



ROGÉRIO QUINHONES

**RELAÇÕES ENTRE AS CARACTERÍSTICAS DA
MADEIRA DE *Eucalyptus* sp. E AS DO CARVÃO
PRODUZIDO A DIFERENTES
TEMPERATURAS FINAIS DE
CARBONIZAÇÃO**

LAVRAS - MG

2011

ROGÉRIO QUINHONES

**RELAÇÕES ENTRE AS CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA E
CARVÃO DE *Eucalyptus* sp. PRODUZIDO A DIFERENTES
TEMPERATURAS FINAIS DE CARBONIZAÇÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Madeira como Matéria-prima, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. Jose Tarcisio Lima

Coorientador

Dr. Alfredo Napoli

LAVRAS - MG

2011

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Quinhones, Rogério.

Relações entre as características da madeira de *Eucalyptus* sp. e as do carvão produzido a diferentes temperaturas finais de carbonização / Rogério Quinhones. – Lavras : UFLA, 2011.

78 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2011.

Orientador: José Tarcísio Lima.

Bibliografia.

1. Biomassa. 2. Energia renovável. 3. Temperatura de pirólise. 4. Carvão vegetal siderúrgico. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 674.1

ROGÉRIO QUINHONES

**RELAÇÕES ENTRE AS CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA E
CARVÃO DE *Eucalyptus* sp. PRODUZIDO A DIFERENTES
TEMPERATURAS FINAIS DE CARBONIZAÇÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Madeira como Matéria-prima, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 8 de abril de 2011.

Dr. Paulo Fernando Trugilho	UFLA
Dr. Hélder Bolognani Andrade	V&M Florestal
Dr. Ailton Teixeira do Vale	UnB
Dr. José Reinaldo Moreira da Silva	UFLA

Dr. Jose Tarcisio Lima
Orientador

Dr. Alfredo Napoli
Coorientador

LAVRAS - MG
2011

APRESENTAÇÃO GERAL

Este trabalho faz parte de um acordo de cooperação técnico e científico firmado entre a Universidade Federal de Lavras, o Centro de Cooperação Internacional em Pesquisa Agronômica para o Desenvolvimento – CIRAD/França e a empresa V&M Florestal Ltda., pertencente ao grupo Vallourec & Mannesmann Tubes.

O objetivo principal desse acordo foi estudar a otimização da produção de carvão vegetal em todas as suas variáveis, processo, qualidade da madeira e controle de qualidade da matéria-prima e desenvolver técnicas de avaliação do carvão vegetal confiáveis para aplicações na indústria siderúrgica. Em um primeiro momento, este acordo de cooperação contou com a participação de dois estudantes de doutorado, três de mestrado e cinco de iniciação científica, coordenados por professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira da UFLA e por um pesquisador do CIRAD/França.

Esse acordo de cooperação internacional entre universidade brasileira, centro de pesquisa internacional e empresa franco-brasileira resultou no desenvolvimento de cinco subprojetos, que estão relacionados a seguir:

- . Subprojeto 1: Estudo da relação entre as propriedades mecânicas da madeira e do carvão vegetal;
- . Subprojeto 2: Estudo das propriedades químicas da madeira e seu impacto na qualidade do carvão vegetal;
- . Subprojeto 3: Estudos para otimização de corte de madeira de eucalipto para produção de carvão vegetal;
- . Subprojeto 4: Estudo da avaliação da secagem de madeira no campo para a carbonização;
- . Subprojeto 5: Aplicação do NIRS para avaliação das propriedades da madeira e do carvão vegetal.

Este trabalho trata especificamente do subprojeto 2, cujo objetivo inicial foi estudar a influência das características químicas da madeira nas propriedades do carvão vegetal e está diretamente interligado aos subprojetos 1 e 5.

Ao meu pai, Hélio Quinhones; minha mãe, Odete Sanches Quinhones; minha esposa, Geni Sodré Quinhones e minha filha, Beatriz Sodré Quinhones, pelo carinho e apoio durante essa caminhada,

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por iluminar meu caminho e me dar forças para seguir sempre em frente.

À Universidade Federal de Lavras, pelo apoio concedido por meio de sua estrutura, em especial ao Departamento de Ciências Florestais, Setor de Ciência e Tecnologia da Madeira, pela oportunidade, convivência e ensinamentos indispensáveis para a realização deste trabalho.

Ao Professor Dr. José Tarcisio Lima, pela orientação, amizade, confiança e, principalmente, apoio concedido em todos os momentos.

Ao Dr. Alfredo Napoli, pela coorientação, amizade e colaboração.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, pelos ensinamentos transmitidos.

À Empresa Vallourec & Mannesmann Florestal, pela concessão da bolsa de estudos, material de pesquisa e todo apoio necessário e que tornou possível a realização deste doutorado.

Ao *Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement* (CIRAD), pela colaboração na realização das análises.

Ao Pesquisador do CIRAD, Dr. Phillippe Gallet, pela amizade e colaboração.

Aos colegas e amigos do Setor de Ciência e Tecnologia da Madeira, pelo convívio, amizade, apoio e simpatia.

Ao estudante de iniciação científica Leonardo Arantes Araujo, pelo auxílio nas atividades de laboratório.

Aos funcionários Carlos, Zé Fazenda, Vico e Claret, por toda a ajuda possível.

A todos que, direta e indiretamente, contribuíram para a finalização desta etapa, agradeço.

RESUMO

O carvão vegetal é uma importante fonte energética utilizada no Brasil, relacionada diretamente à produção siderúrgica. A qualidade da madeira, combinada ao processo de carbonização, é a fonte que influencia a produção e a qualidade do produto final. Neste contexto, este estudo foi realizado com o objetivo de verificar a influência da temperatura final de carbonização e da posição axial do caule no rendimento da carbonização e qualidade do carvão obtido de dois clones de *Eucalyptus* spp. (*Eucalyptus urophylla* e um clone de híbrido de *Eucalyptus camaldulensis* × *E. urophylla*). Para tanto, foi selecionada, em plantios comerciais da empresa V&M Florestal, na região de Paraopeba, estado de Minas Gerais, uma árvore de cada clone, com idade aproximada de sete anos, que foi utilizada para a avaliação das principais características da madeira e do carvão ao longo do caule das árvores. Estudos paralelos foram realizados no Centre de Cooperation Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), em Montpellier, França. Foram feitas as seguintes análises para a madeira: análise elementar, extrativos totais, lignina Klason, holocelulose, poder calorífico superior, análise termogravimétrica e densidade básica. Para o carvão vegetal, determinaram-se o rendimento gravimétrico da carbonização e a análise química imediata. Os resultados foram analisados estatisticamente por clone, posição longitudinal e temperatura final. Observou-se aumento da densidade básica, do poder calorífico e do teor de extrativos e diminuição da lignina e da eficiência termogravimétrica, em direção ao topo da árvore. Os melhores resultados do teor de carbono fixo e rendimento gravimétrico foram verificados entre 450°C e 550°C e até os 10 m de altura, devido principalmente à densidade básica, as ligninas total e insolúvel para o rendimento gravimétrico da carbonização. Para o teor de carbono fixo além da lignina, o poder calorífico superior e os elementos carbono e hidrogênio foram importantes.

Palavras-chave: Biomassa. Energia renovável. Temperatura de pirólise, Carvão vegetal.

ABSTRACT

The charcoal is an important energy source used in Brazil, related directly to the steel production. The quality of the wood, combined to the carbonization process is the source that influences the production and the quality of the final product. In this context, the objective of this study was to verify the influence of the final temperature of carbonization and of the axial position in the stem in the yield of the carbonization and quality of the obtained charcoal of two clones of *Eucalyptus* spp. (*Eucalyptus urophylla* and a clone of hybrid of *Eucalyptus camaldulensis* × *E. urophylla*), selected in commercial plantation in the region of Paraopeba city, Minas Gerais State, Brazil. A tree of each clone, with approximate age of seven years, was used for evaluation of the principal characteristics of the wood and of the charcoal along the stem. The following analyses were made for the wood: elemental analysis, total extractives, Klason lignin, holocellulose, calorific value, thermo gravimetric analysis and basic density, and for the charcoal it was determined: gravimetric yield of the carbonization and immediate analysis. The best results were verified between the final temperature of 450°C and 550°C and until 10 meters of height, due the basic density, total and insoluble lignin, with direct effects to the gravimetric yield, and due total and insoluble lignin and carbon and hydrogen with effects on the fixed carbon.

Keywords: Biomass. Renewable energy. Pyrolysis temperature, Charcoal.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	122
2.1	O Brasil e o carvão vegetal.....	122
2.2	Madeira como fonte energética.....	133
2.3	<i>Eucalyptus</i> como matéria-prima para a produção de carvão.....	144
2.4	Propriedades da madeira para produção de carvão.....	166
2.5	Carbonização da madeira.....	200
2.6	Carvão vegetal.....	222
2.7	Qualidade do carvão vegetal.....	233
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	266
3.1	Material de estudo e amostragem.....	266
3.1.1	Preparação dos corpos-de-prova para avaliação e carbonização.....	288
3.2	Avaliação da madeira.....	299
3.2.1	Análise elementar.....	299
3.2.2	Extrativos totais.....	300
3.2.3	Lignina ácida.....	300
3.2.4	Holocelulose.....	311
3.2.5	Poder calorífico.....	311
3.2.6	Termogravimetria.....	311
3.2.7	Densidade básica.....	322
3.3	Carbonização.....	322
3.4	Avaliação do carvão.....	333
3.4.1	Rendimento gravimétrico da carbonização.....	333
3.4.2	Análise química imediata.....	333
3.5	Determinação do coeficiente de variação.....	333
3.6	Análises dos resultados.....	344
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	355
5	CONCLUSÕES.....	677
	REFERÊNCIAS.....	699
	ANEXOS.....	755

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a energia renovável (biomassa e hidroeletricidade) constitui uma parcela significativa da matriz energética, respondendo por cerca de metade da oferta interna de energia do país (BRASIL, 2010). No mesmo trabalho, cita-se que a biomassa responde por mais de 30% dessa energia, sendo 12% provenientes do bagaço de cana-de-açúcar e cerca de 10% obtidos a partir da lenha.

O Brasil é líder mundial em produção siderúrgica movida a carvão vegetal proveniente de plantações florestais. A solução de problemas, como variações em parâmetros de carbonização e qualidade da madeira, é essencial para o bom desempenho do setor. Os processos de carbonização empregados no país resultam em baixo rendimento. Quanto à qualidade, é desejável que o carvão, para atender à demanda das siderúrgicas, tenha boa resistência mecânica para suportar a carga de minério no alto-forno e apresente alto poder calorífico e teor de carbono fixo adequado, que dependem muito da temperatura final de carbonização.

Existem muitos estudos sobre propriedades químicas e físicas da madeira e do carvão e alguns são relacionados ao rendimento de carbonização e à qualidade do carvão vegetal. Além disso, a variação da qualidade da madeira dentro do caule incita a busca por um maior conhecimento para subsidiar programas de melhoramento, que visem à obtenção de materiais genéticos mais uniformes.

Assumindo-se a hipótese de que a variação das características da madeira influencia significativamente a carbonização e a qualidade do carvão, a presente pesquisa foi realizada com o objetivo de verificar a influência de características da madeira, em diferentes temperaturas finais de carbonização, no rendimento e na qualidade do carvão de dois clones de *Eucalyptus* spp.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O Brasil e o carvão vegetal

O uso tradicional de madeira como fonte de matéria-prima para a produção de carvão vegetal corresponde a cerca de 10% a 15% da matriz energética no mundo. Os maiores produtores desta fonte de energia encontram-se nos continentes africano (27 Mt), americano (13 Mt) e asiático (7 Mt) (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO, 2010; HILLRING, 2006). O Brasil é o maior produtor e consumidor mundial de carvão vegetal, além de ser o único país a manter um parque industrial siderúrgico, tendo como base essa fonte de energia renovável (BARCELLOS, 2007). O carvão vegetal produzido no Brasil é utilizado, principalmente, na siderurgia, e o estado de Minas Gerais destaca-se como o maior produtor e consumidor nacional.

Durante muitos anos, no Brasil, a madeira proveniente de florestas nativas foi considerada a matéria-prima para a produção de carvão vegetal. De acordo com Matarelli, Lopes e Castro (2001), os plantios para a produção de carvão vegetal com fins siderúrgicos no Brasil iniciaram-se de maneira pioneira e intensiva no ano de 1937. Entretanto, só a partir de 1960 surgiu o Programa de Incentivo Fiscal ao Florestamento e Reflorestamento, levando a um aumento das áreas de florestas plantadas em todo o país.

O carvão vegetal tem utilização em diferentes setores no Brasil. O setor industrial de ferro-gusa, aço, ferro-liga e cimento é responsável pelo consumo de aproximadamente 90% do carvão vegetal comercial, que funciona como redutor e energético ao mesmo tempo. O setor residencial consome cerca de 8%, seguido pelo setor comercial (pizzarias, churrascarias e padarias), que corresponde ao

consumo de 1% (ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA - AMS, 2008).

No Brasil, a matriz energética proveniente de fontes renováveis alcançou, no ano de 2009, a marca de 47,3%. Os produtos da cana-de-açúcar, a hidroeletricidade e a biomassa lenhosa foram os itens que mais contribuíram para esse desempenho. Apesar da queda de 35% em produção devido à crise financeira de 2009, praticamente todo o carvão produzido em território nacional foi consumido no próprio país. Das 6.343 milhões de toneladas (4.097 Mtep) de carvão vegetal produzidas neste ano, 6.146 milhões foram utilizados internamente (BRASIL, 2010).

2.2 Madeira como fonte energética

As formas de obtenção de energia da madeira são apresentadas na Figura 1 e podem ser divididas em primárias e secundárias. A forma primária corresponde à queima direta da madeira, utilizada principalmente em instalações industriais para a geração de calor ou vapor. A forma secundária é mais versátil e consiste na obtenção de combustíveis em diferentes formas (sólida, líquida ou gasosa) para uso posterior, por meio da pirólise, da hidrólise, da gaseificação e da transesterificação (MCKENDRY, 2002a).

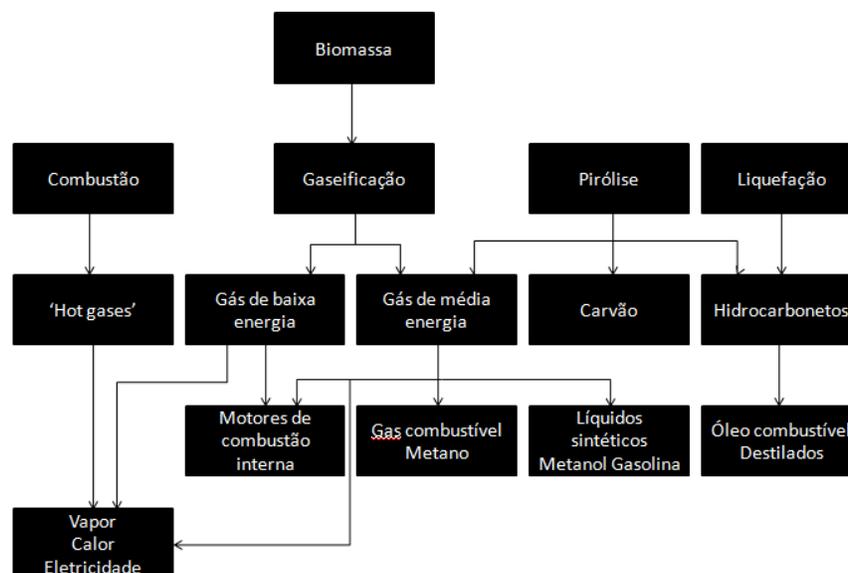


Figura 1 Conversão termo-química da biomassa adaptado de Mckendry (2002a)

2.3 *Eucalyptus* como matéria-prima para a produção de carvão

A utilização de madeira como fonte de matéria-prima para a produção de carvão vegetal obtido por meio de práticas renováveis como a utilização de floresta plantada vem crescendo cada vez mais no Brasil. Dentre as espécies utilizadas para esse fim têm destaque as do gênero *Eucalyptus*. Este gênero ocorre naturalmente na Austrália e existem, aproximadamente, 600 espécies no mundo. As mais utilizadas para diversos usos são *E. grandis*, *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. globulus*, *E. urophylla*, *E. viminalis*, *E. saligna* e *E. citriodora* (ALZATE, 2004). Sendo que esta última espécie atualmente é denominada *Corimbia citriodora*.

Conforme Souza et al. (2009), dentre as espécies do gênero *Eucalyptus*, algumas possuem importância fundamental para a produção de carvão vegetal.

De acordo com esses autores, o gênero apresenta, entre outras características, alta produtividade, idade reduzida de corte, homogeneidade de matéria-prima e custo competitivo da madeira, além da possibilidade de usos múltiplos. Já para Tomazello Filho (1985), a madeira deste gênero apresenta estrutura heterogênea devido, principalmente, às variações dos tipos e de localização de seus elementos anatômicos. Dessa forma, é importante a identificação do padrão dessa variação para uma utilização adequada.

Barcellos (2007) menciona que, do carvão proveniente de madeira oriunda de reflorestamentos (47,8% da produção nacional), destaca-se o gênero *Eucalyptus*, citando as espécies *E. grandis*, *E. urophylla*, *E. cloeziana* e *E. camaldulensis*.

O melhoramento genético aplicado a espécies do gênero *Eucalyptus* visando à qualidade e produção de madeira para utilização como carvão vegetal vem crescendo a cada ano. Nas últimas décadas, a silvicultura clonal proporcionou, tanto ao Brasil como a diversos países, significativos avanços para a cultura do *Eucalyptus*, com destaque para os clones de híbridos do gênero. Isso tem levado o país à expansão da cultura e ao aprimoramento das pesquisas em relação ao manejo, à exploração e à melhoria das árvores como fonte de matéria-prima, nas áreas de celulose e papel, painéis de madeira e carvão vegetal (BALLONI; MIGLIORINI; BRITO, 1980).

No caso das espécies de *Eucalyptus*, a silvicultura intensiva clonal adquire alta importância, pois propicia: redução na idade de exploração, maior produção de madeira de melhor qualidade em menor tempo e por unidade de área; racionalização das atividades operacionais e redução nos custos de exploração e transporte (FERREIRA, 1992). Xavier e Silva (2010) mencionam que a silvicultura clonal de *Eucalyptus* no Brasil, até a década de 1990, estava praticamente restrita às empresas florestais, mas, atualmente, há uma expansão dos plantios clonais para pequenos e médios produtores. Dentre as espécies de

Eucalyptus que são estudadas visando seu melhoramento, pode-se citar o *E. camaldulensis*, que é originário da Austrália e é bem tolerante às deficiências hídricas e solos pobres, além de ser medianamente tolerante a geadas e altamente tolerante a secas (FERREIRA, 1979). Outra característica interessante é que sua folha possui um altíssimo teor de cineol (VITTI; BRITO, 2003). Outra espécie que pode ser mencionada é o *E. urophylla*, que é originária do leste da Indonésia e Timor Leste. A espécie foi inicialmente denominada no Brasil de *Eucalyptus Alba*. Ela suporta temperaturas baixas e grandes altitudes, no entanto, é pouco resistente a geadas e a longos períodos de seca (FERREIRA, 1979).

2.4 Propriedades da madeira para produção de carvão

O conhecimento da natureza química da madeira possibilita o entendimento de seu comportamento, uma vez que seus constituintes influem diretamente nas demais propriedades. A madeira é um material que apresenta alta variação em suas propriedades e essa variabilidade influencia positiva ou negativamente o seu uso final. Os diferentes componentes da madeira podem ser divididos entre os fundamentais e os secundários; no primeiro grupo encontram-se celulose, hemiceluloses e lignina e, no segundo grupo, estão os extrativos e os minerais (BROWNING, 1963; FENGEL; WEGENER, 1989).

Com relação à densidade básica da madeira, Brito e Barrichelo (1980) mencionam a existência de forte correlação entre essa densidade e a densidade do carvão quando obtido pela mesma madeira, tornando-se um importante parâmetro na previsão do comportamento do produto final e na escolha das matérias-primas.

Sturion et al. (1987) estudaram a variação da base até o topo da densidade básica de diferentes espécies de *Eucalyptus* com dez anos e meio de idade plantados na região do Triângulo Mineiro e concluíram que as espécies de

madeira mais densa foram o *E. camaldulensis*, *E. cloeziana*, *E. maculata* e *E. citriodora*. Esta última sendo atualmente denominada *Corymbia citriodora*.

Pereira et al. (2000) estudaram a densidade básica, o teor de lignina, o rendimento gravimétrico da carbonização e os teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas de carvão produzido com madeira de três procedências de *Eucalyptus dunni* plantadas para finalidade energética e não encontraram diferenças significativas.

Associada à densidade, a quantidade de massa seca é um parâmetro que está relacionado com a quantidade de carbono fixo e pode ser utilizada para a seleção de clones em programas de melhoramento (BOTREL, 2006).

A lignina é um polímero aromático amorfo de unidades do fenil-propano do tipo C_6C_3 ou ainda C_9 e ligada quimicamente às polioses da madeira; é um componente estrutural que proporciona à madeira propriedades de elasticidade e resistência peculiares, funcionando como principal elemento de suporte para a árvore (BROWNING, 1963).

A composição elementar conceitual da lignina é variável, mas consiste exclusivamente de carbono, hidrogênio e oxigênio. Em folhosas, a porcentagem de carbono situa-se em torno dos 60%; de oxigênio, em torno dos 33% e a de hidrogênio é de aproximadamente 7%. Em espécies de coníferas, o teor de carbono é maior e os teores de oxigênio e hidrogênio são ligeiramente menores (SJÖSTRÖM, 1981).

De acordo com Hon e Shiraishi (2001), a lignina é um dos componentes essenciais da madeira e seu teor varia na faixa de 10% a 30%. É um polímero formado pela desidrogenação enzimática de fenilpropanos. Em gimnospermas, é composta majoritariamente de unidades de guaiacil originários do álcool trans-coniferílico; por outro lado, nas angiospermas, são compostas tanto por unidades de guaiacil quanto por unidades de siringil, que são derivadas dos álcoois transconiferílico e trans-p-cumarílico.

Para o isolamento, a lignina deve estar livre de extrativos e durante o processo não deve haver nenhum tipo de alteração química que possa causar diferenças em relação à protolignina. Segundo Fengel e Wegener (1989), a lignina pode ser isolada na forma de resíduo, derivado e como extrativo; no primeiro caso, os polissacarídeos são removidos por hidrólise ácida pelo método Klason.

Extrativos são os constituintes da madeira que podem ser extraídos com solventes neutros orgânicos ou água. O teor de extrativos na madeira não é muito alto, principalmente para espécies de regiões temperadas; no entanto, em espécies de regiões mais quentes, a quantidade de extrativos na madeira pode ser bem maior (FENGEL; WEGENER, 1989).

Ao contrário dos componentes majoritários celulose, hemiceluloses e lignina, a composição dos extrativos das espécies arbóreas é bem diversificada e, apesar de sua reduzida quantidade, pode caracterizar a madeira quimicamente (HON; SHIRAISHI, 2001).

Os extrativos são os principais fatores de formação da cor, do cheiro, do sabor e da durabilidade natural da madeira e influenciam a polpação, a secagem, a adesão, a higroscopicidade e as propriedades acústicas da mesma. Muitos deles possuem atividades biológicas específicas e são usados como remédio há tempos (SJÖSTROM, 1981).

Segundo Evtuguin et al. (2001), na avaliação da qualidade de qualquer biomassa utilizada como fonte de energia, a umidade pode ser interessante de duas maneiras principais: a umidade intrínseca, em que os efeitos do ambiente não estão presentes e a umidade extrínseca, que considera os efeitos ambientais preponderantemente durante a colheita. É na fase da colheita também que podem ocorrer contaminações, principalmente do solo, que poderão causar erros se, porventura, for realizada a determinação do teor de cinzas da biomassa.

As cinzas ou minerais compõem usualmente menos de 1% da massa seca de madeira, sendo os principais o cálcio, o magnésio e a sílica. Quando o teor ultrapassa esse limite, o principal elemento responsável por este aumento é a sílica (PANSHIN; ZEEUW, 1964). Em alguns casos, o potássio, juntamente com o cálcio, pode responder por até 50% do resíduo. Outros elementos são o manganês, o sódio, o fósforo e o cloro. Entre os ânions estão os carbonatos, os fosfatos, os silicatos e os sulfatos (FENGEL; WEGENER, 1989). A maioria dos minerais é extraída com ácido clorídrico diluído e seu teor varia de 0,3% a 0,9%, para espécies de regiões temperadas e até 5%, para espécies tropicais (SJÖSTROM, 1981).

O poder calorífico representa a expressão do quanto um combustível possui de energia ou o quanto de calor ele libera quando queimado. É a relação entre o conteúdo de energia e a massa e deve ser expresso em MJ.l^{-1} , para líquidos ou $\text{MJ} \cdot (\text{N.m}^3)^{-1}$, para gases (BRAADBART; POOLE, 2008). É uma referência importante para a avaliação do combustível e pode ser dividido em dois tipos: poder calorífico superior e poder calorífico inferior. Para combustíveis sólidos ele é expresso em Joules (J) e em combustíveis gasosos usa-se kcal.m^{-3} (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1994). Na madeira, pode ser considerado como a quantidade de calor liberada durante a sua combustão total (NOGUEIRA et al., 2000).

O poder calorífico superior é aquele obtido em equipamentos chamados calorímetros e é o parâmetro que traduz a máxima quantidade de energia liberada pelo combustível, por não haver perda do calor latente de vaporização da água; por outro lado, o poder calorífico inferior não leva em consideração o calor latente de vapor d'água contido na madeira que, ao evaporar, conduz parte da energia contida no material. Madeiras de coníferas possuem, em média, poder calorífico superior de $5.200 \text{ kcal.kg}^{-1}$, enquanto as madeiras de folhosas têm poder calorífico superior médio de $4.500 \text{ kcal.kg}^{-1}$. O maior teor de lignina e

extrativos no primeiro grupo é o principal responsável por essa diferença (BROWNING, 1963).

Para a holocelulose, que diz respeito à combinação de celulose com os demais polissacarídeos da madeira, o poder calorífico é de, aproximadamente, $4.200 \text{ kcal.kg}^{-1}$; para a lignina, está em torno de $6.400 \text{ kcal.kg}^{-1}$, enquanto para os extrativos pode ser de, aproximadamente, $8.300 \text{ kcal.kg}^{-1}$ (SJÖSTROM, 1981).

2.5 Carbonização da madeira

A pirólise ou carbonização ou, ainda, a destilação seca é a decomposição da madeira de forma controlada sob o efeito da temperatura e oxigênio, com o objetivo principal de se obter o carvão vegetal na forma de carbono fixado (fração sólida). Mas, nesse processo, outras frações são geradas, resultando em ácido pirolenhoso e alcatrão insolúvel, que é a fração líquida e gases não condensáveis, que é a fração gasosa (MCKENDRY, 2002b).

O comportamento térmico da madeira pode ser medido principalmente pela análise termogravimétrica (ATG), pela análise térmica diferencial (ATD) e pela calorimetria exploratória diferencial (DSC). No primeiro caso, a amostra é cuidadosamente pesada enquanto sofre a pirólise em um ambiente isento de oxigênio; o segundo método envolve a medição da energia liberada ou absorvida por um material enquanto este muda de um estado físico para outro e, no último método, a amostra é aquecida paralelamente a uma amostra padrão, sendo o comportamento térmico entre as duas comparado isoladamente (ROWELL, 2005).

Antal Junior et al. (1996) desenvolveram um método de carbonização pelo qual, com o uso de pressão, pôde-se obter a transformação da madeira em, no máximo, duas horas, dependendo do teor de materiais voláteis e da umidade, utilizando um reator de 20 cm^3 , taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C.min}^{-1}$ e

temperatura final de 450°C. As pressões utilizadas foram de 0,1 MPa a um fluxo de 0,25 L.min⁻¹ e a 1,0 MPa (0,25 e 2,5 L.min⁻¹).

Mok et al. (1992) utilizaram temperaturas de até 500°C e pressões mais altas do que as usadas em estudos anteriores em planta piloto (0,3 a 1,4 bar) com amostras de pequenas dimensões. A taxa de aquecimento foi de 5°C.min⁻¹ e utilizou-se argônio a um fluxo de 140 mL.min⁻¹. Os materiais foram provenientes de várias espécies arbóreas e não-arbóreas, além de celulose, xilana e lignina, sob várias condições de umidade. Observou-se que a umidade cataliza o processo de carbonização, reduz a temperatura limite e afeta tanto a quantidade quanto a qualidade do carvão. Foi confirmado que a lignina reage lentamente ao longo do processo, o que sugere que materiais com teores mais altos desse componente ou com baixas quantidades de hemiceluloses são mais propícios para o uso energético.

Segundo Oliveira, Mendes e Gomes (1982), a umidade da madeira em fornos de carbonização deve ser a menor possível, pois a vaporização da água consome cerca de 600 kcal.kg⁻¹ e fragiliza o carvão devido ao desprendimento violento do vapor na madeira, aumentando o tempo da fase de secagem; em fornos contínuos, os subprodutos resultantes da carbonização ficam diluídos, dificultando a recuperação. Segundo o mesmo autor, este último fato exige que a madeira a ser carbonizada deva ser submetida a um processo prévio de secagem.

2.6 Carvão vegetal

O carvão vegetal, no Brasil, constitui importante matéria-prima, principalmente para o processo siderúrgico. Trata-se de um produto sólido obtido por meio da carbonização ou queima controlada da madeira, também do controle do fluxo e da presença de ar em fornos de carbonização. Dependendo do uso a que se destina, pode ser classificado segundo características físicas, químicas e do processo de obtenção (PINHEIRO et al., 2006). As principais propriedades físicas são a granulometria, a densidade e a resistência mecânica, sendo que esta última propriedade afeta diretamente a friabilidade do material. As principais propriedades químicas são a umidade, a composição química e a reatividade. Para a avaliação de suas qualidades, são utilizadas técnicas laboratoriais, como a análise química imediata, que avalia os teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas (OLIVEIRA; MENDES; GOMES, 1982).

Conforme Brito e Barrichello (1981), o carvão vegetal é o produto sólido obtido a partir da carbonização da madeira. No entanto, dependendo do processo de obtenção suas características, podem ser variáveis. Para Pastor-Villegas et al. (2007), o carvão vegetal é um material poroso, com uma superfície heterogênea e desorganizada. As características do carvão não dependem somente da madeira, mas também do sistema de carbonização; no processo, os materiais voláteis são eliminados, resultando em uma estrutura rudimentar de carbono poroso.

A quantidade de energia desejada no final do processo é determinada pela velocidade de carbonização e pela quantidade de sólidos, líquidos e gases obtidos (STREZOV et al., 2007). Antal Junior e Gronli (2003) ressaltam que um carvão vegetal de boa qualidade mantém a grã da madeira e, além disso, é um mau condutor de eletricidade e deve queimar sem chama. Para Chaturvedi (1943), o carvão deve ter coloração preta, com brilho lustroso quando seccionado, apresentar sonoridade metálica e flutuar na água.

Os principais tipos de carvão são: para uso doméstico, metalúrgico, para gasogênio, carvão ativado, para indústria química e para outros usos (BRITO; BARRICHELO, 1981).

Brito (2008) ressalta que os dois fortes entraves ao estabelecimento de um carvão vegetal de boa qualidade são a homogeneidade da madeira utilizada e o processo utilizado na obtenção do carvão. O uso de madeira proveniente de plantações florestais e a melhoria em equipamentos e métodos de produção, além do aperfeiçoamento da mão-de-obra, têm contribuído para a minimização desses problemas.

O carvão vegetal é utilizado tradicionalmente no processo siderúrgico como fonte de carbono e energia, mas pode ser utilizado também como absorvente na forma de carvão ativado, eletrodos, fertilizante agrícola renovável e na produção de nanotubos de carbono (STREZOV et al., 2007). Em se tratando de carvão absorvente, a madeira é amplamente empregada em escala industrial na produção de carbono ativado, mas o carvão vegetal comum também pode ser aplicado em alguns casos, com a vantagem de ser mais barato (PASTOR-VILLEGAS et al., 2006).

2.7 Qualidade do carvão vegetal

O carvão vegetal que atua no alto-forno como fonte de energia para o processo também é empregado como fonte de carbono para a redução do minério de ferro e, como suporte mecânico da carga mineral, deve possuir uma granulometria adequada para a difusão dos gases e facilitar a reação. Em função dessas características, tanto as propriedades químicas quanto as físico-mecânicas da madeira e do carvão, bem como o controle da sua homogeneidade, são fatores essenciais para o processo de produção e a qualidade do ferro-gusa. O conhecimento dessas propriedades e suas associações subsidiam melhorias na

matéria-prima que podem proporcionar ganhos significativos em produtividade (OLIVEIRA; MENDES; GOMES, 1982).

Os fatores que mais influenciam o rendimento final e as qualidades do carvão são a matéria-prima, a taxa de aquecimento, a temperatura final de carbonização, a pressão e o fluxo de gases, a presença de catalisadores e a possibilidade de autocatálise por produtos voláteis (OLIVEIRA; MENDES; GOMES, 1982). A composição da matéria-prima influencia o teor de cinzas do carvão, bem como o rendimento dos compostos do vapor de pirólise. Além disso, o teor de lignina e a densidade da biomassa inicial afetam diretamente o rendimento e a densidade do produto final.

O teor de materiais voláteis de um carvão pode variar mais de 20% para o carvão doméstico para o máximo de 15% em um carvão metalúrgico, com variação de poder calorífico entre 28 e 33 MJ.kg⁻¹ e teor de cinzas entre 0,5 e 5% (FOLEY, 1986).

A composição química é uma das características mais valorizadas para a qualidade do produto final, devido à boa correlação entre os teores de carbono fixo e de carbono elementar no carvão produzido sob temperaturas acima de 400°C. Para sua avaliação, utiliza-se, normalmente, a análise química imediata, que fornece referências quanto aos teores de carbono fixo e de materiais voláteis do carvão (PINHEIRO et al., 2006).

O teor de carbono fixo no carvão tem relação direta com o teor de lignina, extrativos e com a densidade da madeira e, portanto, relação inversa com o teor de holocelulose, sendo uma função direta do rendimento gravimétrico. Já a quantidade de materiais voláteis possui uma relação direta com as propriedades físicas de porosidade e friabilidade e é inversamente relacionada com a densidade e o diâmetro dos poros (OLIVEIRA; MENDES; GOMES, 1982).

A umidade no carvão, além de baixa, deve ser a mais constante possível durante o processo. Estima-se que a produção do alto forno fique comprometida

em cerca de 10% com cargas de umidade entre 8% e 20%. A perda de umidade acarreta também alterações nas características físicas, pois a eliminação da água acarreta fissuras e quebras, reduzindo o tamanho médio das partículas e aumentando a quantidade de finos (OLIVEIRA; MENDES; GOMES, 1982).

A umidade presente no carvão no interior do alto forno é vaporizada, exigindo maior quantidade de calor dos gases para vaporizar a água; como consequência, mais reações de combustão serão necessárias e, com isso, mais carvão será consumido. Outra consequência da umidade é o desequilíbrio na eficiência do processo, em virtude do aumento da temperatura necessária para compensar a temperatura dentro do forno de carbonização (BRITO, 2008).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado nos Laboratórios de Tecnologia da Madeira do Departamento de Ciências Florestais (DCF) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras, MG. A análise termogravimétrica foi realizada no Centre de Cooperation Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), em Montpellier, França.

3.1 Material de estudo e amostragem

Foram selecionados um clone de híbrido de *Eucalyptus camaldulensis* x *E. urophylla* (MN463) e um clone de *Eucalyptus urophylla* (VM01), com idades de 6,8 e 6,7 anos e diâmetro médio de 17,37 e 16,23 cm a 1,3 m, respectivamente, plantados em talhões adjacentes com espaçamento de 3 x 3 m, em terreno com topografia plana. Os clones selecionados apresentavam desenvolvimento médio representativo para o povoamento, com fuste linear e boas condições fitossanitárias. A amostragem dos clones foi realizada em plantios comerciais para fins siderúrgicos, pertencentes à empresa V&M Florestal, na região de Paraopeba, estado de Minas Gerais, localizada a 19°S, 44°W, com altitude de 700 m e com chuva anual total de 1.315 mm.

Escolheu-se uma árvore de cada clone com o intuito de se realizar o mapeamento das principais características químicas e físicas para fins energéticos. A utilização de apenas uma árvore objetivou a eliminação da variação das propriedades entre indivíduos. As árvores selecionadas foram cortadas a cada 5 m de comprimento, da base até os 15 m de altura, identificadas e encaminhadas para a Unidade Experimental de Desdobro e Secagem da Madeira da UFLA (Figura 2).



Figura 2 Toras de 5 m dos dois clones de *Eucalyptus* spp. utilizados no experimento

As toras foram subdivididas com o auxílio de um motosserra em toretes 150 cm de comprimento e discos de 5 cm de espessura. Os toretes (150 cm) foram desdobrados em serra de fita para a obtenção de pranchões de aproximadamente 10 cm de espessura (Figura 3) e os discos de 5 cm foram empregados na determinação da densidade básica. A amostragem ao longo do fuste da árvore e a subdivisão das toras de 5 m encontram-se na Figura 4.



Figura 3 Pranchões de 10 cm de espessura, obtidos com o desdobro em serra de fita dos toretes de 150 cm

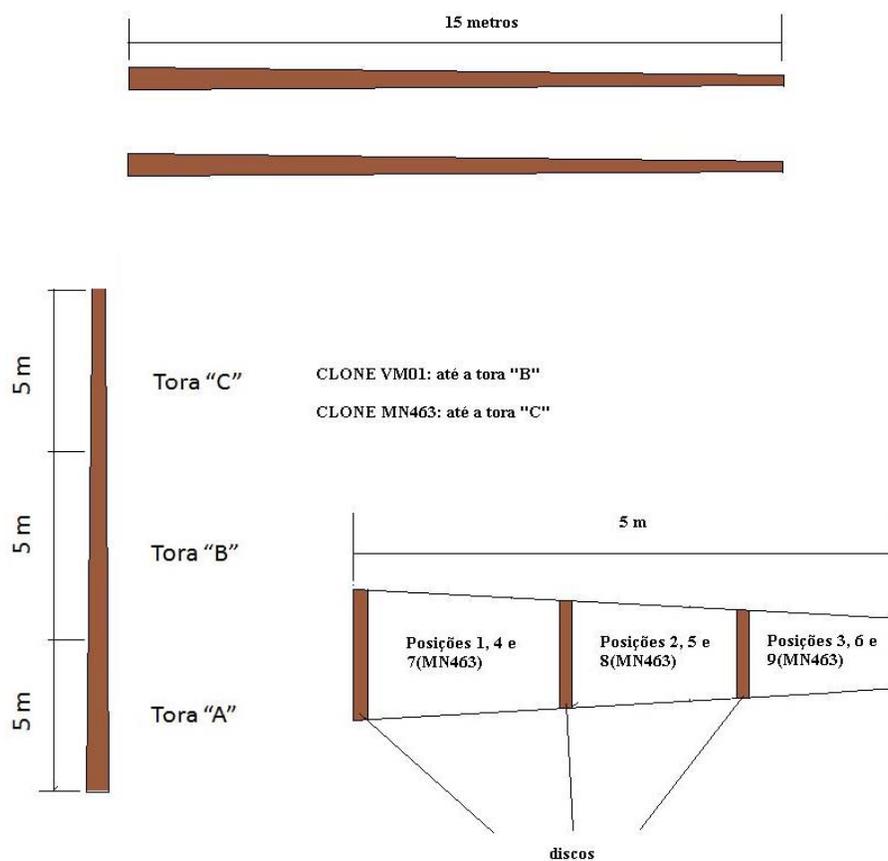


Figura 4 Esquema de corte das árvores e das toras de 5 m, dos dois clones de *Eucalyptus* spp. utilizados no experimento

3.1.1 Preparação dos corpos-de-prova para avaliação e carbonização

Os pranchões de 10 cm de espessuras (Figura 3) foram secos ao ar por um mês e após a secagem foram aplainados no Laboratório de Usinagem da Madeira da UFLA. Foi obtido o maior número de corpos de prova de 5 x 5 x 10 cm, isentos de defeitos, de cada árvore (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING

MATERIALS - ASTM, 2000). Os corpos de prova foram acondicionados em sala climatizada a $20\pm 1^{\circ}\text{C}$ e $65\pm 2\%$ de umidade relativa do ambiente, até a estabilização da umidade.

A partir da árvore selecionada do clone VM01, foram obtidas 5 amostras por torete, até a altura correspondente aos 10 m (6 posições), totalizando 30 corpos de prova. Da árvore do clone MN463, foram selecionadas 4 amostras por torete até a altura correspondente aos 15 m da árvore (9 posições), totalizando 36 posições. Em virtude da quantidade de defeitos e a necessidade de várias amostras por posição, o clone VM01 foi amostrado somente em parte.

De cada posição, um dos cinco corpos de prova foi transformado em cavacos em moinho de disco e, em seguida, foram moídos em moinho de facas tipo Wiley, para as análises dos componentes químicos, totalizando 15 amostras. Esta etapa foi realizada na Unidade de Química da Madeira do Laboratório “Marcos Laureano Teixeira”, da UFLA. O material moído de cada amostra foi então peneirado, para a separação granulométrica, em agitador com peneiras de 40, 60 e 200 mesh, sendo aproveitados aqueles retidos nas peneiras de 60 mesh para as análises químicas e poder calorífico e a de 200 mesh para a análise elementar e termogravimétrica. Os corpos de prova restantes foram utilizados na avaliação do carvão.

3.2 Avaliação da madeira

3.2.1 Análise elementar

A análise elementar foi realizada com parte da fração de 200 mesh, para a quantificação dos elementos carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N). Para tanto se utilizou o analisador elementar do Laboratório de Energia da Biomassa Florestal da UFLA. Foi utilizado o hélio como gás de arraste e o oxigênio como

gás de ignição. Para a identificação dos elementos em seus picos de leitura foi utilizado o programa EAS Vario Micro CHNS-O Standard[®]. Foi realizada uma leitura de cada uma das 15 amostras retiradas dos caules das duas árvores, em alíquotas de 3 mg, previamente secas em estufa.

3.2.2 Extrativos totais

A quantificação de extrativos totais (ET) foi realizada de acordo com a norma D1107-96 R01 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM, 2001b). Para tanto, foi utilizada a sequência de extração álcool etílico e tolueno (2:1), álcool etílico e água quente, por seis, quatro e duas horas, respectivamente. Após a lavagem, a madeira livre de extrativos foi seca em estufa de esterilização por 20 horas, a 60°C e, por 4 horas, a 100°C, para a determinação gravimétrica. Também foi realizada uma análise por amostra, sendo as seis amostras do clone VM01 e as nove amostras do clone MN463, totalizando 15 amostras.

3.2.3 Lignina ácida

Os teores de lignina foram determinados pelo método Klason. Utilizou-se a madeira livre de extrativos da análise que foram novamente climatizadas para compensar o efeito da umidade ambiente e tiveram novamente sua umidade de equilíbrio determinada, sendo que as amostras foram submetidas a ataque por ácido sulfúrico a 72%, por uma hora, sob temperatura de 30°C, conforme a norma D1106-96 R01 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM, 2001a) adaptada por Gomide e Demuner (1986). O resíduo sólido da reação foi utilizado na determinação gravimétrica da lignina insolúvel (LI) e o

filtrado diluído para a determinação da lignina solúvel (LS) (GOLDSCHIMD, 1971); obteve-se também a lignina total (LT) através da equação: $LT = LI + LS$.

3.2.4 Holocelulose

O teor de holocelulose da madeira (HOL) foi obtido pela diferença em relação à soma dos teores de extrativos totais e ligninas totais. Portanto, neste estudo, o teor de minerais foi considerado apenas para o carvão.

3.2.5 Poder calorífico superior

Para a determinação do poder calorífico superior (PCS), foi utilizado um calorímetro adiabático digital modelo IKA C-200, do Laboratório de Energia da Biomassa Florestal da UFLA, de acordo com a norma NBR8633-94 (ABNT, 1994). Quinze amostras de serragem com granulometria entre 40 e 60 mesh foram secas em estufa de esterilização, por uma hora. Em seguida, aproximadamente 0,5 g de cada amostra seca foi pesado dentro um cadinho tarado em balança semi-analítica, conforme procedimento do Laboratório de Energia da Biomassa da UFLA.

3.2.6 Termogravimetria

Outra parte do material com granulometria menor que 200 mesh foi levado para Unidade de Pesquisa em Energia (UPR 42) do Departamento de Desempenho de Sistemas de Produção e de Transformação Tropicais (PERSYST) do CIRAD, para a análise termogravimétrica. Foram carbonizadas nove amostras de 30 mg cada uma, do clone MN463 até 1000°C, partindo-se de uma temperatura inicial de 60°C, taxa de aquecimento de 0,5°C.min⁻¹ e pressão

de 1 atm, utilizando-se o nitrogênio como gás inerte ($30 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$), sendo que os valores das massas, em função da variação da temperatura, foram coletados simultaneamente em um programa de computador. Foram comparadas as curvas de decomposição térmica da madeira nas posições longitudinais da árvore para se localizar a região ou as regiões do caule avaliadas com maior potencial para o uso siderúrgico.

3.2.7 Densidade básica

A densidade básica (Db) foi realizada nos discos selecionados de cada árvore escolhida, de acordo com a NBR 11941-03 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2003). Foram utilizados seis discos adjacentes aos toretes amostrados do clone VM01 e nove discos do clone MN463 e obtidas duas cunhas opostas de cada disco, com ângulo interno de 30° na região medular. Este experimento foi realizado no Laboratório de Química da Madeira do Departamento de Ciências Florestais da UFLA.

3.3 Carbonização

Foram obtidos, das duas árvores, 51 corpos de prova para carbonização, sendo 24 para o clone VM01 (6 posições longitudinais x 4 temperaturas finais) e 27 para o clone MN463 (9 posições longitudinais x 3 temperaturas finais). Cada uma das quatro amostras de cada posição (6) do clone VM01 foi carbonizada até as temperaturas finais de 350°C , 450°C , 550°C e 900°C e as amostras de cada uma das 9 posições do clone MN463 foram carbonizadas até as temperaturas finais de 350°C , 450°C e 550°C , em forno do tipo mufla com sistema de recuperação de gases e controle computadorizado de tempo e temperatura. A

temperatura inicial foi de 60°C, para todas as carbonizações e a taxa de aquecimento foi de 0,5°C.min⁻¹.

3.4 Avaliação do carvão

3.4.1 Rendimento gravimétrico da carbonização

O rendimento gravimétrico da carbonização (RGC), com base em massa seca, foi obtido de acordo com a NBR 8112-86 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1986).

3.4.2 Análise química imediata

Foi determinada a umidade (UMID) e realizada a análise química imediata do carvão por meio da norma NBR 8112-86 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1986), obtendo-se o teor de carbono fixo (TCF), de materiais voláteis (TMV) e o teor de cinzas (TCZ) nas diferentes temperaturas finais de carbonização. Para a preparação do material utilizou-se o moinho de facas e aproveitou-se o material que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retido na peneira de 60 mesh.

3.5 Determinação do coeficiente de variação

Para os ensaios químicos e de poder calorífico, foi realizada a determinação do coeficiente de variação; para tal, selecionaram-se vinte corpos de prova de uma mesma posição axial da árvore (1,2 m de altura), que foram preparados a exemplo das amostras do experimento. Cada amostra foi

considerada como uma repetição. Com os resultados obteve-se o coeficiente de variação de cada análise (Anexos Tabela 1A, 1B e 1C).

3.6 Análises dos resultados

Todos os dados foram inseridos em planilha eletrônica e foi feita a estatística descritiva para as características da madeira (densidade básica, extrativos totais, lignina solúvel, lignina insolúvel, composição elementar e poder calorífico), para a qualidade do carvão (umidade, rendimento gravimétrico da carbonização, teor de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas), relativos às diferentes temperaturas finais de carbonização. Para isso, foi utilizado o programa estatístico Minitab[®]. Os dados termogravimétricos do clone MN463 foram inseridos em planilha eletrônica e elaboraram-se as curvas termogravimétricas por dispersão, obtendo-se o coeficiente de determinação como parâmetro. Foram realizadas também regressões lineares entre as características da madeira e o teor de carbono fixo e rendimento gravimétrico da carbonização para se identificar qual o melhor modelo, e a regressão ‘stepwise’ para se identificar quais as características mais importantes para as principais temperaturas finais e a análise de índice de soma de classificação de Mulamba e Mock (1978), que fornece um índice (ISC) conforme a relevância de cada parâmetro avaliado na posição de amostragem. Este índice classifica as posições partindo da informação prévia se a característica é melhor quanto maior ou menor for o valor obtido na observação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 são apresentados os resultados da estatística descritiva da densidade básica, poder calorífico superior e da análise dos elementos carbono, hidrogênio e nitrogênio do clone de híbrido de *Eucalyptus camaldulensis* x *E. urophylla* (clone VM01) e clone de *Eucalyptus urophylla* (clone MN463).

Tabela 2 Densidade básica, poder calorífico, carbono, hidrogênio e nitrogênio avaliados para o clone de híbrido de *Eucalyptus camaldulensis* x *E. urophylla* (clone VM01) e para o clone de *Eucalyptus urophylla* (clone MN463)

	VM01				
	Densidade básica (Db)	Poder calorífico (PCS)	Carbono (C)	Hidrogênio (H)	Nitrogênio (N)
	[g.cm ⁻³]	[kcal.kg ⁻¹]	[%]	[%]	[%]
Média	0,560	4686	48,9	6,3	0,05
Desvio	0,05	74	1,3	0,2	0,01
CV%	9	2	3	3	13
Mínimo	0,490	4608	47,7	6,1	0,04
Máximo	0,620	4813	51,4	6,7	0,06
	MN463				
	Densidade básica (Db)	Poder calorífico (PCS)	Carbono (C)	Hidrogênio (H)	Nitrogênio (N)
	[g.cm ⁻³]	[kcal.kg ⁻¹]	[%]	[%]	[%]
Média	0,480	4599	48,2	6,2	0,04
Desvio	0,05	56	0,6	0,1	0,01
CV%	11	1	1	2	23
Mínimo	0,430	4534	47,5	6,2	0,03
Máximo	0,570	4718	49,1	6,4	0,06

Pelos dados da Tabela 2, verifica-se que o clone VM01 tem maior densidade básica média que o clone MN463, comparado ao clone MN463. Brito e Barrichello (1977) encontraram valores médios de 0,56 g.cm⁻³ para *Eucalyptus grandis* com sete anos de idade e 0,51 g.cm⁻³ para *E. urophylla* com seis anos de idade. Tendo em vista que o clone MN463 também é de *E. urophylla*, a densidade básica (Db) média ficou ligeiramente abaixo daquela obtida pelos

autores citados. Porém, Lima et al. (2000), ao estudarem 26 clones de *Eucalyptus* spp., obtiveram variação de valores médios de densidade básica entre 0,436 g.cm⁻³ a 0,577 g.cm⁻³, o que ressalta a variação desse fenômeno na madeira deste gênero. Pereira et al. (2000), trabalhando com *E. urophylla*, constataram densidade básica próxima de 0,630 g.cm⁻³. Segundo os mesmos autores, o *E. camaldulensis*, que é uma das espécies formadoras do híbrido que deu origem ao VM01, tem densidade básica média de 0,60 g.cm⁻³, acima da obtida para este experimento.

Os valores médios do poder calorífico superior e dos teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio também foram superiores para o primeiro clone (clone VM01). Arantes (2008) observou, para árvores de um clone de híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla* com seis anos de idade, valores médios de 50,14% de carbono, 6,35 % de hidrogênio e 0,03% de nitrogênio, muito próximos, portanto, do observado para o VM01. Grotkjær et al. (2003) observaram, para espécies de *Eucalyptus*, valores de 44% para o carbono, 5,5% para o hidrogênio e 0,33% para o nitrogênio. Portanto, os clones MN463 e VM01 se mostraram superiores. Antal Junior et al. (2000) obtiveram, para madeira de *Eucalyptus* sp., teores médios de 52,87% de carbono, 6,14% de hidrogênio e 0,16% de nitrogênio. Pinheiro et al. (2006) verificaram teores de 49,3%, 5,7% e 0,1% de carbono, hidrogênio e nitrogênio, respectivamente, para *E. grandis* com sete anos de idade, todos próximos dos resultados obtidos neste estudo. Jara (1989) encontrou poder calorífico superior de 4738,9 kcal.kg⁻¹ (19.481 kJ.kg⁻¹) para *Eucalyptus* sp. com 5 anos de idade, ligeiramente superior aos clones estudados.

No Gráfico 1 pode-se observar a variação longitudinal da densidade básica até os 15 m de altura da árvore, dos clones de híbrido de *Eucalyptus camaldulensis* x *E. urophylla* (clone VM01) e do clone de *E. urophylla* (clone MN463) e, no Gráfico 2, a variação longitudinal do poder calorífico até os 15 m de altura, para os mesmos clones.

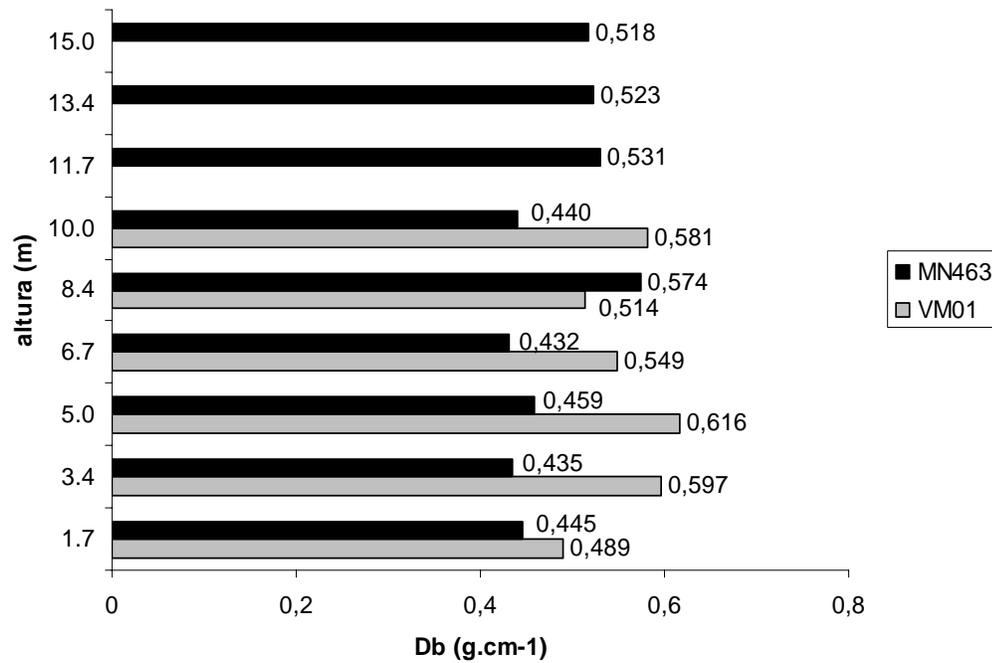


Gráfico 1 Densidade básica (Db) nas posições longitudinais do clone de híbrido de *Eucalyptus camaldulensis* × *E. urophylla* (clone VM01) e do clone de *Eucalyptus urophylla* (clone MN463)

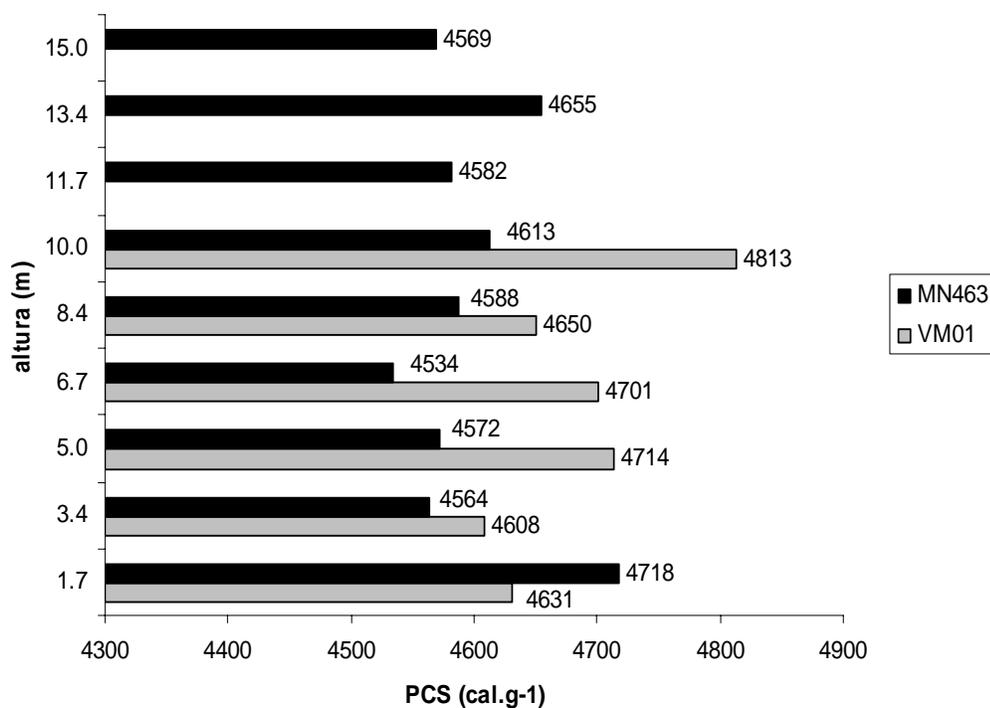


Gráfico 2 Variação do poder calorífico superior (PCS) em função da posição longitudinal, do clone de híbrido de *Eucalyptus camaldulensis* × *E. urophylla* (clone VM01) e do clone de *Eucalyptus urophylla* (clone MN463)

Pelo Gráfico 1, verifica-se um patamar maior da densidade básica média da madeira na região da última tora de 5 m (11,7 m, 13,4 m e 15 m). Arantes (2008), ao avaliar um clone de *E. grandis* x *E. urophylla* com seis anos de idade, encontrou maiores valores de densidade básica para classes diamétricas de 12,8 a 17 cm e 9,7 a 12,7 cm. Em relação à amostragem para a avaliação longitudinal da densidade básica de madeira de eucalipto, Pádua (2009) testou diferentes métodos de amostragem (tradicional, alternativo e de metro em metro) e observou diferenças significativas em todos eles, sendo que a densidade determinada entre o 1,10 m e 1,50 m foi a que apresentou a melhor correlação com os três métodos.

Em relação ao poder calorífico, observa-se, no Gráfico 2, tendência de aumento a partir da posição 2, que está a aproximadamente 3 m de altura, em direção às posições superiores amostradas. No Gráfico 3 observa-se que o comportamento do teor de lignina do clone (MN463) tendeu a diminuir com a altura em oposição à densidade básica (Db).

Na Tabela 3 apresenta-se a estatística descritiva para a avaliação dos principais componentes químicos da madeira do clone de *E. urophylla* (clone MN463) e clone de híbrido de *E. camaldulensis* x *E. urophylla* (clone VM01).

Tabela 3 Componentes químicos da madeira avaliados para o clone de híbrido de *Eucalyptus camaldulensis* × *E. urophylla* (clone VM01) e para o clone de *Eucalyptus urophylla* (clone MN463)

	VM01				
	Extrativos totais (ET)	Lignina insolúvel (LI)	Lignina solúvel (LS)	Lignina total (LT)	Holocelulose (HOL)
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Média	6,03	25,0	3,8	28,8	65
Desvio	0,77	1,2	0,6	1,0	1
CV%	12,8	4,9	15,1	3,4	2
Mínimo	4,5	22,5	2,9	27,1	64
Máximo	6,5	25,6	4,6	29,8	67
	MN463				
Média	5,39	23,7	3,7	27,3	67
Desvio	0,70	1,98	0,2	1,8	2
CV%	12,9	8,4	6,0	6,6	3
Mínimo	4,1	21,9	3,3	25,7	64
Máximo	6,6	27,1	4,0	30,4	69

Pelos dados da Tabela 3 pode-se observar maiores teores de extrativos totais, lignina insolúvel e solúvel do clone VM01 em relação aos do clone MN463. Arantes (2008) observou, para clones de *E. grandis* × *E. urophylla* com seis anos de idade, valores médios de 26,05% para lignina insolúvel e 3,05% de lignina solúvel. No entanto, o teor de lignina solúvel foi inferior, pois, para os dois clones deste estudo, obtiveram-se valores médios de 3,7% e 3,8%, respectivamente. Antal Junior et al. (2000) obtiveram, para *Eucalyptus* sp., 25,3% de teor médio de lignina total, o que pode ser considerado baixo, enquanto Pereira et al. (2000) encontraram teores de lignina acima de 30% para *E. urophylla* e *E. camaldulensis*, separadamente.

A variação longitudinal dos teores de lignina total, solúvel e insolúvel do clone de *E. urophylla* (clone MN463), nas nove posições longitudinais do caule, pode ser observada no Gráfico 3.

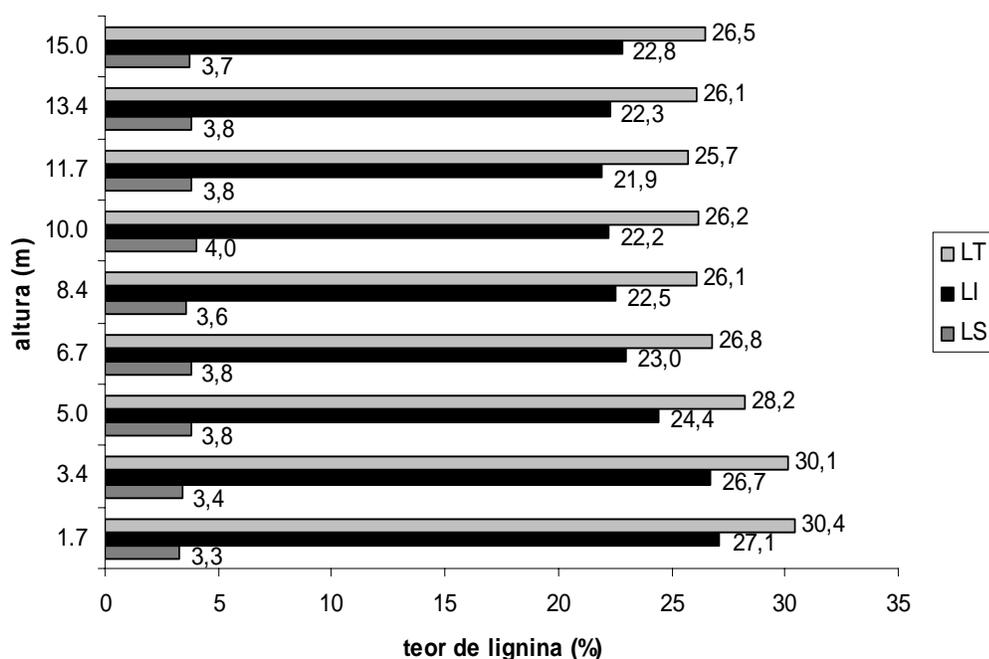


Gráfico 3 Teores de lignina total (LT), lignina insolúvel (LI) e lignina solúvel (LS) nas posições longitudinais do clone de *Eucalyptus urophylla* (clone MN463)

Pode-se observar, no Gráfico 3, uma tendência de redução no teor de lignina insolúvel da base para as posições localizadas nas partes superiores do caule. Esta redução contraria o aumento da densidade básica e do poder calorífico superior observados nos dois gráficos anteriores. Nos Gráficos 4 e 5 mostram-se as porcentagens dos elementos químicos carbono e hidrogênio dos clone MN463 e VM01, os quais apresentaram uma pequena tendência de queda entre as alturas de 8,4 e 11,7 m.

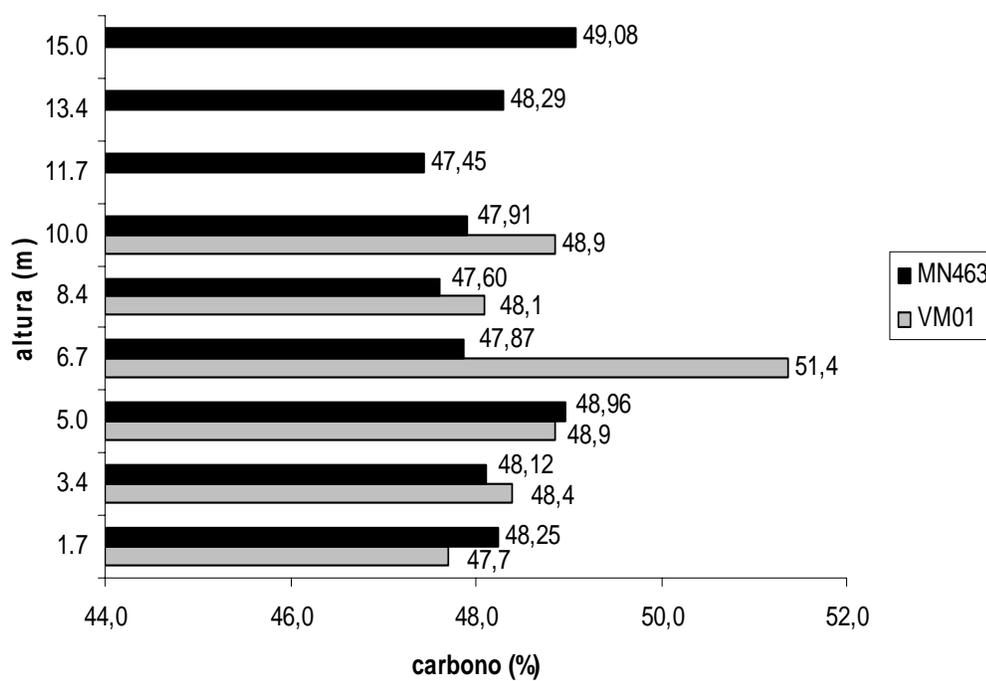


Gráfico 4 Percentagens do elemento carbono (C) nas posições longitudinais do clone de híbrido de *Eucalyptus camaldulensis* × *E. urophylla* (clone VM01) e do clone de *Eucalyptus urophylla* (clone MN463)

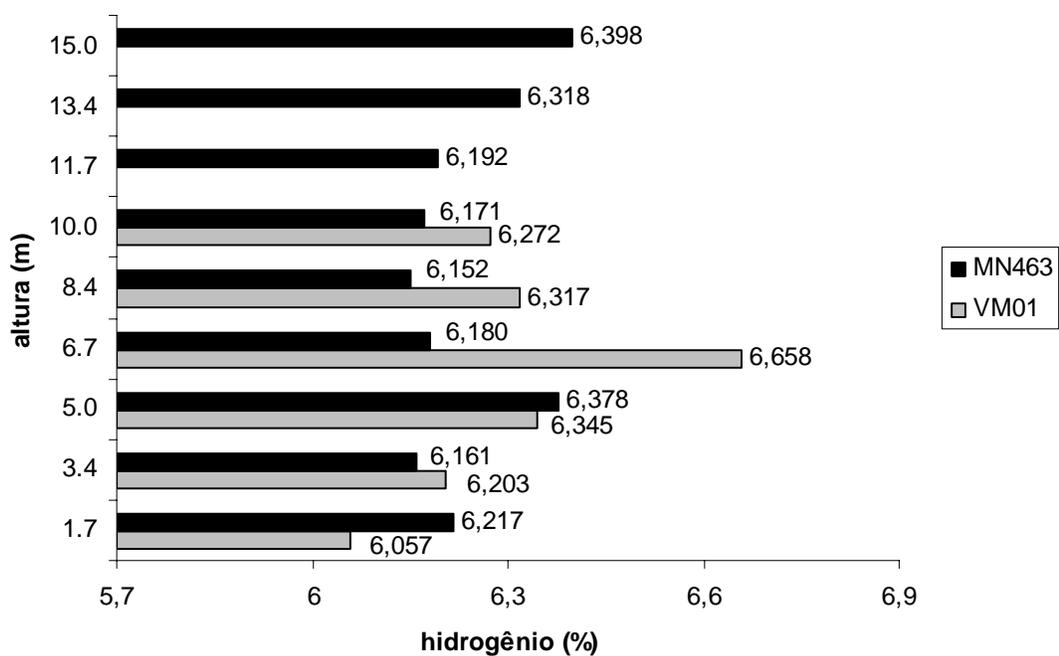


Gráfico 5 Percentagens do elemento hidrogênio (H) nas posições longitudinais do clone de híbrido de *Eucalyptus camaldulensis* × *E. urophylla* (clone VM01) e do clone de *Eucalyptus urophylla* (clone MN463)

No Gráfico 6 observa-se a variação longitudinal dos teores de extrativos totais dos clones MN463 e VM01.

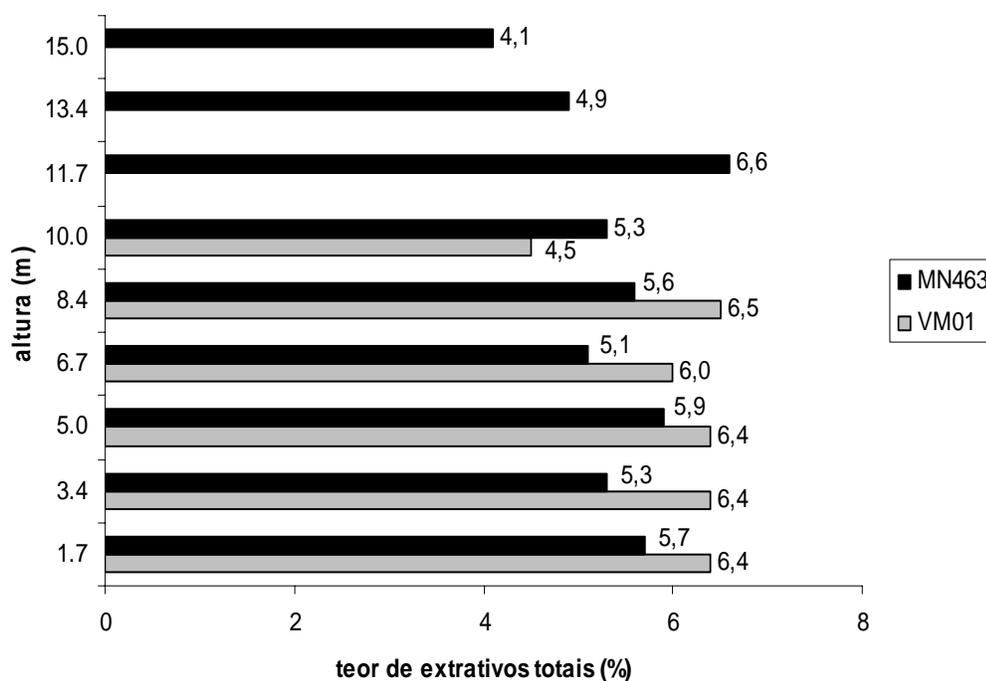


Gráfico 6 Teores de extrativos totais (ET) nas nove posições longitudinais do clone de híbrido de *Eucalyptus camaldulensis* × *E. urophylla* (clone VM01) e do clone de *Eucalyptus urophylla* (clone MN463)

Pode-se observar, pelo Gráfico 6, uma diminuição do teor médio de extrativos para o clone MN463, fenômeno semelhante ao que aconteceu com a lignina e em menor intensidade ao elemento carbono.

Silva et al. (2005) observaram, para *E. grandis*, teores médios de extrativos de 5,11% na base da árvore e 3,46%, aos 6 m de altura. Senelwa e Sims (1999) observaram teores médios de 4,7% de extrativos totais para espécies de *Eucalyptus* provenientes de florestas de rotação curta. Em ambos os trabalhos, os valores médios de extrativos totais estão abaixo do observado para os clones VM01 e MN463.

Na Tabela 4 é apresentada a estatística descritiva da umidade e do rendimento gravimétrico da carbonização em mufla do clone de *E. urophylla* (clone MN463) e do clone de híbrido de *E. camaldulensis* × *E. urophylla* (clone VM01), para as temperaturas finais de carbonização de 350°, 450° e 550°C.

O rendimento gravimétrico da carbonização revelou-se superior no clone VM01 para as três temperaturas finais de carbonização (350°C, 450°C e 550°C). No Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC (1980), a partir da avaliação de diversas madeiras e entre elas *Eucalyptus* sp., observou-se rendimento em carbonização médio de 37,8% na temperatura de carbonização de 400°C e de 31% na temperatura de 500°C. Portanto, os clones VM01 e MN463 revelaram-se de qualidade superior.

Nos Gráficos 7 e 8 apresentam-se a análise química imediata e o rendimento gravimétrico da carbonização do clone de *E. urophylla* (clone MN463) nas nove posições longitudinais e para as temperaturas de carbonização de 350 e 450°C, respectivamente.

Tabela 4 Umidade e rendimento gravimétrico da carbonização para as três temperaturas finais, do clone de híbrido de *Eucalyptus camaldulensis* × *E. urophylla* (clone VM01) e do clone de *Eucalyptus urophylla* (clone MN463)

	VM01					
	Umidade (U)			Rendimento gravimétrico da carbonização (RGC)		
	[%]			[%]		
	350°C	450°C	550°C	350°C	450°C	550°C
Média	5,3	3,2	1,8	42,2	35,5	32,4
Desvio	0,5	0,6	0,3	1,2	2,6	2,4
CV%	9	17	14	3	7	7
Mínimo	4,7	2,2	1,5	40,8	32,5	28,5
Máximo	5,8	3,8	2,2	44,2	39,0	35,4
	MN463					
Média	5,3	3,7	2,2	40,2	33,6	32,1
Desvio	1,5	0,7	0,4	4,3	2,7	2,0
CV%	28	19	18	11	8	6
Mínimo	4,1	2,8	1,6	35,2	28,4	29,7
Máximo	9,0	5,1	2,7	47,8	36,9	35,0

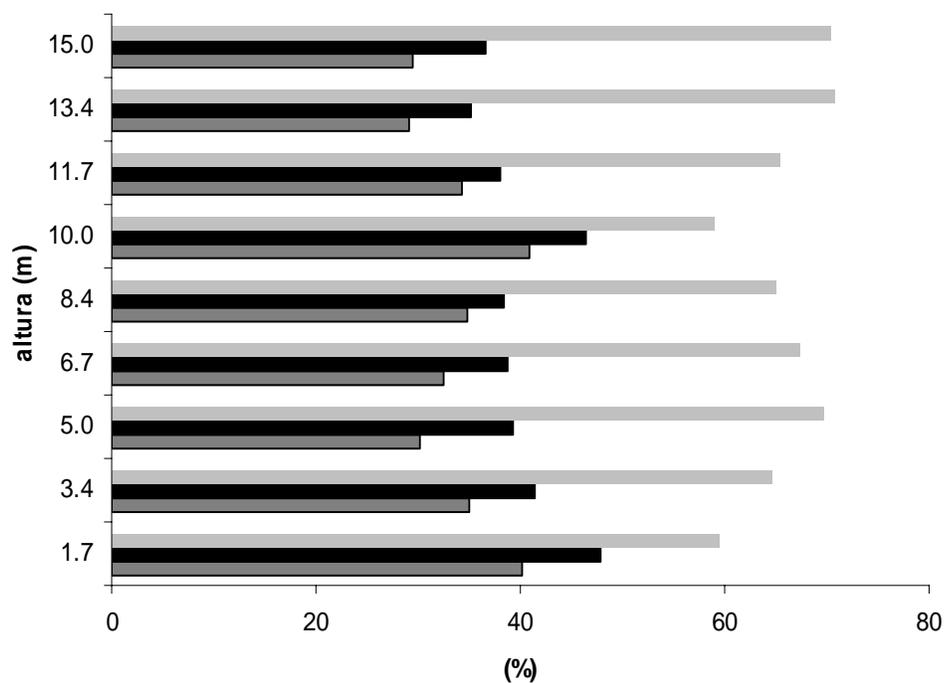


Gráfico 7 Variação longitudinal do teor de materiais voláteis (TMV), do teor de carbono fixo (TCF) e do rendimento gravimétrico da carbonização (RGC), na temperatura final de 350°C de *Eucalyptus urophylla* (clone MN463).

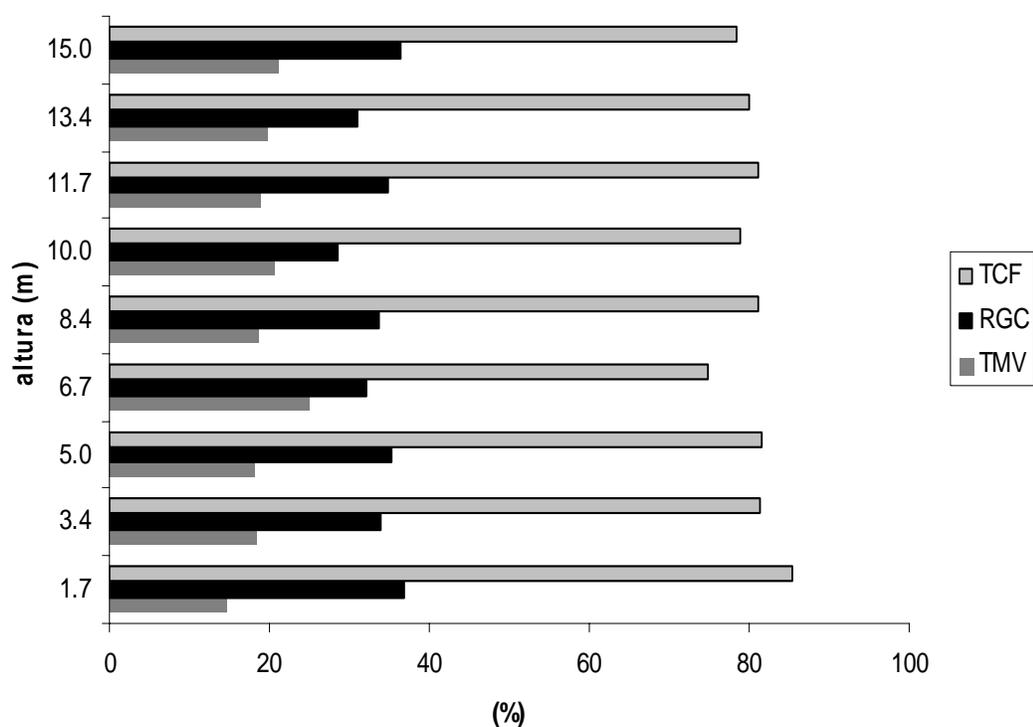


Gráfico 8 Variação longitudinal do teor de materiais voláteis (TMV), do teor de carbono fixo (TCF) e do rendimento gravimétrico da carbonização (RGC), na temperatura final de 450°C de *Eucalyptus urophylla* (clone MN463)

Observa-se, nos Gráficos 7 e 8, entre as posições 5 e 7, uma queda no teor de carbono fixo (TCF) e, conseqüentemente, o aumento do teor de materiais voláteis (TMV) nas duas temperaturas finais de carbonização (350° e 450°C), tendo, aos 450°C, esta influência sido mais suave. Em ambos os casos, porém, este fato influenciou o rendimento gravimétrico da carbonização (RGC), seja diretamente a 350°C ou, inversamente, a 450°C.

Na Tabela 5 apresenta-se a estatística descritiva para as análises de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas, para as temperaturas de 350°C, 450°C e

550°C, do clone de *E. urophylla* (clone MN463) e clone de híbrido de *E. camaldulensis* × *E. urophylla* (clone VM01)

Tabela 5 Análise química imediata do carvão, do clone de híbrido de *Eucalyptus camaldulensis* × *E. urophylla* (clone VM01) e do clone de *Eucalyptus urophylla* (clone MN463)

	Materiais voláteis (TMV)					
	[%]					
	VM01			MN463		
	350°C	450°C	550°C	350°C	450°C	550°C
Média	32,9	18,1	10,4	34,0	19,5	11,7
Desvio	2,7	2,9	1,6	4,4	2,8	3,3
CV%	8	16	16	13	14	28
Mínimo	29,7	14,9	7,5	29,1	14,5	8,0
Máximo	36,1	21,0	12,2	41,0	25,0	17,4
	Carbono fixo (TCF)					
	[%]					
	VM01			MN463		
	350°C	450°C	550°C	350°C	450°C	550°C
Média	66,8	81,7	89,3	65,7	80,5	87,9
Desvio	2,7	2,8	1,6	4,3	3,0	3,5
CV%	4	3	2	7	4	4
Mínimo	63,7	78,9	87,6	58,9	74,9	82,2
Máximo	70,1	84,9	92,1	70,7	85,3	91,7
	Cinzas (TCZ)					
	[%]					
	VM01			MN463		
	350°C	450°C	550°C	350°C	450°C	550°C
Média	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3
Desvio	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
CV%	30	28	20	23	26	25
Mínimo	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
Máximo	0,4	0,3	0,4	0,3	0,4	0,5

Observa-se, pelos dados da Tabela 5, para as três temperaturas finais de carbonização, que os teores médios de materiais voláteis foram superiores para o clone MN463 e, conseqüentemente, os teores médios de carbono fixo para o mesmo clone situaram-se abaixo das médias do clone VM01. O teor médio de cinzas foi idêntico para os dois clones nas respectivas temperaturas. CETEC (1980) encontrou teores médios de carbono fixo de 68% na temperatura final de 300°C e 86% na temperatura final de 500°C. para diversas madeiras. Observaram-se também teores de materiais voláteis de 31% e 13%, para as mesmas temperaturas. Pereira et al. (2000) encontraram valores de 89% de carbono fixo e 10% de materiais voláteis, para um rendimento gravimétrico de carbonização de 30% para *E. urophylla* e *E. camaldulensis* (temperatura final acima de 500°C).

Brito e Barrichello (1977) observaram, para *E. urophylla* de seis anos de idade, teores médios de 75% para o carbono fixo, 24,3% para os materiais voláteis e 0,7% de cinzas, para um rendimento de carbonização de 32% (temperatura final abaixo de 500°C). Antal Junior et al. (1996) observaram, para *Eucalyptus* sp. produzido sob pressão, teores de 75,4% e 23,3%, respectivamente para o carbono fixo e para os materiais voláteis e Grotjkær et al. (2003) encontraram 64% e 21% para material semelhante. Para *E. camaldulensis* de sete anos de idade, Brito e Barrichello (1977) observaram teores de 76%, 23,9% e 0,2%, para os teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas, respectivamente e rendimento gravimétrico de carbonização de 30,7% a partir de madeira com 28,1% de teor de lignina total. Já Brito e Barrichello (1978) alcançaram teores de 79,8%, 13,4% e 0,3%, em suas análises para o carvão obtido a partir da madeira da mesma espécie e idade entre quatro e cinco anos.

Na Tabela 6 apresenta-se a matriz de correlação entre as características da madeira e do carvão, avaliadas para os dois clones, conjuntamente.

Tabela 6 Matriz de correlação de Pearson entre as características da madeira e do carvão dos clones MN463 e VM01, de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus camaldulensis* × *E. urophylla*, avaliados conjuntamente.

Carvão	Db	ET	LI	LS	LT	HOL	PCS	C	H	N
UMID 350°C	-0,1252*	0,2137**	0,0948ns	0,2293**	0,1566*	-0,2103*	-0,2677**	0,2247**	0,2350**	0,2116**
TMV 350°C	-0,3067*	0,0087ns	0,2537**	-0,3746ns	0,1874*	-0,1573*	0,2825*	-0,0152ns	-0,0759ns	-0,2023*
TCZ 350°C	0,3744**	-0,2116*	0,1031*	-0,4304*	0,0110ns	0,0719ns	0,4702**	0,1700*	0,1921*	-0,2683ns
TCF 350°C	0,3019**	-0,0044ns	-0,2570*	0,3849**	-0,1886*	0,1566**	-0,2925*	0,0121ns	0,0726ns	0,2085**
RGC 350°C	-0,2206*	0,2352**	0,5454**	-0,0889ns	0,5710**	-0,5589**	0,4463**	0,1689**	-0,0609ns	0,0290**
UMID 450°C	-0,2123*	-0,3506*	-0,5660*	0,3914**	-0,5225*	0,5631**	-0,5796**	0,0780ns	0,1628*	0,0883ns
TMV 450°C	-0,1472*	-0,1167*	-0,5672*	0,5238*	-0,5025*	0,4573**	-0,6440*	-0,3207*	-0,3260ns	0,3658**
TCZ 450°C	-0,0318ns	-0,4753*	-0,1652ns	-0,1743ns	-0,2201ns	0,3625**	-0,2247*	0,2776**	0,3915**	-0,1010ns
TCF 450°C	0,1483*	0,1271*	0,5826**	-0,5229*	0,5096**	-0,4671**	0,6520**	0,3156**	0,3186**	-0,3656*
RGC 450°C	0,2842**	0,3285**	0,3436**	0,1357*	0,4047**	-0,4580**	0,0792ns	0,0551ns	-0,0921ns	-0,1831ns
UMID 550°C	-0,2775*	0,2166**	-0,4951*	0,2023**	-0,4898*	0,3195**	-0,4084**	-0,1898ns	0,0647ns	0,0668ns
TMV 550°C	0,1789**	-0,2630*	-0,4831ns	0,2619**	-0,4629ns	0,4807**	-0,5160*	-0,1883ns	-0,1113ns	-0,1528ns
TCZ 550°C	0,1453*	-0,0224ns	-0,4585*	-0,1076*	-0,5228*	0,4379**	-0,0393ns	-0,2589*	-0,0725ns	-0,3734ns
TCF 550°C	-0,1828*	0,2642**	0,4959**	-0,2583*	0,4775**	-0,4932**	0,5173**	0,1961**	0,1142*	0,1635*
RGC 550°C	0,2877**	-0,0668ns	-0,0153ns	0,1285*	0,0135ns	0,0144ns	-0,0132ns	0,0645ns	-0,0896ns	-0,4165*

** : significativo a 99% ($\alpha = 0,01$) de probabilidade; * : significativo a 95% ($\alpha = 0,05$) de probabilidade; ns: não significativo; Db: densidade básica; ET: extrativos totais; LI: lignina insolúvel; LS: lignina solúvel; LT: lignina total; HOL: holocelulose; PCS: poder calorífico superior; C: carbono; H: hidrogênio; N: nitrogênio; UMID 350°C: umidade a 350°C; TMV 350°C: teor de materiais voláteis a 350°C; TCZ 350°C: teor de cinzas a 350°C; TCF 350°C: teor de carbono fixo a 350°C; RGC 350°C: rendimento gravimétrico da carbonização a 350°C; UMID 450°C: umidade a 450°C; TMV 450°C: teor de materiais voláteis a 450°C; TCZ 450°C: teor de cinzas a 450°C; TCF 450°C: teor de carbono fixo a 450°C; RGC 450°C:

rendimento gravimétrico da carbonização a 450°C; UMID 550°C: umidade a 550°C; TMV 550°C: teor de materiais voláteis a 550°C; TCZ 550°C: teor de cinzas a 550°C; TCF 550°C: teor de carbono fixo a 550°C; RGC 550°C: rendimento gravimétrico da carbonização a 550°C

Pode-se observar, pelos dados da Tabela 6, correlações altamente significativas do poder calorífico superior (PCS) e da lignina insolúvel (LI) e, por conseguinte, da lignina total (LT) com teor de carbono fixo nas temperaturas finais de carbonização de 450°C (TCF 450°C) e 550°C (TCF 550°C). Em relação ao rendimento gravimétrico da carbonização, obteve-se correlações altamente significativas apenas para as ligninas insolúvel e total, nas temperaturas finais de 350°C e 450°C (RGC 350°C e RGC 450°C), sendo que nesta última temperatura (450°C), os extrativos totais (ET) também se correlacionaram bem com o rendimento. Em relação ao elemento carbono, este obteve a melhor correlação para o teor de carbono fixo aos 450°C (TCF 450°C), o mesmo ocorrendo para o hidrogênio. Já a holocelulose (HOL) obteve correlações negativas nesta temperatura, bem como na temperatura de 550°C, mas as melhores correlações com o RGC foram até os 450°C. Em relação a densidade (Db), as melhores correlações para o rendimento foram a partir dos 450°C.

Nos Gráficos 9 e 10, observa-se o comportamento do poder calorífico e da lignina total da madeira para o carvão, nas temperaturas finais de 450°C e 550°C.

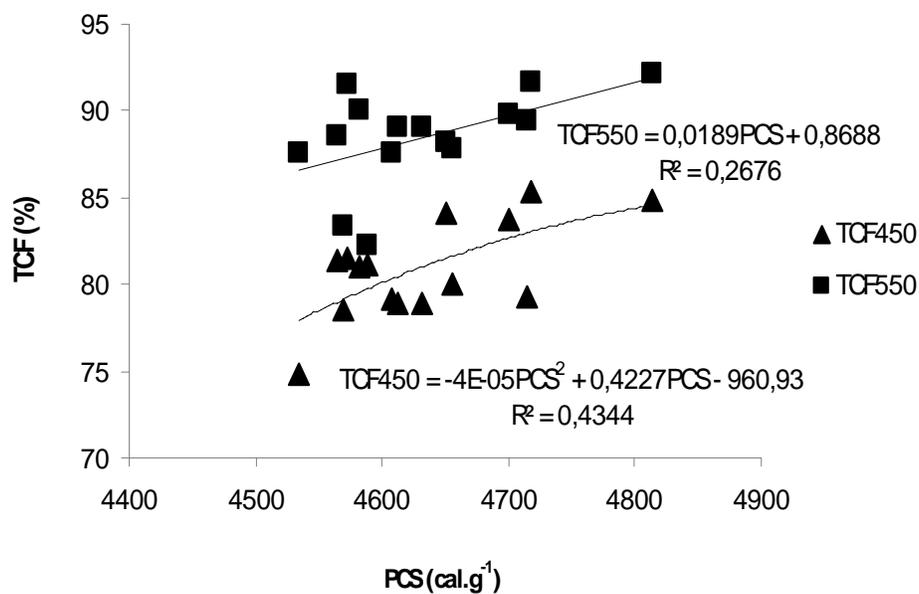


Gráfico 9 Teor de carbono fixo do carvão (TCF) em função do poder calorífico superior (PCS) da madeira obtidos para o clone VM01 e MN463, nas temperaturas finais de carbonização de 450° (TCF450) e 550°C (TCF550)

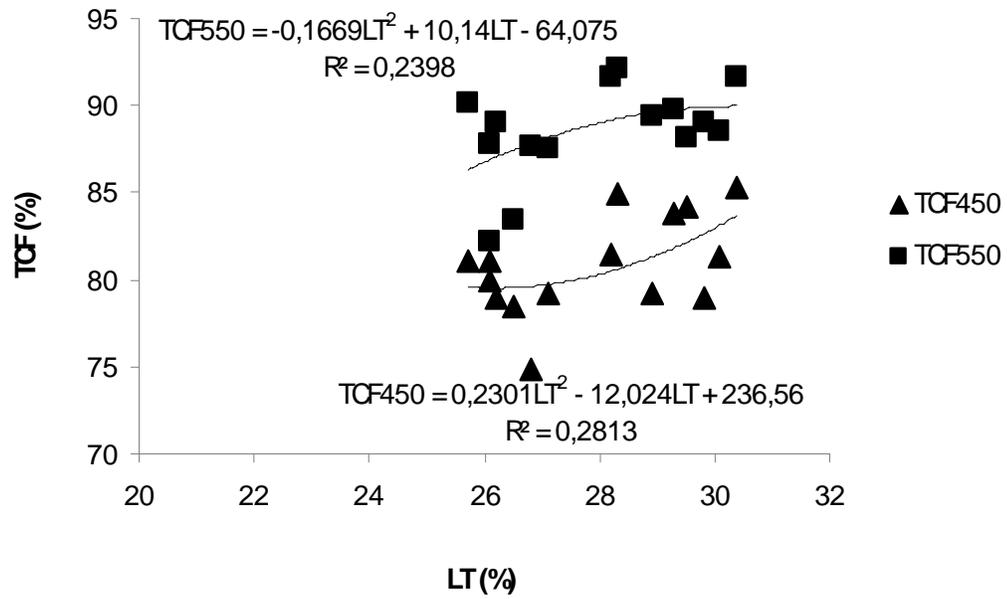


Gráfico 10 Teor de carbono fixo do carvão (TCF) em função do teor de lignina total (LT) dos clones VM01 e MN463, nas temperaturas finais de carbonização de 450° (TCF 450) e 550°C (TCF 550)

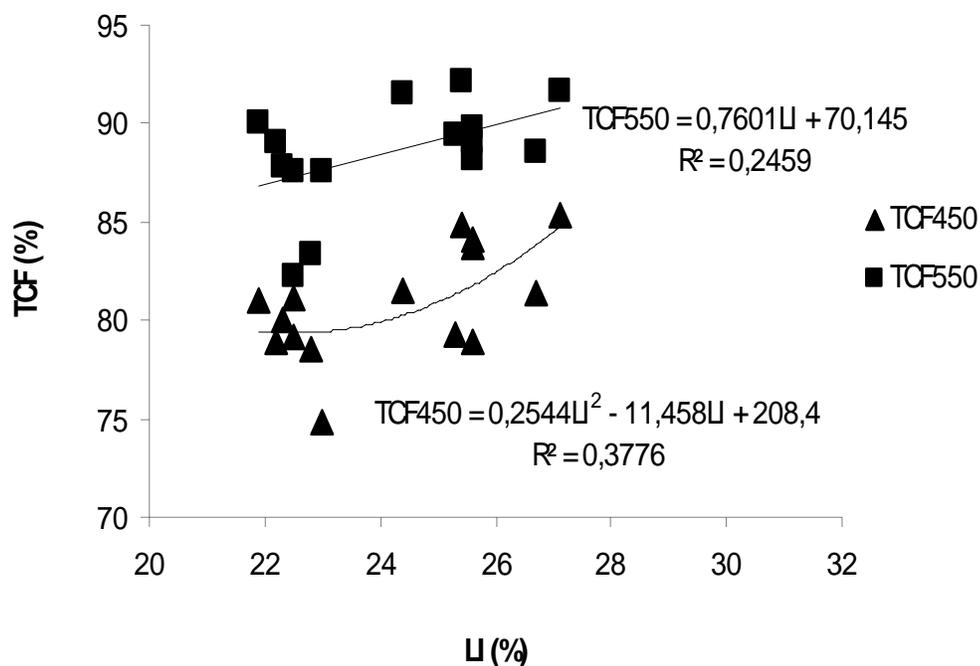


Gráfico 11 Teor de carbono fixo do carvão (TCF), em função do teor de lignina insolúvel (LI) dos clones VM01 e MN463, nas temperaturas finais de carbonização de 450° (TCF450) e 550°C (TCF550)

Observa-se, pelos Gráficos 9, 10 e 11, que o aumento dos teores de lignina total e insolúvel não influenciou muito o poder calorífico, na temperatura final de 450°C quanto foi no processo que empregou a temperatura final de carbonização de 550°C. Isso pode ser confirmado por meio do Gráfico 9, em que podem-se observar tendências de aumento nos teores de carbono fixo, nas duas temperaturas, para os dois clones, com o aumento do poder calorífico da madeira. Se forem considerados os extrativos totais e de acordo com o Gráfico 12, pode-se observar que, na temperatura final de 350°C, este componente da madeira tem um efeito inverso no rendimento gravimétrico da carbonização (RGC).

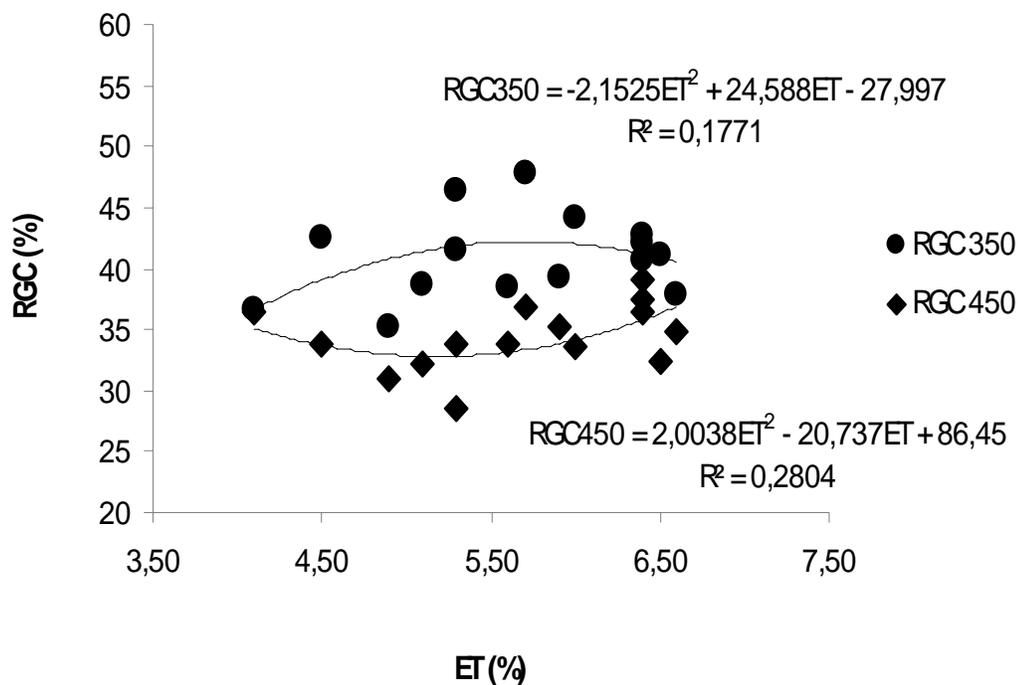


Gráfico 12 Rendimento gravimétrico da carbonização (RGC) em função dos teores de extrativos totais (ET) dos clones VM01 e MN463, nas temperaturas finais de carbonização de 350° (TCF350) e 450°C (TCF450)

No Gráfico 13 pode-se observar o modelo da curva termogravimétrica realizada para o clone MN463 no forno ATG-CIRAD (Posição 1). A variação dos coeficientes de determinação (R^2) das curvas ajustadas nas nove posições estudadas está representada no Gráfico 14.

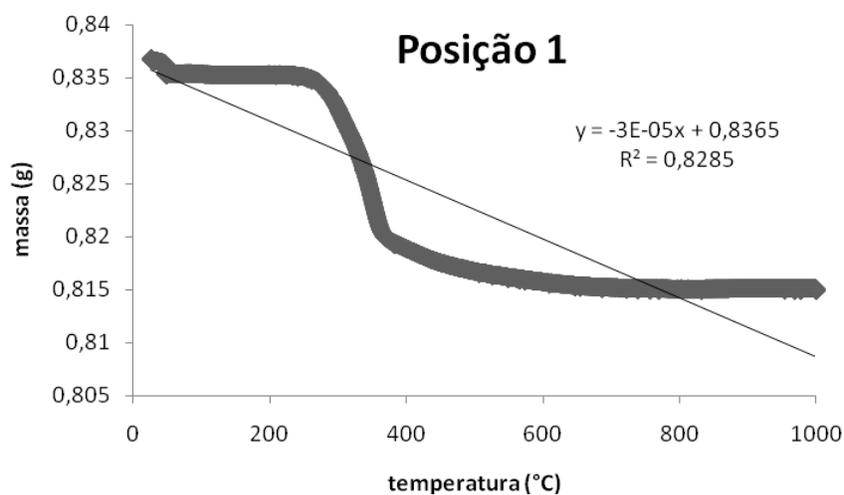


Gráfico 13 Curva termogravimétrica e coeficiente de determinação (R^2) da carbonização no forno ATG-CIRAD, da madeira do clone de *Eucalyptus urophylla* (clone MN463) na posição 1

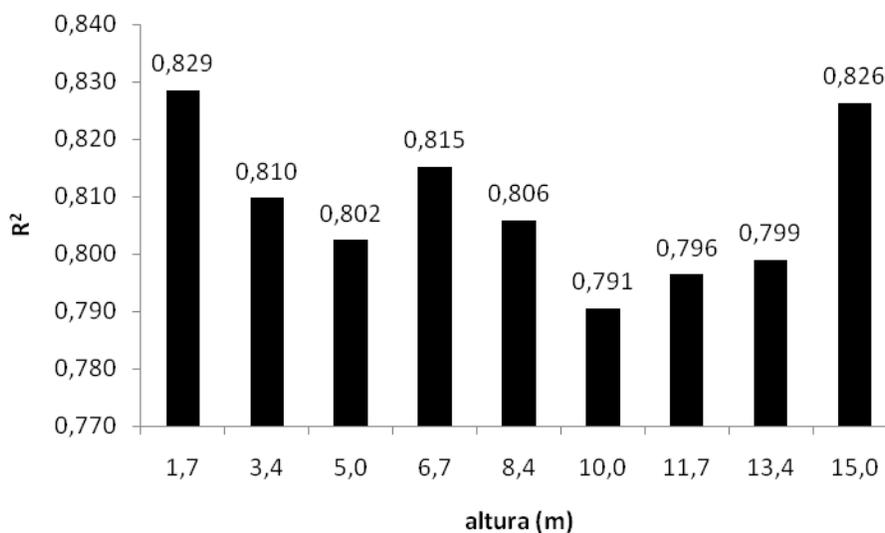


Gráfico 14 Coeficientes de determinação (R^2) das curvas termogravimétricas da madeira nas nove posições do clone MN463

Pode-se observar, pelo Gráfico 14, que o coeficiente de determinação (R^2) das curvas tende a decrescer com o aumento da altura da árvore; isso significa que uma curva termogravimétrica mais suave é mais distante da curva termogravimétrica da lignina, por exemplo, para uma amostra com menos lignina. Isso ocorre mesmo com a tendência de aumento da densidade básica longitudinal e do poder calorífico superior que é observado nos Gráficos 1 e 2 e se deve, principalmente, à diminuição no sentido longitudinal dos teores de lignina observados no Gráfico 3.

Tabela 7 Correlações de Pearson entre a análise termogravimétrica (ATG) e outras características da madeira avaliadas para o clone MN463

	Análise termogravimétrica (ATG)
Densidade básica (Db)	-0,1477
Extrativos totais (ET)	-0,4217
Lignina insolúvel (LI)	0,5427
Lignina solúvel (LS)	-0,6796
Lignina total (LT)	0,5137
Holocelulose (HOL)	-0,3178
Poder calorífico superior (PCS)	0,1694
Carbono (C)	0,4228
Hidrogênio (H)	0,2279

Considerando-se o processo, pode-se observar, nos Gráficos 15, 16 e 17, um aumento do coeficiente de determinação (R^2) com o aumento da temperatura final de carbonização nas regressões lineares entre o teor de extrativos totais e os teores de carbono fixo, nas três temperaturas de carbonização empregadas para o clone MN463, provavelmente devido a eliminações deste componente com o aumento da temperatura.

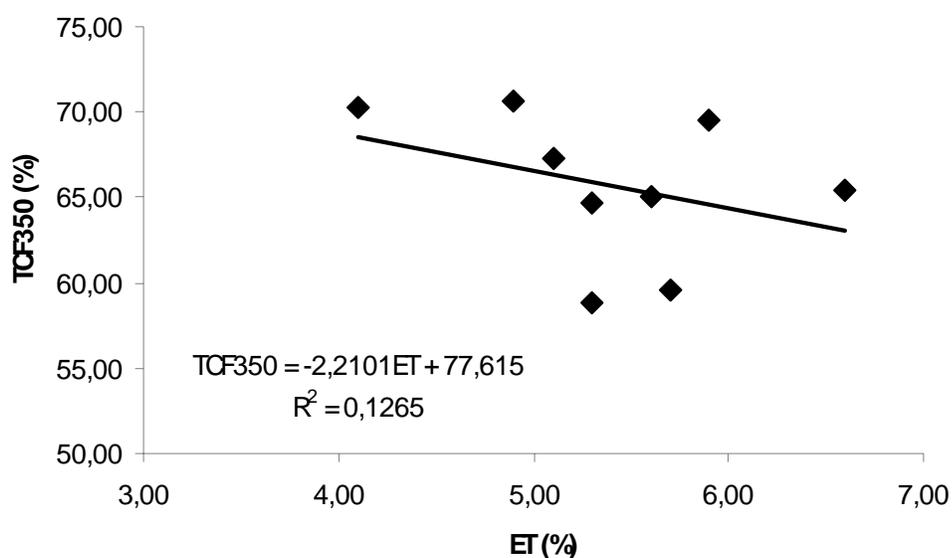


Gráfico 15 Teores de carbono fixo (TCF 350°C) em função dos extrativos totais (ET) das nove posições longitudinais na temperatura de 350°C do clone de *Eucalyptus urophylla* (clone MN463)

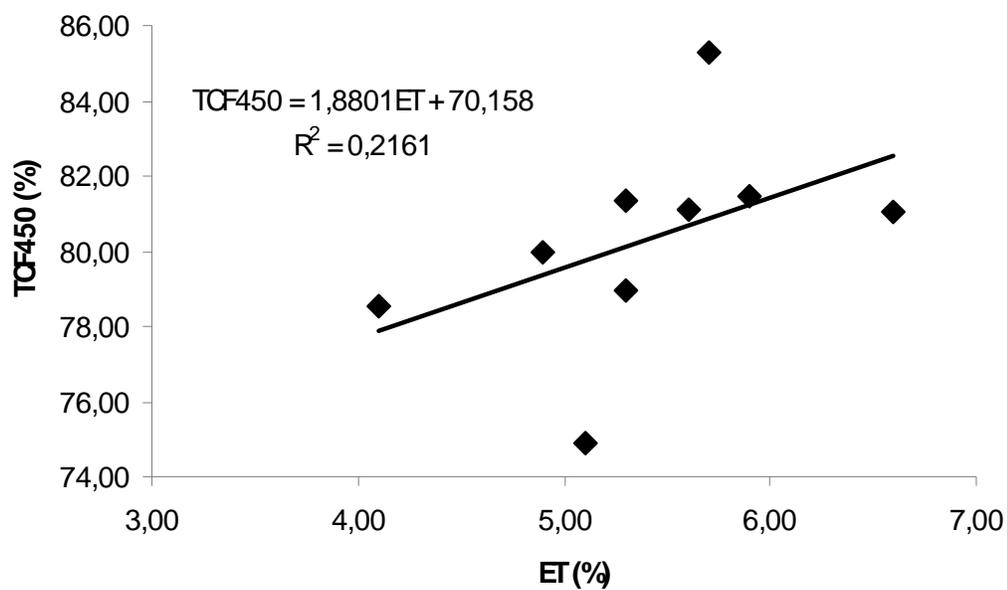


Gráfico 16 Teores de carbono fixo (TCF 450°C) em função dos extrativos totais (ET) das nove posições longitudinais na temperatura de 450°C do clone de *Eucalyptus urophylla* (clone MN463)

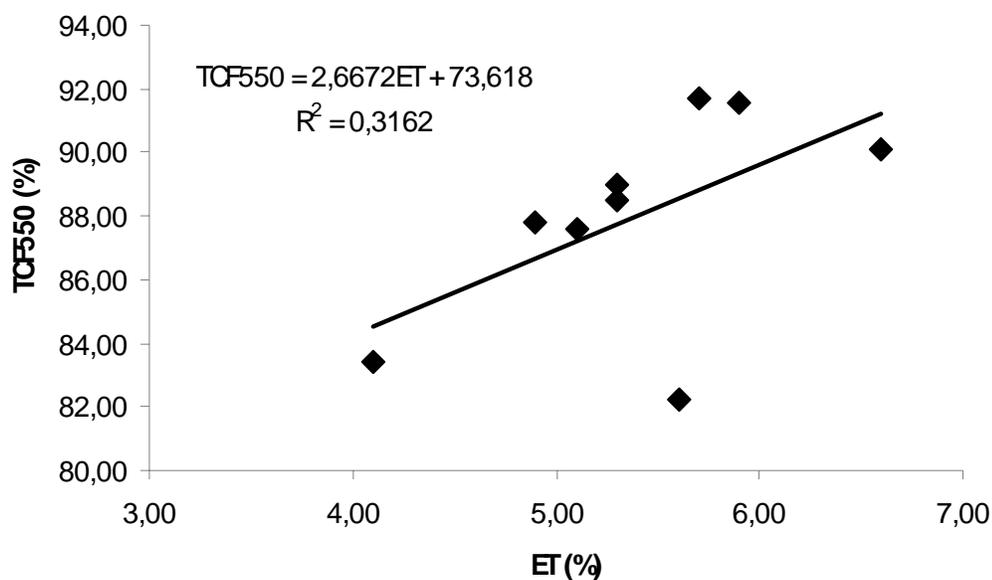


Gráfico 17 Teores de carbono fixo (TCF 550°C) em função dos extrativos totais (ET) das nove posições longitudinais na temperatura de 550°C do clone de *Eucalyptus urophylla* (clone MN463)

Os modelos de regressão ajustados para as principais características da madeira e do carvão estão listados na Tabela 8. Os resultados da regressão “stepwise” com o valor-t, o coeficiente de determinação e o desvio padrão dos teores de carbono fixo (TCF) e rendimento gravimétrico da carbonização (RGC) nas temperaturas finais de 450°C e 550°C podem ser observados nos Anexos Tabelas 1E a 1H.

Observa-se pela Tabela 8 que, para os teores de carbono fixo nas temperaturas de 450°C e 550°C (TCF 450°C e TCF 550°C), obteve-se um alto coeficiente de determinação com a maioria das variáveis da madeira (dependentes); na temperatura final de 900°C, as relações somente foram boas em relação aos elementos da madeira avaliados (carbono, hidrogênio e nitrogênio). O rendimento gravimétrico da carbonização também apresentou

resultados satisfatórios nessas faixas de temperatura, porém no caso da lignina foi considerada apenas a lignina total para as temperaturas de 450°C e 550°C (RGC 450°C e RGC 550°C) e para o RGC 900°C foram importantes apenas a densidade, o poder calorífico, e os elementos carbono e nitrogênio. Na temperatura de 550°C, o valor-p foi baixo tanto para o teor de carbono fixo quanto para o rendimento gravimétrico da carbonização.

Tabela 8 Modelos de regressão ajustados para as principais características da madeira e do carvão dos clones MN463 e VM01, de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus camaldulensis* × *E. urophylla*, respectivamente.

Variável dependente	Constante	Variáveis independentes									Parâmetros		
		Db	PCS	LS	LI	LT	ET	C	H	N	R ²	Sxy	p
TCF350	164	48,4	-0,026	5,89	1,29	-	-3,02	-2,91	16,5	44	0,54	3,831	0,584
RGC350	-152	-40,2	0,0311	-	-	-0,38	2,34	5,22	-29,4	-31	0,73	2,947	0,247
TCF450	-3,2	7,02	0,0134	-1,99	0,671	-	1,4	-1,8	17,4	-66,8	0,92	1,343	0,024
RGC450	74	23,9	0,0385	-	-	1,62	0,73	3,84	-16,2	-147	0,84	2,322	0,278
TCF550	-184	-45,5	0,0313	-4,57	-1,25	-	4,02	5,72	-16,5	58,9	0,87	1,646	0,065
RGC550	133	22,6	-0,024	-	-	1,07	-1,81	2,41	-20,5	-110	0,95	0,9039	0,050
TCF900	104	-	-	-	-	-	-	-0,547	4,54	-194	1	0,0303	0,028
RGC900	60,4	-25,9	2,62	-	-	-	-	-0,266	-	-376	0,99	0,0894	0,039

Db: densidade básica; PCS: poder calorífico superior; LS: lignina solúvel; LI: lignina insolúvel; LT: lignina total; ET: extrativos totais; C: carbono; H: hidrogênio; N: nitrogênio; TCF 350°C: teor de carbono fixo a 350°C; RGC 350°C: rendimento gravimétrico da carbonização a 350°C; TCF 450°C: teor de carbono fixo a 450°C; RGC 450°C: rendimento gravimétrico da carbonização a 450°C; TCF 550°C: teor de carbono fixo a 550°C; RGC 550°C: rendimento gravimétrico da carbonização a 550°C; TCF 900°C: teor de carbono fixo a 900°C; RGC 900°C: rendimento gravimétrico da carbonização a 900°C; R²: coeficiente de determinação; Sxy: covariância entre as variáveis; p: valor associado

Considerando-se cada uma das nove posições do clone MN463 individualmente, pode-se observar que a primeira tora de 5 m (posições 1, 2 e 3), que contém mais lignina, foi a mais importante, nas três temperaturas finais de carbonização. Na Tabela 9 apresentam-se os resultados da análise do índice de soma de classificação (ISC) de Mulamba e Mock (1978) para o clone MN463, que enumera as posições longitudinais por ordem de classificação.

Tabela 9 Índice de soma de classificação de Mulamba e Mock (1978) para as características do carvão do clone de *Eucalyptus urophylla* (clone MN463)

Posição	UMID 350°C	TMV 350°C	TCF 350°C	RGC 350°C	UMID 450°C	TMV 450°C	TCF 450°C	RGC 450°C	UMID 550°C	TMV 550°C	TCF 550°C	RGC 550°C	ISC	Classificação
1	2	8	8	1	1	1	1	1	3	1	1	3	42	1
2	8	7	7	3	2	3	3	5	1	5	5	7	68	2
3	9	3	3	4	3	2	2	3	9	2	2	6	70	3
5	4	6	6	6	5	4	4	6	4	9	9	1	78	4
8	6	1	1	9	6	6	6	8	5	6	6	5	78	5
4	3	4	4	5	8	9	9	7	7	7	7	4	80	6
7	5	5	5	7	4	5	5	4	8	3	3	8	81	7
6	1	9	9	2	7	7	7	9	6	4	4	9	88	8
9	7	2	2	8	9	8	8	2	2	8	8	2	90	9

UMID 350°C: umidade a 350°C; TMV 350°C: teor de materiais voláteis a 350°C; TCF 350°C: teor de carbono fixo a 350°C; RGC 350°C: rendimento gravimétrico da carbonização a 350°C; UMID 450°C: umidade a 450°C; TMV 450°C: teor de materiais voláteis a 450°C; TCF 450°C: teor de carbono fixo a 450°C; RGC 450°C: rendimento gravimétrico da carbonização a 450°C; UMID 550°C: umidade a 550°C; TMV 550°C: teor de materiais voláteis a 550°C; TCF 550°C: teor de carbono fixo a 550°C; RGC 550°C: rendimento gravimétrico da carbonização a 550°C; ISC: índice de soma de classificação

5 CONCLUSÕES

O clone VM01 apresentou características da madeira superiores ao MN463, para utilização siderúrgica.

O carvão obtido do clone VM01 também apresentou características químicas vantajosas, se comparado ao MN463, para as temperaturas finais utilizadas na comparação. Apesar do maior teor de carbono deste último clone nas três temperaturas consideradas, o clone VM01 apresentou rendimento gravimétrico da carbonização melhor na temperatura de 450°C, enquanto o MN463 foi superior somente até os 350°C.

Na temperatura final de carbonização de 350°C, o poder calorífico superior e o teor de lignina total e insolúvel foram importantes somente para o rendimento gravimétrico da carbonização. Aos 450°C essas características foram importantes, juntamente com os extrativos totais, carbono e hidrogênio, para a melhoria do teor de carbono fixo no carvão, seja de maneira direta (poder calorífico superior, lignina total e lignina insolúvel) ou pela sua ausência no carvão (extrativos totais).

Em relação ao rendimento gravimétrico da carbonização na temperatura final de 450°C, as características mais importantes foram as ligninas totais e insolúveis, os extrativos totais e a densidade básica da madeira, sendo que esta última foi importante também no rendimento gravimétrico aos 550°C e no teor de carbono fixo aos 350°C.

Considerando-se as temperaturas finais de carbonização de 350°C, de 450°C e de 550°C, a lignina insolúvel foi, dentre as características avaliadas, a mais importante para a qualidade do carvão.

A melhor temperatura final de carbonização situou-se entre 450°C e 550°C e a melhor posição axial situou-se até os 10 m para as alturas consideradas. Para os ensaios realizados nas temperaturas finais de 900°C em mufla (VM01) e

1000°C em forno ATG (MN463), os elementos hidrogênio e carbono foram fundamentais.

REFERÊNCIAS

- ALZATE, S. B. A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. grandis* x *urophylla***. 2004. 133 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2004.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard test method for acid-insoluble lignin in wood: D1106-96 R(01)**. Philadelphia, 2001a. 2 p.
- _____. **Standard test method for ethanol-toluene solubility of wood: D1107-96 R(01)**. Philadelphia, 2001b. 2 p.
- _____. **Standard test method for gross calorific value of coal and coke by the adiabatic bomb calorimeter: D2015-66 R(00)**. Philadelphia, 2000. 14 p.
- ANTAL JUNIOR, M. J. et al. Attainment of the theoretical yield of carbon from biomass. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Washington, v. 39, n. 2, p. 4024-4031, Nov. 2000.
- _____. High-yield biomass charcoal. **Energy & Fuels**, Washington, v. 10, n. 3, p. 652-658, May/June 1996.
- ANTAL JUNIOR, M. J.; GRONLI, M. The art, science, and technology of charcoal production. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Washington, v. 42, n. 8, p. 1619-1640, Apr. 2003.
- ARANTES, M. D. C. **Variação nas características da madeira e do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake**. 2008. 149 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 5 p.
- _____. **NBR 8633/84**: carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1994. 13 p.
- _____. **NBR 11941**: madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA. **Anuário estatístico 2007**. Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <<http://www.silv Minas.com.br/>>. Acesso em: 16 set. 2008.

BALLONI, E. A.; MIGLIORINI, A. J.; BRITO, J. O. **Produção de energia através de florestas de rápido crescimento**. Piracicaba: IPEF, 1980. 13 p. (Circular Técnica, 103).

BARCELLOS, D. C. **Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo**. 2007. 13 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.

BOTREL, M. C. G. **Melhoramento genético do *Eucalyptus* para biomassa florestal e qualidade do carvão vegetal**. 2006. 68 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

BRAADBAART, F.; POOLE, I. Morphological, chemical and physical changes during charcoalfication of wood and its relevance to archaeological context. **Journal of Archaeological Science**, Lisboa, v. 35, n. 9, p. 2434-2445, Sept. 2008.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional - BEN**. Disponível em: <<http://www.ben.epe.gov.br/>>. Acesso em: 8 set. 2010.

BRITO, J. O. **Reflexões sobre qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico**. Piracicaba: IFEP, 2008. (Circular Técnica, 181). Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/edicoes.asp>>. Acesso em: 21 maio 2008.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca. **Boletim do Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 16, p. 63-70, 1978.

_____. Considerações sobre a produção de carvão vegetal com madeiras da Amazônia. **Boletim do Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, v. 2, n. 5, p. 1-25, 1981.

_____. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: 1., densidade e teor de lignina de carvão vegetal de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 14, p. 9-20, 1977.

_____. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: 2., densidade da madeira X densidade do carvão. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 20, p. 101-113, out. 1980.

BROWNING, B. L. **The chemistry of wood**. New York: Interscience, 1963. 417 p.

CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte, 1980. 155 p. (Série de Publicações Técnicas, 1).

CHATURVEDI, M. D. The Chinese charcoal kiln. **Indian Forestry**, New Delhi, v. 69, p. 1-75, 1943.

EVTUGUIN, D. V. et al. Comprehensive study on the chemical structure of dioxane lignin from plantation *Eucalyptus globulus* wood. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 49, n. 9, p. 4252-4261, Sept. 2001.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood: chemistry, ultrastructure, reactions**. Berlin: W. Gruyter, 1989. 613 p.

FERREIRA, M. **Escolha de espécies de eucalipto**. Piracicaba: IPEF, 1979. 17 p. (Circular Técnica, 47).

_____. Melhoria e a silvicultura intensiva clonal. **Boletim do Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 45, p. 1361-1368, dez. 1992.

FOLEY, G. **Charcoal making in developing countries**. London: Earthscan, 1986. 105 p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **The forestry domain covers the production and trade**. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/630/default.aspx>>. Acesso em: 16 set. 2010.

GOLDSCHMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V.; LUDWIG, C. H. (Ed.). **Lignins: occurrence, formation, structure and reactions**. New York: J. Wiley, 1971. p. 241-266.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O Papel**, São Paulo, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.

GROTJKÆR, T. et al. An experimental study of biomass ignition. **Fuel**, London, v. 82, n. 7, p. 825-833, May 2003.

HILLRING, B. World trade in forest products and wood fuel. **Biomass & Bioenergy**, Oxford, v. 30, n. 7, p. 815-825, May 2006.

HON, D. N. S.; SHIRAISHI, N. **Wood and cellulosic chemistry**. New York: M. Dekker, 2001. 914 p.

JARA, E. R. P. **O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil**. São Paulo: IPT, 1989. 6 p.

LIMA, J. T.; BREESE, M.C.; CAHALAN, C.M. Genotype-environment interaction in wood basic density of *Eucalyptus* clones. **Wood Science and Technology**, New York, v. 34, n. 3, p. 197-206, 2000.

MATARELLI, F. A.; LOPES, L. E. F.; CASTRO, L. F. A. Siderurgia a carvão vegetal. In: _____. **Biomassa: energia nos trópicos em Minas Gerais**. Belo Horizonte: FAFICH, 2001. p. 145-161.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass: part 1, overview of biomass. **Bioresource Technology**, Essex, v. 83, n. 1, p. 37-46, May 2002a.

_____. Energy production from biomass: part 2, conversion technologies. **Bioresource Technology**, Essex, v. 83, n. 1, p. 47-54, May 2002b.

MOK, W. S. et al. Formation of charcoal from biomass in a sealed reactor. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Washington, v. 31, n. 4, p. 1162-1166, Apr. 1992.

MULAMBA, N. N.; MOCK, J. J. Improvement of yield potential of the Eto Blanco maize (*Zea mays* L.) population by breeding for plant traits. **Egypt Journal of Genetic Cytology**, Alexandria, v. 7, p. 40-51, 1978.

NOGUEIRA, L. A. H. et al. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2000. 144 p.

OLIVEIRA, J. B.; MENDES, M. G.; GOMES, P. A. Produção de carvão vegetal: aspectos técnicos. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte, 1982. p. 62-73.

PÁDUA, F. **Amostragem para avaliação da densidade básica da madeira de um híbrido de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake.** 2009. 99 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

PANSHIN, A. J.; ZEEWN, C. **Textbook of wood technology.** New York: McGraw-Hill, 1964. 643 p.

PASTOR-VILLEGAS, J. et al. Changes in comercial wood charcoals by termal treatments. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, New York, v. 80, n. 2, p. 507-514, Oct. 2007.

_____. Study of commercial wood charcoals for the preparation of carbon adsorbents. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, New York, v. 76, n. 1/2, p. 103-108, June 2006.

PEREIRA, J. C. D. et al. **Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil.** Colombo: EMBRAPA Florestas, 2000. 113 p.

PINHEIRO, P. C. C. et al. **A produção de carvão vegetal: teoria e prática.** Belo Horizonte: UFMG, 2006. 120 p.

ROWELL, R. **Handbook of wood chemistry and wood composites.** New York: T. Francis, 2005. 487 p.

SENELWA, K.; SIMS, R. E. H. Fuel characteristics of short rotation forests. **Biomass & Bioenergy**, Oxford, v. 17, n. 2, p. 127-140, Aug. 1999.

SILVA, J. C. et al. Influência da idade e da posição ao longo do tronco na composição química da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 3, p. 455-460, maio/jun. 2005.

SJÖSTRÖM, E. **Wood chemistry: fundamentals and applications.** New York: Academic, 1981. 293 p.

SOUZA, M. O. A. de et al. Avaliação da madeira de *Eucalyptus camaldulensis* Dehn *E. Eucalyptus urophylla* S.T. Blake em ensaios de usinagem, visando à produção moveleira. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 33, n. 4, p. 751-758, jul./ago. 2009.

STREZOV, V. et al. Fundamental aspects of biomass carbonization. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, New York, v. 79, n. 1/2, p. 91-100, May 2007.

STURION, J. A. et al. Variação da densidade básica da madeira de doze espécies de *Eucalyptus* plantadas em Uberaba, MG. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 14, p. 28-38, 1987.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus saligna* e *E. grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 29, p. 37-45, abr. 1985.

VITTI, A. M. S.; BRITO, J. O. **Óleo essencial de eucalipto**. Piracicaba: IPEF, 2003. 30 p. (Documentos Florestais, 17).

XAVIER, A.; SILVA, R. L. da. Evolução da silvicultura clonal de *Eucalyptus* no Brasil. **Agronomía Costarricense**, San José, v. 34, n. 1, p. 93-98, 2010.

ANEXOS

Tabela 1A Estimativa do coeficiente de variação das análises químicas

Análise dos componentes	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação
EXTRATIVOS TOTAIS	5,6%	0,51	9%
LIGNINA INSOLÚVEL	21,8%	0,68	3%
LIGNINA SOLÚVEL	3,9%	0,09	2%
LIGNINA TOTAL	25,7%	n.a.	n.a.
CINZAS	0,06%	0,01	5%
HOLOCELULOSE	68,7%	n.a.	n.a.

Tabela 1B Estimativa do coeficiente de variação da análise elementar

Análise elementar	C	H	N
Média	48,4%	6,4%	0,16%
Desvio padrão	0,41	0,32	0,01
Coeficiente de variação	0,8%	5%	6%

Tabela 1C Estimativa do coeficiente de variação da análise de poder calorífico superior

	Poder calorífico superior
Média	4519 cal.g ⁻¹
Desvio padrão	48 cal.g ⁻¹
Coeficiente de variação	1%

Tabela 1D Matriz de correlação entre as características do carvão avaliadas após as carbonizações em mufla e a curva termogravimétrica das carbonizações realizadas no forno ATG-CIRAD (clone MN463)

	ATG MN463		ATG MN463		ATG MN463	
UMID 350	0,7072	UMID 450	0,0644	UMID 550	-0,5375	
TMV 350	-0,6602	TMV 450	-0,1439	TMV 550	0,1840	
TCZ 350	-0,2958	TCZ 450	-0,0185	TCZ 550	-0,5624	
TCF 350	0,6671	TCF 450	0,1453	TCF 550	-0,1692	
RGC 350	-0,3345	RGC 450	0,7125	RGC 550	0,6948	

Tabela 1E Tabela dos resultados da regressão 'stepwise' para o teor de carbono fixo na temperatura final de carbonização de 450°C

valor-t (TCF450)									
Classificação	PCS	LS	ET	H	LI	C	Db	R2	s
1°	3,1							42,50%	2,21
2°	2,15	-1,08						47,58%	2,2
3°	1,71	-1,85	1,62					57,65%	2,07
4°	1,41	-1,84	1,65	0,78				60,09%	2,1
5°	1,21	-1,3	1,19	0,73	0,57			61,50%	2,18
6°	1,29	-0,87	0,82	0,81	0,78	-0,6		63,14%	2,26
7°	1,18	-0,85	0,84	0,73	0,45	-0,49	-0,31	63,63%	2,4

Tabela 1F Tabela dos resultados da regressão 'stepwise' para o teor de carbono fixo na temperatura final de carbonização de 550°C

valor-t (TCF550)									
Classificação	PCS	Db	ET	C	LI	LS	H	R2	s
1°	3,99	-3,02	2,21					64,11%	1,86
2°	3,53	-2,98	2,2	0,56				65,21%	1,92
3°	3,03	-2,7	2,2	0,7	-0,62			66,64%	1,99
4°	2,62	-2,65	2,02	0,8	-0,81	0,61		68,14%	2,06
5°	2,43	-2,55	1,97	0,72	-0,9	-0,72	-0,48	69,15%	2,17

Tabela 1G Tabela dos resultados da regressão 'stepwise' para o rendimento gravimétrico da carbonização na temperatura final de 450°C

valor-t (RGC450)									
Classificação	LI	Db	PCS	H	LS	C	ET	R2	s
1°	1,32							11,81%	2,66
2°	1,56	1,42						24,42%	2,56
3°	2,42	2,29	-1,76					40,97%	2,37
4°	2,49	2,42	-1,65	-0,96				45,96%	2,37
5°	2,51	2,11	-1,15	-0,89	0,76			49,18%	2,43
6°	2,04	2,01	-1,18	-0,85	0,58	0,56		51,13%	2,52
7°	1,61	1,81	-1,11	-0,69	0,53	0,4	-0,19	51,38%	2,69

Tabela 1H Tabela dos resultados da regressão 'stepwise' para o rendimento gravimétrico da carbonização na temperatura final de 550°C

valor-t (RGC550)									
Classificação	H	C	Db	PCS	ET	LI	LS	R2	s
1°	-0,3							0,75%	2,16
2°	-1,4	1,36						14,09%	2,09
3°	-1,5	1,33	1,18					23,70%	2,06
4°	-1,7	1,56	1,47	-0,97				30,27%	2,06
5°	-1,6	1,49	1,52	-0,99	-0,58			32,78%	2,13
6°	-1,3	1,15	1,44	-1,01	-0,68	0,44		34,33%	2,24
7°	-1	0,79	1,41	-0,78	-0,77	0,59	0,44	36,08%	2,36