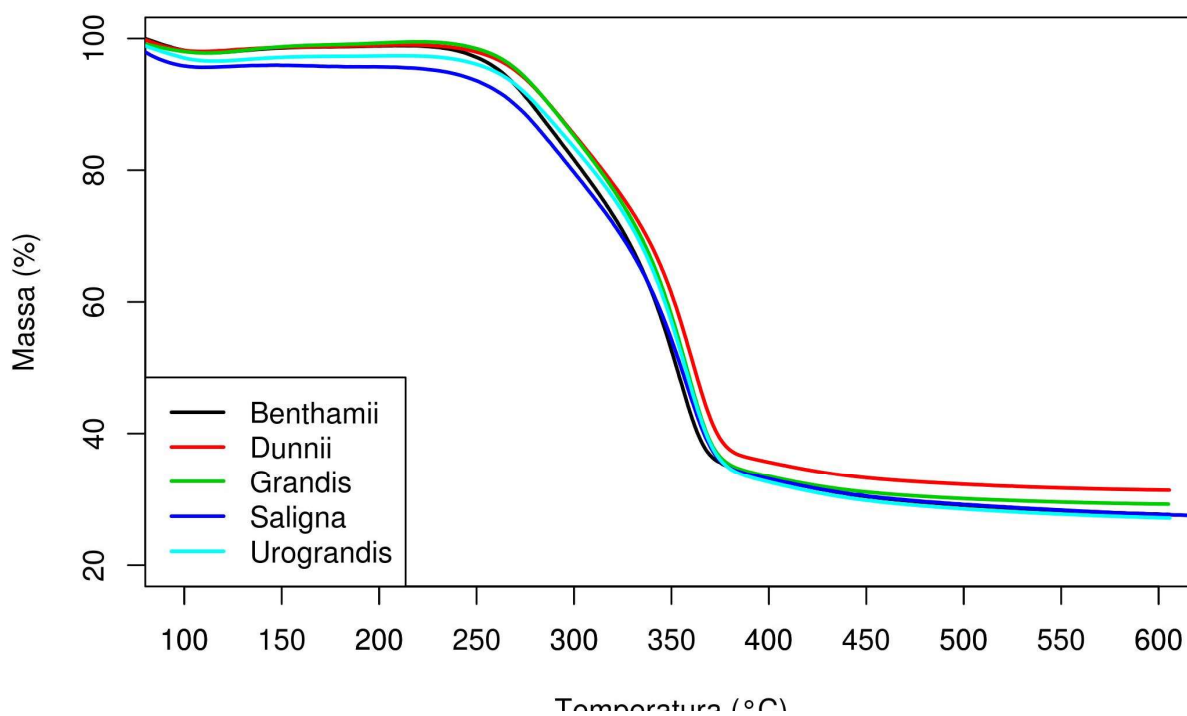
TABELA 6-EQUAÇÕES AJUSTADAS PARA PRODUÇÃO DE BIOMASSA (BIO) E PARA O ESTOQUE DE ENERGIA (EE), ÍNDICES DE AJUSTE R² E S_{yx}.

Compartimento	Equação	R _{aj} ²	S _{xy}
Madeira	BIO = -259,1 + 24,4DAP	0,96	23,32
	EE = -1239,7 + 115,2 DAP	0,95	120,3
Casca	BIO _{benthamii} = -23,08 + 2,27DAP	0,96	2,05
	BIO _{dunnii} = -11,56 + 1,36DAP	0,82	2,89
	EE _{benthamii} = -82,01 + 8,62DAP	0,92	11,05
	EE _{dunnii} = -36,68 + 4,89DAP	0,77	12,14
Folha	BIO = -10,56 + 0,87DAP	0,66	2,66
	EE = -58,80 + 0,58DAP	0,64	15,54
Galhos	BIO = -13,42 + 1,09DAP	0,73	2,86
	EE = -61,05 + 4,95DAP	0,73	12,92

Trugilho et al. (2015) ao avaliar a densidade básica da madeira e a produção de biomassa seca encontraram relações positivas para essas propriedades e a classe diamétrica dos materiais por eles avaliados, de forma a reforçar os resultados encontrados no presente trabalho.

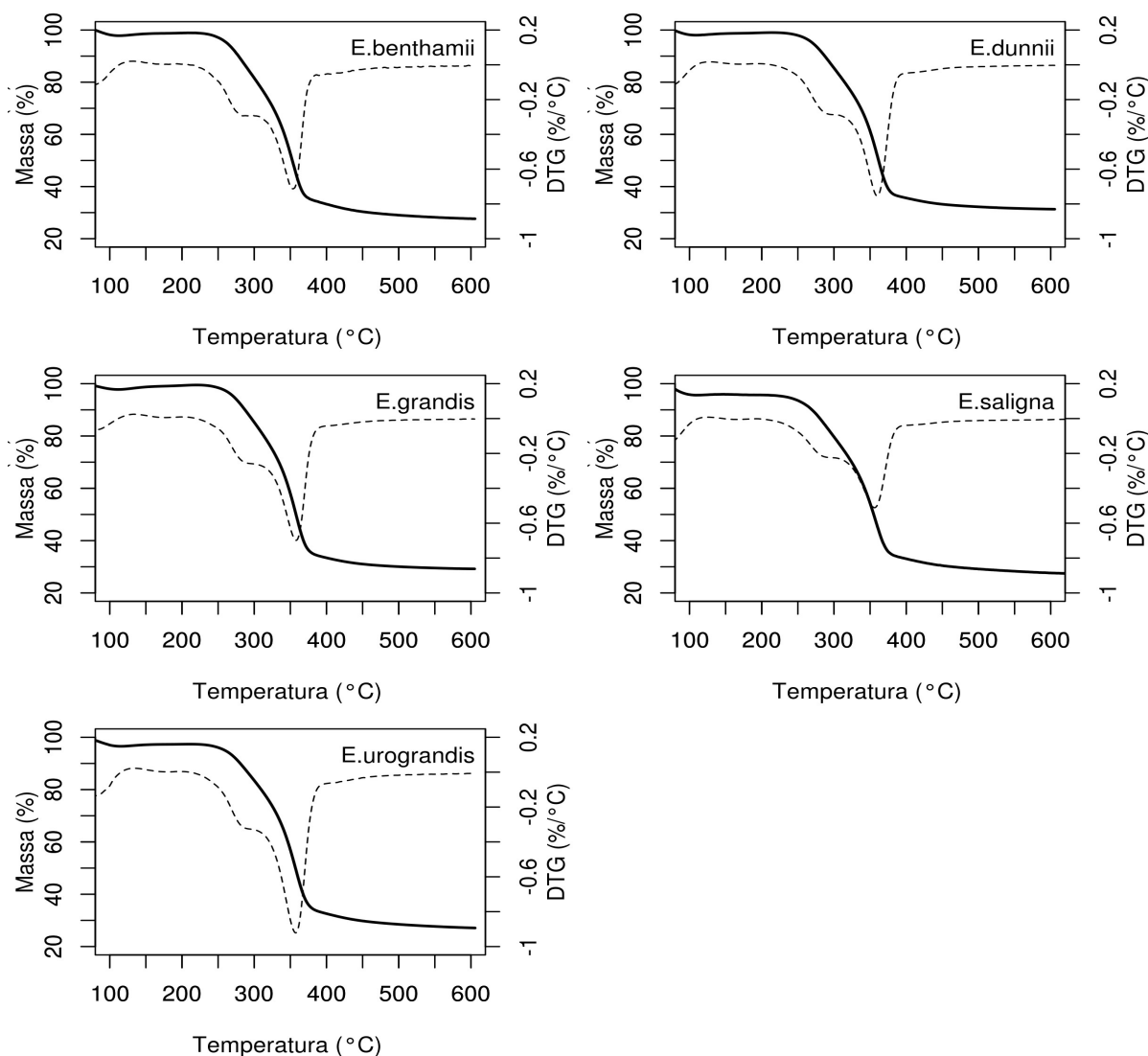
5.2 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DA MADEIRA

O perfil de degradação térmica dos materiais estudados foi semelhante. O *E.dunnii* foi o material que apresentou maior massa residual no final, enquanto *E.saligna* e *E.urograndis* apresentaram as menores (Figura 6).



Por meio da primeira derivada da perda de massa (DTG) foi possível observar dois eventos de degradação. O primeiro evento acontecendo entre 250°C e 300°C, sendo essa faixa referente principalmente à degradação das hemiceluloses (KIM et al.,2006). O segundo evento ocorrendo em 350°C para todos os materiais é referente a degradação da celulose (GANI; NARUSE, 2007) (Figura 7).

FIGURA 7 - PERFIL DE PERDA DE MASSA (TGA) E PRIMEIRA DERIVADA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA PARA AS CINCO ESPÉCIES ESTUDADAS



Os eventos de degradação dos constituintes da madeira não ocorrem de forma isolada, a lignina inicia a perda de massa em 150°C, indo até 900°C, porém com uma taxa inferior aos demais componentes (BURHENNE et al., 2013), dessa forma após os eventos de degradação citados anteriormente ainda é observada a perda de massa para todos os materiais.

A espécie *E.dunnii* foi a que apresentou a menor perda de massa, seguida pelo *E.grandis*, as espécies *E.benthamii*, *E.saligna* e *E.urograndis* não apresentaram diferença em relação a massa final. Santos et al. (2012) relatam ser possível inferir a qualidade do carvão vegetal utilizando a análise termogravimétrica como subsídio. Os mesmos autores ainda sugerem que perfil de degradação da madeira está ligado ao teor de lignina e a relação siringil/guaicil, que define a proporção dos precursores

da molécula de lignina.

5.3 PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

Em relação a composição química molecular da madeira, foi observado efeito significativo da espécie para o teor de extrativos totais, teor de lignina e teor de holocelulose. O *E.benthamii* apresentou o maior teor de extrativos totais e maior teor de lignina, 3,69% e 29,27%, respectivamente, não apresentando diferença significativa para *E.dunnii* e *E.saligna* para a primeira e para o *E.grandis* e *E.saligna* para a segunda. O *E.urograndis* foi o material que apresentou maior teor de holocelulose (72,55%) (Tabela 7).

TABELA 7 - VALORES MÉDIOS PARA TEORES DE EXTRATIVOS TOTAIS, LIGNINA E HOLOCELULOSE PARA A MADEIRA

Variável	Espécie				
	<i>E. benthamii</i>	<i>E. dunnii</i>	<i>E. grandis</i>	<i>E. saligna</i>	<i>E. urograndis</i>
Extrativos totais (%)	3,69 a (28,07)	3,21 a (61,63)	1,20 b (12,84)	3,14 a (26,64)	1,27 b (26,82)
Lignina (%)	29,27 a (9,13)	25,99 b (7,62)	26,60 ab (8,13)	26,62 ab (7,05)	26,16 b (6,74)
Holocelulose (%)	67,02 b (4,92)	70,79 a (2,58)	72,19 a (3,14)	70,22 a (2,32)	72,55 a (2,46)

Em que: Médias seguidas por letras minúsculas iguais na linha não diferem entre as espécies. Valores entre parênteses são o coeficiente de variação em porcentagem.

Madeiras com teores de holocelulose superiores apresentam a tendência de diminuir o rendimento em carvão vegetal (PROTÁSIO et al., 2012). Esse fato está associado a menor estabilidade térmica que as hemiceluloses e a celulose apresentam em relação a lignina (RAAD; PINHEIRO; YOSHIDA, 2006). Valores menores para os teores de holocelulose estão associados a valores maiores para o teor de lignina, dado que a primeira é calculada por diferença em relação a segunda, resultado corroborado por Vale et al. (2010) e Costa et al (2014).

Os resultados do presente trabalho diferem dos encontrados por Costa et al. (2014) para clones de *E.urograndis*, com idade entre 3 e 7 anos, que apresentaram valores inferiores a 22% para lignina e entre 8% e 10% para extrativos totais. Santos et al (2014) estudando esse mesmo híbrido aos 7 anos de idade encontraram valores de 5% para extrativos totais e 32% para lignina. Ainda em trabalho com

esse híbrido, porém próximo aos 5 anos de idade, Oliveira et al. (2012) encontraram valores máximos de 2,29% para extrativos totais e valores para o teor de lignina superiores a 30%.

Ao estudar clones de *E.grandis* e *E.saligna* aos 7 anos de idade Trugilho et al. (2001) encontraram para lignina total valores de 29,17% a 33,43% para o primeiro e 31,10% e 31,81% para o segundo; em relação aos extrativos totais os clones apresentaram valores entre 4,87% e 7,61%.

Madeiras com baixo teor de extrativos totais e lignina e altos teores de holocelulose são indicados para a produção de polpa celulósica, enquanto madeiras com alto teor de lignina, baixo teor de cinzas e holocelulose são mais indicadas para produção de lenha e carvão vegetal (GOMIDE et al., 2010; PROTÁSIO et al., 2012).

Os cinco materiais avaliados, no que tange a composição química macromolecular, apresentam potencial mediano como biocombustível, uma vez que apresentaram teores de lignina inferiores aos encontrados na literatura para materiais ideais com esse fim.

Na Tabela 8 são observados os valores médios para as características do carvão vegetal. Não foi observado efeito significativo da espécie para o PCS e TCF do carvão vegetal. O PCS variou na faixa de 7603 kcal kg⁻¹ a 7475 kcal kg⁻¹, enquanto o TCF variou entre 78,56% e 75,95%. Em relação ao TMV o *E.grandis* e o *E.saligna* destacaram-se com os valores mais elevados, enquanto o *E.dunnii* foi a espécie que apresentou o valor mais baixo. No que diz respeito ao TCz o carvão vegetal de *E.dunnii* apresentou o maior valor, enquanto o *E.saligna* apresentou o menor.

A pouca variação entre as características dos carvões vegetais avaliados está ligada a baixa influência da madeira nessas propriedades e tem explicação no fato da temperatura de final carbonização ter sido constante, resultado também encontrado por Protásio et al. (2013a, 2014).

Os valores encontrados para composição química imediata da madeira estão de acordo com os encontrados por Soares et al (2014) para *E.urograndis* e Protásio et al. (2014) para *Eucalyptus spp*, os valores de PCS foram superiores aos encontrados pelos primeiros e similares aos encontrados pelos outros. Em trabalho com *E.urophylla* de 7 anos de idade, Reis et al. (2012) encontraram valores de TCz inferiores a 0,81% e TMV máximo de 74,46%.

TABELA 8-VALORES MÉDIOS PARA PODER CALORÍFICO SUPERIOR, PODER CALORÍFICO INFERIOR, TEORES DE CARBONO FIXO, MATERIAIS VOLÁTEIS E CINZAS, DENSIDADE RELATIVA APARENTE E DENSIDADE ENERGÉTICA DO CARVÃO POR MATERIAL

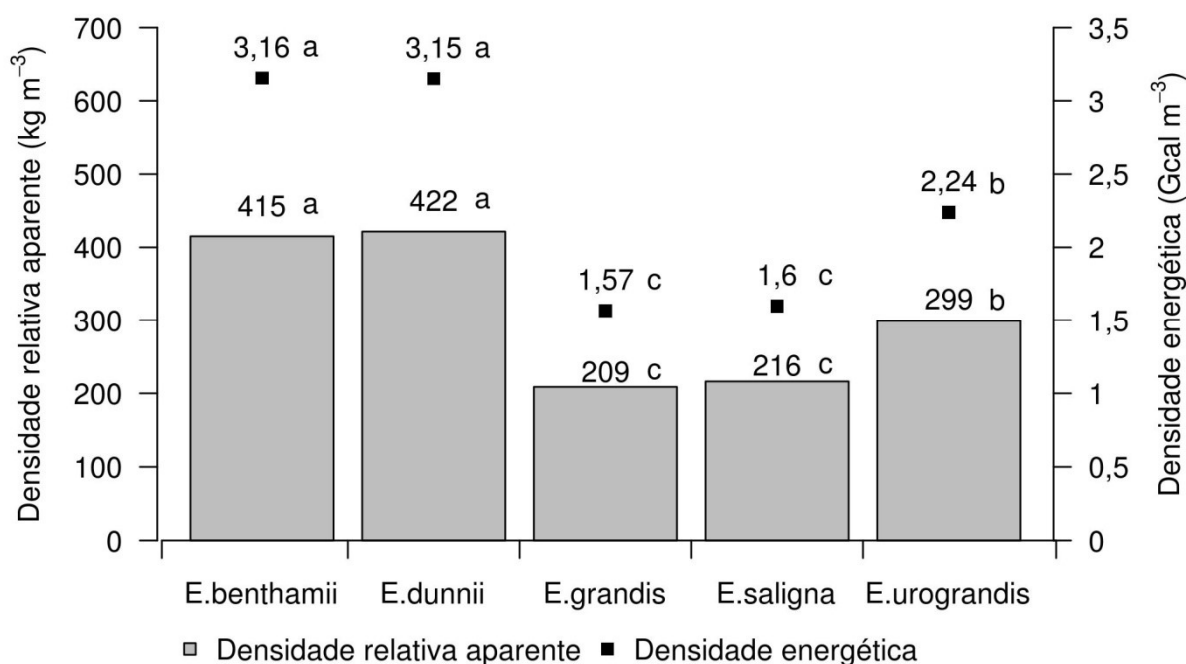
Variável	Espécie				
	<i>E. benthamii</i>	<i>E. dunzii</i>	<i>E. grandis</i>	<i>E. saligna</i>	<i>E. urograndis</i>
PCS ^{ns}	7603 a (1,42)	7475 a (3,24)	7505 a (2,90)	7395 a (1,95)	7490 a (2,45)
TCF ^{ns}	77,80 a (2,74)	78,56 a (1,95)	76,59 a (4,34)	75,95 a (1,48)	78,06 a (0,93)
TMV	21,15 ab (10,50)	19,78 b (6,89)	22,21 a (14,95)	23,21 a (5,47)	20,92 ab (3,68)
TCz	1,04 b (18,71)	1,65 a (37,60)	1,19 ab (41,29)	0,83 b (45,26)	1,01 b (31,31)

Em que: Médias seguidas por letras minúsculas iguais na linha não diferem entre as espécies. Valores entre parênteses são o coeficiente de variação em porcentagem. ns = Não significativo para o teste de F ao nível de 5% de probabilidade.

Os valores de TCF maiores que 75%, aliados aos baixos valores de TCz, qualificam as espécies como potenciais para o uso como agente redutor no setor siderúrgico (PROTÁSIO et al., 2014). A similaridades entre o PCS dos materiais esta relacionado com a similaridade do TCF, uma vez que o PCS é dependente direto do TCF (REIS et al.,2012, VALE et al. 2002). O TCz do carvão vegetal utilizado na siderurgia pode afetar a qualidade do aço, resultando em trincas e fissuras nas ligas metálicas (VITAL; CARNEIRO; PEREIRA, 2013)

Na Figura 8 são apresentados os valores médios de densidade relativa aparente e densidade energética para o carvão vegetal.

FIGURA 8 - VALORES MÉDIOS PARA DENSIDADE RELATIVA APARENTE E DENSIDADE ENERGÉTICA DO CARVÃO VEGETAL

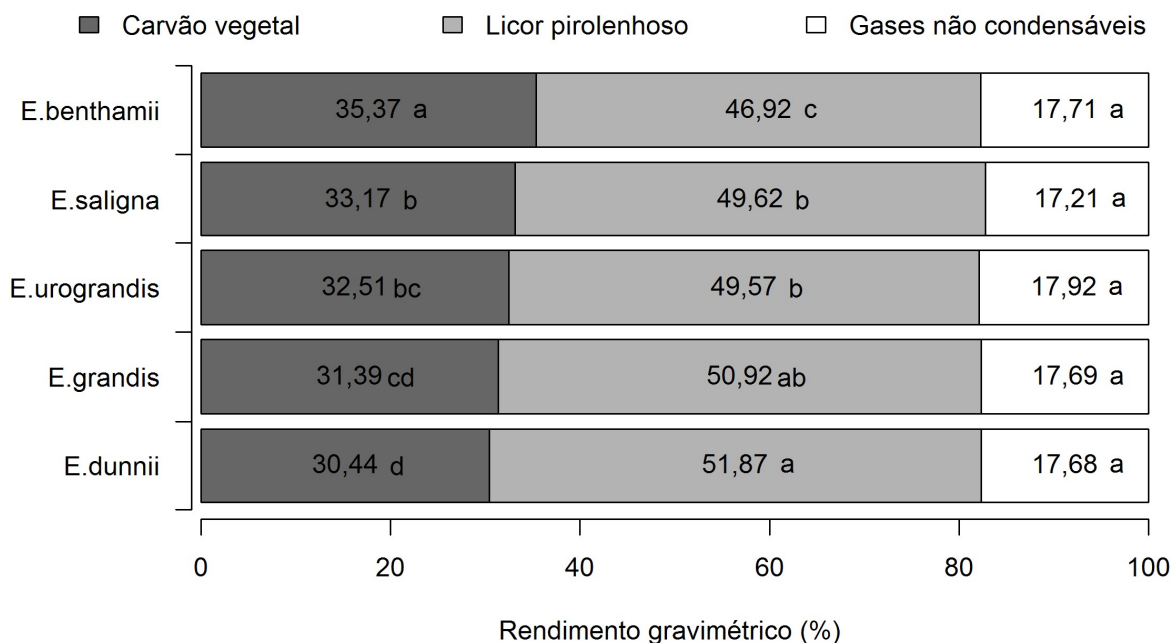


Em que: Médias seguidas por letras minúsculas iguais não diferem entre as espécies, para a mesma propriedade.

O comportamento da densidade relativa aparente do carvão vegetal foi semelhante ao comportamento da densidade básica da madeira, esse fato é confirmado por Vale et al. (2010) e Protásio et al. (2013a). Foi observada pouca redução na densidade do carvão vegetal de *E.benthamii* e *E.dunnii*, em relação à madeira, esse fato pode estar ligado com o teores de extrativos totais superiores nessas espécies quando comparada as demais (COSTA et al., 2014).

Foi observado efeito significativo da espécie para RCV e RLP, enquanto para o RG esse efeito não observado (Figura 9). O *E.benthamii* foi a espécie que apresentou maior RCV e menor RLP, comportamento contrário do *E.dunnii* que apresentou menor RCV e maior RLP.

FIGURA 9 - RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO EM CARVÃO VEGETAL, EM LICOR PIROLENHOSO E EM GASES NÃO CONDENSÁVEIS



Em que: Médias seguidas por letras minúsculas iguais não diferem entre as espécies, para a mesma propriedades

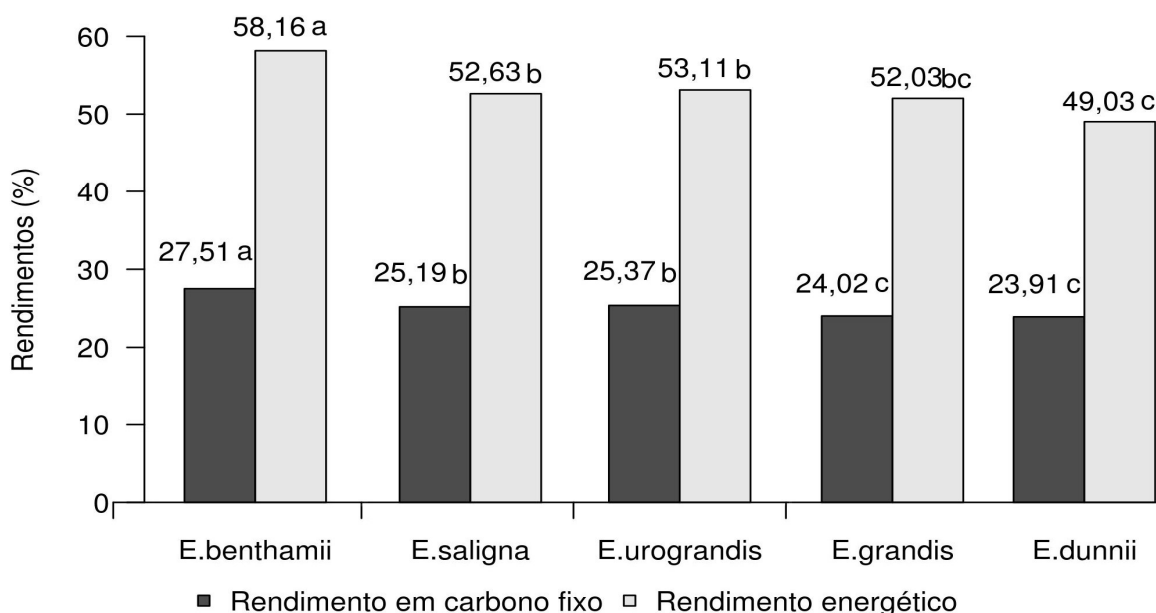
Maiores valores em RCV são melhores uma vez que o rendimento do processo aumenta, sendo maior o aproveitamento da madeira em fornos de carbonização e maior a quantidade de produto final (NEVES et al, 2011). De acordo com Protásio et al. (2013a) espécies com maior RLP e menores RG são vantajosas ambientalmente, contribuindo com uma menor emissão de gases poluentes.

Nones et al. (2015) encontraram valores de RCV para *E.benthamii* de 34% e 36%, para 5 e 13 anos de idade, respectivamente. Esses valores são semelhantes aos encontrados nesse trabalho. Já Lima et al. (2007) estudando essa mesma espécie, porém com 6 anos de idade, observaram RCV de 34,86%, apesar ser ligeiramente inferior vale destacar que nesse trabalho a temperatura de final de carbonização foi de 500°C. Para o híbrido *E.urograndis*, Olivera et al. (2012) encontraram valores de 33,5% para RCV, 38% para RLP e 28,5% para RG.

Alguns constituintes químicos presentes nos extrativos totais da madeira podem colaborar com a estabilidade térmica da madeira, de forma que proporcionam um aumento no rendimento em carvão vegetal (Santos et al., 2011).

Ao analisar o RCF e o RE é possível observar que mais uma vez a espécie *E.benthamii* apresentou os maiores valores e o *E.dunnii* apresentou os menores valores, juntamente a espécie *E.grandis* (Figura 10). Uma vez que não houve

diferença significativa para o PCS e TCF do carvão entre as espécies o RCV foi a propriedade preponderante na diferenciação entre espécies para RCF e RE, dado que essas são relações diretas das anteriores.



Em que: Médias seguidas por letras minúsculas iguais não diferem entre as espécies, para a mesma propriedade

O RCF representa a quantidade de carbono presente na madeira e que fica retida no carvão vegetal, portanto é influenciado pelos componentes elementares presentes na biomassa (ASSIS et al., 2012), dessa forma, biomassas com valores superiores de RCF são aquelas que mais retém carbono, propriedade essa que é desejável em biorredutores.

Os valores encontrados neste trabalho são semelhantes aos encontrados por Neves et al. (2011), Assis et al. (2012) e Protásio et al. (2013a), com exceção das espécies *E.dunni* e *E.grandis* que apresentaram de RCF inferiores aos relatados por esses autores.

5.4 CORRELAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA E DO CARVÃO

Para as correlações entre as propriedades da madeira (Tabela 9), destaca-se aqui as correlações positivas para o teor de extrativos totais com o TCF_m, Db e DE_m, e negativas para teor de holocelulose com o poder calorífico superior.

TABELA 9 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE AS PROPRIEDADES DA MADEIRA

	PCS _m	TMV _m	TCz _m	TCF _m	Db	DE _m	EXT	LIG
TMV _m	-0,28							
TCz _m	0,07	-0,06						
TCF _m	0,27	-0,99	-0,07					
Db	0,09	-0,21	0,18	0,18				
DE _m	0,29	-0,26	0,22	0,23	0,94			
EXT	0,23	-0,36	0,19	0,34	0,44	0,44		
LIG	0,24	-0,06	-0,15	0,08	0,03	0,07	0,12	
HOLO	-0,31	0,24	0,03	-0,24	-0,24	-0,27	-0,60	-0,86

Em que: PCS_m = Poder calorífico superior da madeira; TMV_m = Teor de materiais voláteis da madeira; TCz_m = Teor de cinzas da madeira, TCF_m: Teor de carbono Fixo da madeira, Db= Densidade básica da madeira; DE_m = Densidade energética da madeira; EXT = Teor de extrativos totais, LIG = Teor de lignina; HOLO = Teor de holocelulose.

Vale et al. (2010) estudando as correlações das propriedades de madeiras do cerrado, encontraram para teor de extrativos totais e densidade básica correlação negativa ($r=-0,34$), porém não significativa, e correlação positiva de densidade básica e teor de lignina ($r=0,86$), altamente significativa. A correlação da densidade básica com o teor de lignina ocorre quando o aumento da densidade é devido à redução da largura do lume, porém o aumento da densidade pode ser decorrente do aumento na espessura da camada S₂ da parede celular, sendo que a correlação pode não ocorrer ou ser negativa. (VITAL; CARNEIRO; PEREIRA, 2013)

Em trabalho com *E.benthamii*, Lima, Silva e Lavoranti (2011) e Silva et al., (2015) encontraram correlação entre densidade energética da madeira e poder calorífico superior ($r=0,76$) e ($r=0,57$), resultado não encontrado no presente trabalho, apesar da primeira variável ser calculada em função da segunda.

Para as correlações entre as propriedades do carvão vegetal (Tabela 10) podem ser destacadas as correlações entre o poder calorífico superior e teor de carbono fixo; além da correlação do rendimento em carvão vegetal com rendimento em licor pirolenhoso, rendimento em carbono fixo e rendimento energético.

O poder calorífico superior do carvão vegetal é influenciado positivamente pelo teor de carbono fixo e negativamente pelo teor de materiais voláteis, a relação entre as duas últimas é oposta dado que o teor de carbono fixo é calculado por diferença, utilizando o teor de materiais voláteis e o teor de cinzas, e esse é geralmente inferior à 1,5% (Reis et al., 2012; COSTA et al., 2014).

TABELA 10 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE AS PROPRIEDADES DO CARVÃO VEGETAL

	RCV	RLP	RG	PCS _c	TMV _c	TCF _c	TCz _c	DRA	DE _c	RCF
RLP	-0,95									
RG	0,04	-0,35								
PCS _c	0,07	-0,08	0,07							
TMV _c	0,35	-0,27	-0,18	-0,45						
TCF _c	-0,30	0,23	0,15	0,50	-0,96					
TCz _c	-0,26	0,19	0,16	-0,12	-0,33	0,09				
DRA	0,13	-0,17	0,14	0,20	-0,40	0,34	0,31			
DE _c	0,14	-0,18	0,15	0,28	-0,43	0,37	0,29	0,99		
RCF	0,90	-0,87	0,11	0,32	-0,02	0,07	-0,21	0,31	0,33	
RE	0,83	-0,80	0,06	0,29	0,12	-0,05	-0,28	0,13	0,15	0,78

Em que: RCV = Rendimento gravimétrico em carvão vegetal; RLP = Rendimento gravimétrico em licor pirolenhoso; RG = Rendimento gravimétrico em gases não condensáveis; PCS_c = Poder calorífico superior do carvão; TMV_c = Teor de materiais voláteis do carvão; TCz_c = Teor de cinzas do carvão, TCF_c: Teor de carbono fixo do carvão, DRA= Densidade relativa aparente; DE_c = Densidade energética do carvão; RCF = Rendimento em carbono fixo; RE = Rendimento energético. Valores em negrito são significativos a 5% de probabilidade.

Na Tabela 11 são apresentadas as correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal. Entre as propriedades da madeira e carvão vegetal foram observadas correlações significativas para o rendimento em carvão vegetal com teor de carbono fixo da madeira e com o teor de lignina, que foram positivas, e com o teor de materiais voláteis e holocelulose, que foram negativas. Dessa forma para produção de carvão vegetal são desejadas madeiras com maior teor de lignina e carbono fixo superior, para que haja maior rendimento em carvão vegetal.

TABELA 11 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DE PEARSON ENTRE AS PROPRIEDADES DA MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL

	PCS _m	TMV _m	TCz _m	TCF _m	Db	DE _m	EXT	LIG	HOLO
RCV	0,26	-0,56	0,06	0,55	-0,04	-0,05	0,29	0,38	-0,45
RLP	-0,18	0,52	-0,15	-0,50	0,08	0,08	-0,27	-0,32	0,39
RG	-0,20	0,01	0,29	-0,04	-0,13	-0,10	-0,01	-0,12	0,10
PCS _c	0,07	0,01	0,05	-0,02	0,07	0,07	0,13	0,36	-0,36
TMV _c	0,31	-0,33	-0,33	0,37	-0,11	-0,10	0,04	0,07	-0,08
TCF _c	-0,30	0,30	0,24	-0,33	0,07	0,07	0,02	-0,04	0,02
TCz _c	-0,12	0,16	0,39	-0,21	0,15	0,16	-0,27	-0,12	0,23
DRA	0,00	-0,10	0,52	0,04	0,73	0,67	0,43	0,20	-0,38
DE _c	0,00	-0,11	0,51	0,04	0,72	0,66	0,44	0,22	-0,40
RCF	0,31	-0,47	0,21	0,44	0,01	0,04	0,33	0,38	-0,48
RE	-0,14	-0,33	-0,02	0,33	-0,15	-0,28	0,18	0,36	-0,39

Em que: PCS_m = Poder calorífico superior da madeira; TMV_m = Teor de materiais voláteis da madeira; TCz_m = Teor de cinzas da madeira, TCF_m: Teor de carbono Fixo da madeira, Db= Densidade básica da madeira; DE_m = Densidade energética da madeira; EXT = Teor de extrativos totais, LIG = Teor de lignina; HOLO = Teor de holocelulose; RCV = Rendimento gravimétrico em carvão vegetal; RLP = Rendimento gravimétrico em licor pirolenhoso; RG = Rendimento gravimétrico em gases não condensáveis; PCS_c = Poder calorífico superior do carvão; TMV_c = Teor de materiais voláteis do carvão; TCz_c = Teor de cinzas do carvão, TCF_c: Teor de carbono fixo do carvão, DRA= Densidade relativa aparente; DE_c = Densidade energética do carvão; RCF = Rendimento em carbono fixo; RE = Rendimento energético. Valores em negrito são significativos a 5% de probabilidade.

Santos et al. (2011) ao estudarem as correlações entre as propriedades da madeira e do carvão para diferentes clones de *E.urograndis* observou variação das correlações para os diferentes materiais genéticos estudados. Esses mesmo autores não observaram correlação entre as propriedades químicas da madeira e os rendimentos em carvão vegetal e licor pirolenhoso, diferente do encontrado no presente trabalho e por Medeiros Neto, Oliveira e Paes (2014) e Protásio et al. (2012).

As correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal são importantes na seleção da madeira e na decisão do manejo das árvores para a produção de energia e carvão vegetal, porém Vital, Carneiro e Pereira (2013) destacam que os resultados encontrados na literatura são conflitantes.

6 CONCLUSÕES

As cinco espécies estudadas tem potencial para uso como biocombustível. Para a combustão direta são recomendadas as espécies na seguinte ordem: *E.dunnii*, *E.saligna*, *E.benthamii*, *E.grandis* e *E.urograndis*. Para a produção de carvão vegetal, recomenda-se as espécies na seguinte ordem: *E.benthamii*, *E.saligna*, *E.urograndis*, *E.grandis* e *E.dunnii*.

Em relação aos compartimentos da árvore, madeira e galhos são mais recomendados para o uso em combustão direta, pois apresentam poder calorífico intermediário e menor teor de cinzas em relação aos compartimentos casca e folhas. A produção de biomassa e o estoque de energia são maiores na madeira, sendo folhas e galhos responsáveis, por no máximo 6% do estoque de energia.

Não há variações expressivas entre as cinco espécies estudadas em relação as análises térmicas realizadas (TG e DTG), de forma que são identificados dois eventos de degradação distintos em todos os materiais

Quanto a qualidade do carvão vegetal, não há diferenças nas características de qualidade do carvão, porém a espécie *E.benthamii* destaca-se devido ao rendimento em carvão vegetal superior apresentado em relação as demais espécies, o que acarreta em maior rendimento energético e rendimento em carbono fixo.

Sobre as correlações entre as propriedades, a composição macromolecular e a densidade básica da madeira são importantes para determinação da qualidade do carvão vegetal. Os rendimentos em carvão e em licor pirolenhoso apresentam correlação com a composição da madeira, enquanto o rendimento em gases não condensáveis não apresenta correlação com o madeira.

O presente trabalho serve como subsídio para o melhor aproveitamento dos plantios de Eucalyptus estudados, demonstrando o potencial energético de plantios originalmente destinados para produção de polpa celulósica.

7 RECOMENDAÇÕES

Em relações aos resultados obtidos nesse trabalho, recomenda-se

- Estudar o impacto da retirada de toda a biomassa das árvores do campo após a derrubada.
- Estudar a produção de biomassa e estoque de energia do compartimento raiz.
- Estudar as possíveis variações das propriedades da madeira ao longo do fuste.
- Avaliar a produção de carvão vegetal com diferentes tratamentos térmicos.
- Estudar a composição química do licor pirolenhoso.
- Estudar a composição elementar dos compartimentos da árvore e do carvão vegetal

REFERÊNCIAS

- ASSIS, M. R.; PROTÁSIO, T. P.; ASSIS, C. O.; TRUGILHO, P. F.; SANTANA, W. M. S. Qualidade e rendimentos do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 291-302, 2012
- ANDRADE, A. M.; PASSOS, P. R.; MARQUES, L. G. C.; OLIVEIRA, L. B.; VIDAURRE, G. B.; ROCHA, J. D. Pirólise de resíduos do coco-da-baía (*Cocos nucifera* Linn) e análise do carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 28, n. 5, p. 707-714, set./out. 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633** - Carvão vegetal: Determinação do poder calorífico superior Rio de Janeiro, 1984. .
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112** - Carvão vegetal: análise imediata Rio de Janeiro, 1986. .
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941** Madeira - Determinação da densidade básica, 2003. .
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853** - Madeira: Determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro, 2010a. .
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7989** - Pasta celulósica e madeira - Determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro, 2010b. .
- BARRON, A. Jr. 1970 - Studies on the Collection of Bark char Throughout the Industry TAPPI 53(8) : 1441-1448
- BARROS, N. F.; COMERFORD, N. B. Sustentabilidade da produção de florestas plantadas na região tropical. **Tópicos em Ciência do Solo**. v. 2, p. 487-592, 2002.
- BILGEN, S.; KAYGUSUZ, K. The calculation of the chemical exergies of coal-based fuels by using the higher heating values. **Applied Energy**, London, v. 85, p. 776-785, Mar. 2008
- BRAND, M.A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131p.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca. **IPEF**, v. 16, p. 63-70. 1978.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. Usos diretos e propriedades da madeira para geração de energia. **Circular Técnica - IPEF**, v. 52, p. 4p, 1979. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr052.pdf>>.

BRITO, J. O., BARRICHELO, L.E.G., SEIXAS, F., MIGLIORINI, A. Análise da produção energética e de carvão vegetal de espécies de eucalipto. **IPEF, Piracicaba**, v. 23, p. 53-56, 1983.

BRITO, J. O. Energia da Madeira. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. DE (Ed.). **Bioenergia & Biorrefinaria: Cana-de-açúcar & Espécies Florestais**. Viçosa, MG: Editora da Universidade Federal de Viçosa, 2013. p. 271–295.

BURHENNE, L.; MESSMER, J.; AICHER, T.; LABORIE, M-P. The effect of the biomass components lignin, cellulose and hemicellulose on TGA and fixed bed pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.10, p. 177–184, 2013

BYRNE, C. E.; NAGLE, D. C. Carbonization of wood for advanced materials applications. **Carbon**, Elmsford, v. 35, n. 2, p. 259-266, 1997.

CARNEIRO, A. D. C. O.; VITAL, B. R.; OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C. Pirólise lenta da madeira para produção de carvão vegetal. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. DE (Ed.). **Bioenergia & Biorrefinaria: Cana-de-açúcar & Espécies Florestais**. Viçosa, MG: Editora da Universidade Federal de Viçosa, 2013a. p. 429–458.

CARNEIRO, A. de C. O.; SANTOS, R. C. dos; OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C. Conversão direta da madeira em calor e energia. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. DE (Ed.). **Bioenergia & Biorrefinaria: Cana-de-açúcar & Espécies Florestais**. Viçosa, MG: Editora da Universidade Federal de Viçosa, 2013b. p. 355–378.

CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. N.M., CASTRO, R. V. O., SANTOS, R. C., FERREIRA, L. P., DAMÁSIO, R.A.P., VITAL, B. R. Potencial energético da madeira de *Eucalyptus* sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, p. 375-381. 2014

CENTRO DE INTELIGÊNCIA EM FLORESTAS. **Eucalipto**. Disponível em: <<http://www.ciflorestas.com.br>>. Acesso em: 19 jan 2016.

CHAVES, A. M. B.; VALE, A. T.; MELIDO, R. C. N.; ZOCH, V. P. Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 17, p. 533-542, 2013.

CORTEZ, L. A. B.; JUNIOR, R. B.; ALMEIDA, E. Energia da cana-de-açúcar. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. In: **Bioenergia e Biorrefinaria: cana-de-açúcar e espécies florestais**. Viçosa, MG: Editora da Universidade Federal de Viçosa, 2013. 551 p.

COSTA, E.R.O. Prognose de crescimento, regimes de manejo e estratégias de secagem de *Eucalyptus dunnii* Maiden. 216 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). UFPR, Curitiba, 2015.

COSTA T, G., BIANCHI, M. L.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F. PEREIRA A. J. Qualidade da madeira de cinco espécies de ocorrência no cerrado para produção de carvão vegetal. **Cerne**; v. 20. n. 1, p. 37-46, 2014

COUTO, L.; MÜLLER, M. D.; DIAS, A. N.; TSUKAMOTO, A. A.; FONSECA, E. M. B.; CORRÊA, M. R. **Espaçamentos de plantio de espécies de rápido crescimento para dendroenergia**. Belo Horizonte: CEMIG, 2002. 66p.

COUTO, L.; MÜLLER, M. D. Produção de Florestas Energéticas. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. DE (Ed.). **Bioenergia & Biorrefinaria: Cana-de-açúcar & Espécies Florestais**. Viçosa, MG: Editora da Universidade Federal de Viçosa, 2013. p. 297–320.

DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 30, n. 2, p. 219–230, 2004.

DEMIRBAŞ, A. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. **Energy Conversion and Management**, v. 42, n. 11, p. 1357–1378, 2001.

ELOY, E.; SILVA, D.A. da; CARON, B. O.; SOUZA, V. Q. de. Capacidade energética da madeira e da casca de acácia-negra em diferentes espaçamentos. **Pesquisa Florestais Brasileira**. v.35, n.82, p.163-167, 2015a.

ELOY, E.; SILVA, D.A. da; CARON, B. O.; SOUZA, V. Q. de; BEHLING, A.; ELLI, E. F. ; MONTEIRO, G.C. Caracterização da biomassa da madeira e da casca de *Mimosa scabrella* Benth cultivada em dois diferentes espaçamentos. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**. v.6, n.1, p38-46, 2015b.

ELOY, E. **Produção e qualidade da biomassa de florestas energéticas no norte do Rio Grande do Sul, Brasil** . 151 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). UFPR, Curitiba, 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 2006. 306

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE, **Balanco Energético Nacional. Ministério de Minas e Energia – MME** Rio de Janeiro, RJ. Maio de 2014.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood Handbook: Wood as an Engineering Material**, US Department of Agriculture, Washington, DC, 1987, pp. 3–12

PALUDZYSZYN FILHO, E.; SANTOS, P. E. T. dos. **Escolha de cultivares de eucaliptos em função do ambiente e do uso**. Colombo: Embrapa Florestas, 2013.

GANI, A.; NARUSE, I. Effect of cellulose and lignin content on pyrolysis and combustion characteristics for several types of biomass. **Renewable Energy**, Oxford, v. 32, n. 4, p. 649-661, 2007.

GOMIDE, J. L.; FANTUZZI NETO, H.; REGAZZI, A. J. Análise de critérios de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose Kraft. **Revista Árvore**, Viçosa, v.34, n.2, p.339-344, 2010

GONÇALEZ, J. C.; DOS SANTOS, G. L.; SILVA JUNIOR, F. G. da; MARTINS, I. S.; COSTA, J. D. A. Relações entre dimensões de fibras e de densidade da madeira ao longo do tronco de *Eucalyptus urograndis*. **Scientia Florestalis**, v. 42, n. 101, p. 81–89, 2014.

GUIMARAES, C. C.; SCHUMACHER, M. V.; WITSHORECK, R.; SOUZA, H. P.; SANTO, J. C. Biomassa e nutrientes em povoamento de *Eucalyptus dunni* Maiden no pampa gaúcho. **Revista Árvore**, v. 39, n. 5, p. 873-882. 2015

HALL, D. O.; HOUSE, J. I.; SCRASE, I. Visão geral de energia e biomassa. In: ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. **Uso da biomassa para a produção de energia na indústria brasileira**. Campinas, SP: Unicamp, 2005. 447 p.

HASELEIN, C. R.; LOPES, M. C.; SANTINI, E. J.; LONGHI, S. J.; ROSSO, S.; FERNANDES, D. L. G.; MENEZES, L. F. de. Características tecnológicas da madeira de árvores matrizes de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, v. 14, n. 2, p. 145–155, 2004.

HIGA, R. C. V.; PEREIRA, J. C. D. **Usos potenciais do *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage**. Colombo: Embrapa Florestas, 2003. 4p. (Embrapa Florestas. Comunicado técnico, 100).

IBÁ. - Indústria brasileira de Árvores. Anuário **estatístico da IBA: ano base 2014. 2015**, p. 100, 2015.

JANKOWSKY, I. P. **Influência da densidade básica e do teor de extrativos na umidade de equilíbrio da madeira**. 1979. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1979

KIM, H. S.; KIM, S.; KIM, H. J.; Yang, H. S. Thermal properties of bio-flour-filled polyolefin composites with different compatibilizing agent type and content. **Thermochimica Acta**, v. 451, n. 1, p. 181-188, 2006.

LIMA, E. A. ; SILVA, H. D.; MAGALHÃES, W. L. E.; LAVORANTI, O. J.

Caracterização individual de árvores de Eucalyptus benthamii para uso energético. Colombo: Embrapa Floresta, 2007. 26 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 35)

LIMA, E. A. de; SILVA, H. D. da; LAVORANTI, O. J. Caracterização dendroenergética de árvores de Eucalyptus benthamii. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 65, p. 9–17, 2011.

LOPES, M. C. **Agrupamento de árvores matrizes de Eucalyptus grandis em função das variáveis dendrométricas e das características tecnológicas da madeira.** 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade

Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

LORENZI, H.; SOUZA, H. M. de; TORRES, M. A. V.; BACHER, L. B. **Árvores exóticas no Brasil.** Nova Odessa - SP: Instituto Plantarum, 2003.

MALUF, J.R.T. Nova classificação climática do Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. v. 8, n. 1, p. 141-150, 2000.

MAGALHÃES, J. G. R. Tecnologia de obtenção da madeira. In: *Uso da madeira para fins energéticos*. Belo Horizonte, MG: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, 1982. p. 56-66

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. **Bioresource technology**, v. 83, n. 1, p. 47–54, 2002.

MEDEIROS NETO, P. N.; OLIVEIRA, E.; PAES, J. B. Relações entre as Características da Madeira e do Carvão Vegetal de duas Espécies da Caatinga. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 4, p. 484-493, 2014.

MEIER, D.; FAIX, O. State of the art of applied fast pyrolysis of lignocellulosic materials - A review. **Bioresource Technology**, v. 68, n. 1, p. 71–77, 1999.

MOREIRA, J. M. M. A. P.; LIMA, E. A.; GOULART, I. C. G. R. Impacto do teor de umidade e da espécie florestal no custo da energia útil obtida a partir da queima da lenha. **Comunicado Técnico Embrapa 293**, Colombo, p. 1-5, 2012.

MÜLLER, M.D. **Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Etamarandiba, MG.** 94 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; VIEIRA, C. M. M. Avaliação de clones de Eucalyptus em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319–330, 2011.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 199 p.

NONES, D. L.; BRAND, M. A.; CUNHA, A. B. da; CARVALHO, A. F. de; WEISE, S. M. K. Determinação das propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal produzido a partir de *Eucalyptus benthamii*. **Floresta**. v. 45, n. 1, p. 57-64. 2015.

OLIVEIRA, A. C.; ROCHA, M. F. V.; PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; VITAL, B. R. Avaliação de diferentes níveis de desbaste nas propriedades da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Floresta**, v.42, n.1, p.59-68, 2012

OLIVEIRA, E. de. **Correlação entre parâmetros de qualidade da madeira e do carvão de *Eucalyptus grandis* (w. Hill ex-Maiden)**. 1988. 47 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

PELANDA, K.; POTUSKI, D. C.; SILVA, D. A. da; FERRAZ, F. A. Avaliação das possíveis implicações do uso de diferentes biomassas florestais como biocombustível em geradores de vapor. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**. v.6, n.2, p112-121, 2015.

PEREIRA, J.C.D.; HIGA, A.R.; SHIMIZU, J.Y.; HIGA, R.C.V. Comparação da Qualidade da Madeira de Três Procedências de *Eucalyptus dunnii* Maiden, para Fins Energéticos. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 13, p.9-16, dez. 1986.

PEREIRA, J. C. D.; SCHAITZA, E. G.; BAGGIO, A. J. **Propriedades físicas e químicas e rendimentos da destilação seca da madeira de *grevillea robusta***. Colombo: EMBRAPA Florestas, 2000. 11 p. (Circular Técnica, 40).

PROTÁSIO, T.P.; TRUGILHO, P.F.; NEVES, T.A.; VIEIRA, C.M.M. Análise de correlação canônica entre características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 95, p 317-326, 2012.

PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A.; TRUGILHO, P. F. Seleção de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal e bioenergia por meio de técnicas univariadas e multivariadas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 97, 2013a

PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A.; GODINHO, T. P.; TRUGILHO, P. F. Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. aos 42 meses de idade. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 33, n. 74, p. 137-149, 2013b.

PROTÁSIO, T.P.; GOULART, S. L.; NEVES, T. A.; TRUGILHO, P.F.; RAMALHO, F. M. G.; QUEIROZ, L. M. R. S. Qualidade da madeira e do carvão vegetal oriundos de floresta plantada em Minas Gerais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.34, n. 78, p. 111-123, 2014.

QUIRINO, W. F. VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**, Curitiba, v. 15, n. 89, p. 100-106, 2005.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing** Vienna, Austria, 2014. . Disponível em: <<http://www.r-project.org/>>.

RAAD, T. J.; PINHEIRO, P. C. C.; YOSHIDA, M. I. Equação geral de mecanismos cinéticos da carbonização do *Eucalyptus* spp. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 93-106, 2006.

RAGLAND, K. W.; AERTS, D. J.; BAKER, A. J. Properties of wood for combustion analysis. **Bioresource technology**, v. 37, n. 2, p. 161-168, 1991.

REIS, A. A.; PROTÁSIO, T. P.; MELO, I. C. N. A.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 277-290, 2012

ROSILLO-CALLE, F.; BEZZON, G. Produção e uso industriais do carvão vegetal. In: ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. **Uso da biomassa para a produção de energia na indústria brasileira**. Campinas, SP: Unicamp, 2005. 447 p.

SAMISTRARO, G.; HART, P. W.; COLODETTE, J. L.; PAIM, R. Chemical, anatomical, and technology aspects of *Eucalyptus benthamii* and *Eucalyptus dunii* for use in an integrated pulp and paper mill. **Tappi Journal**, v. 14, n. 2, p. 73–81, 2015.

SANQUETTA, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C.R. (Ed.). **As florestas e o carbono**. Curitiba, Brasil: 2002. p. 119-140.

SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; LEITE, H. G.; COMEFORD, N. B.; NOVAIS, R.F. Estimativa de biomassa de plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 697-706, jul./ago. 2008.

SANTOS, I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica, contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado**. 2008. 57 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, Brasília.

SANTOS R. C.; CARNEIRO A. C. O.; CASTRO A. F. M.; CASTRO R. V. O.; BIANCHE J. J.; SOUZA M.M.; CARDOSO, M. T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**; v. 39, n. 90, p. 221-230. 2011

SANTOS, R. C. dos; CARNEIRO, A. C. O.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M.;

CARVALHO, M. M. L. Análise termogravimétrica em clones de eucalipto como subsídio para a produção de carvão vegetal. **Cerne**. Lavras, v. 18. n. 1. p 143-151, 2012

SEVERO, E. T. D. Qualidade da secagem de madeira serrada de *Eucalyptus dunnii*. **Ciência Florestal**, v. 10, n. 1, p. 109–124, 2009.

SHARMA, A.; PAREEK, V.; ZHANG, D. Biomass pyrolysis—A review of modelling, process parameters and catalytic studies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 1081–1096, 2015.

SILVA, H. D. da; FERREIRA, C. A.; CORRÊA, R. S.; BELLOTE, A. F. J.; TUSSOLINI, E. L. Alocação de biomassa e ajuste de equações para estimativa de biomassa em compartimentos aéreos de *Eucalyptus benthamii*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 49, p. 83-95, 2004

SILVA, J. C.; MATOS, J. L. M. DE; OLIVEIRA, J. T. S.; EVANGELISTA, W. V. INFLUÊNCIA DA IDADE E DA POSIÇÃO AO LONGO DO TRONCO NA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p. 455-460, 2005.

SILVA, D. A.; CARON, B. O.; BEHLING, A.; SOUZA, V. Q.; ELOY, E. Ponto de amostragem ao longo do fuste para estimativa do poder calorífico da madeira. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 9, p.1588-1595, 2012

SILVA, D. A. da; MULLER, B. V.; KUIASKI, E. C.; ELOY, E.; BEHLING, A.; COLAÇO, C. M. Propriedades da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de energia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 84, p. 481–486, 2015.

SOARES, V.C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P.F.; HOFLE, J.; PEREIRA, A. J. Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. **Cerne**. Lavras, v. 21, n. 2, p. 191-197. 2015.

STORA ENSO FLORESTAL RIO GRANDE DO SUL. **Banco de Dados das Plantações Florestais no Rio Grande do Sul**. (Relatório Interno). Dados não publicados. 2014

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica em estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus globulus*, *E. pellita* E *E.acmenioides*. **Scientia Forestalis**. Piracicaba, n. 36, p. 35-42, 1987

TRUGILHO, P.; LIMA, J.; MENDES, L. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, v.2, n.1, 1996.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; LINO, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal. **Cerne**. v. 7, n. 2, p. 104-114, 2001

TRUGILHO, P. F.; GOULART, S. L.; ASSIS, C. O. de; COUTO, F. B. S.; ALVES, I. C. N.; PROTÁSIO, T. P. NAPOLI, A. Características de crescimento, composição química, física e estimativa de massa seca de madeira em clones e espécies de *Eucalyptus* jovens. **Ciência Rural**, v. 45, n. 4. p. 661-666. 2015

VALE, A. T.; MOURÃO, M. A.; LEÃO, B. A. L. Qualificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, v. 12, n. 1, p. 71-80, 2002.

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.

VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. D. C. O.; PEREIRA, B. L. C. Qualidade da madeira para fins energéticos. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. DE (Ed.). **Bioenergia & Biorrefinaria: Cana-de-açúcar & Espécies Florestais**. Viçosa, MG: Editora da Universidade Federal de Viçosa, 2013. p. 321–354.

ZOBEL, B.; JETT, J. B. **Genetics of wood production**. Germany: Springer- Verlag Berlin Heidelberg, 1995. 337 p