

**PARÂMETROS DE QUALIDADE DA
MADEIRA E DO CARVÃO VEGETAL DE
CLONES DE EUCALIPTO**

ROSIMEIRE CAVALCANTE DOS SANTOS

2010

ROSIMEIRE CAVALCANTE DOS SANTOS

**PARÂMETROS DE QUALIDADE DA MADEIRA E DO CARVÃO
VEGETAL DE CLONES DE EUCALIPTO**

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 Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção do título de “Doutora”.

Orientador
Prof. Lourival Marin Mendes

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL
2010

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

Santos, Rosimeire Cavalcante dos.

Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de Eucalipto / Rosimeire Cavalcante dos Santos. – Lavras : UFLA, 2010.

159 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2010.

Orientador: Lourival Marin Mendes.

Bibliografia.

1. Qualidade da madeira. 2. Carvão vegetal. 3. Clones de Eucalipto. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 634.97342
674.12

ROSIMEIRE CAVALCANTE DOS SANTOS

**PARÂMETROS DE QUALIDADE DA MADEIRA E DO CARVÃO
VEGETAL DE CLONES DE EUCALIPTO**

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 Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção do título de “Doutora”.

APROVADA em 23 de abril de 2010

Profª. Angélica de Cássia Oliveira Carneiro	UFV
Profª. Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho	UFV
Prof. Daniel Câmara Barcellos	UNIPAC
Prof. Paulo Fernando Trugilho	UFLA

Prof. Lourival Marin Mendes
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL

Por um considerável e longo tempo eu contava os dias no calendário, torcendo para que aquela “fase longe de casa” passasse logo. Depois, as conquistas e recompensas deram lugar à calma, sem, no entanto, abandonar os dias que se passavam e, supostamente, me trariam “de volta pra casa”. Mas, tudo em volta era a minha casa e eu não tinha mais como explicar aquela sensação de ausência.

Foram muitas sensações e desafios que serviram, especialmente, para reafirmar o amor incondicional da minha mãe por mim e me trazer novos laços firmes e fortes para que eu me mantivesse confiante em mim mesma. E agora eu reconheço que aqui está a minha herança que, de um lado, é amor e, do outro, sobrevivência e esperança de, ainda, “voltar pra casa”, como se fosse preciso, o tempo todo, esquecer a ideia da recompensa e da glória, e ser, como se já não fôssemos, vigiados pelos próprios olhos severos conosco, pois o resto não nos pertence.

A Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, carinhosamente conhecida por “Cassinha”, pela amizade tão plena e despretenhiosa de si mesma.

OFEREÇO

Ao meu pai, Francisco Assis dos Santos (*In memoriann*) e a minha mãe, Maria das Neves Cavalcante que, por escolha, dedicaram seus dias ao amor, desde a minha chegada em suas vidas e a minha amiga Liege Fernandes de Araújo.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela vida, pelas novas conquistas e pela força interior, que é a minha maior característica quando preciso vencer obstáculos.

A minha mãe, por ter me acompanhado, também, nessa nova conquista, continuando a dar uma lição do que é amor de mãe.

A Liege, por dividir comigo os momentos felizes e, especialmente, os difíceis da minha vida.

À Angélica de Cássia, por me levar “ao mundo dos conhecimentos” de forma tão exigente, carinhosa e dedicada. Com certeza, seu apoio me deu suporte e foi a base para tudo que eu conquistei na minha vida acadêmica, desde que a conheci.

A Simonne, por compartilhar comigo a minha casa e a minha mãe e que me fez sentir o quanto deve ser bom ter irmãos e poder contar com eles.

A dona Teresinha, por ter cuidado tão bem da minha mãe, enquanto estivemos em Lavras.

A Marilane e a Tânia, pela atenção dispensada a minha mãe.

A todos os amigos do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira da UFLA, especialmente, Marisa, Selma e Claudinéia.

A Renato Castro, “Renatinho” da UFV e ao Allan, da UFLA, pela assistência no desenvolvimento do trabalho.

Aos funcionários do Laboratório de Painéis e Energia da Universidade Federal de Viçosa, pelo apoio.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Ciências Florestais, pela oportunidade de realização do doutorado.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Ciências Florestais, pela parceria na realização deste trabalho.

À Sada Bioenergia, pela concessão do material para o desenvolvimento da pesquisa.

À Capes, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Lourival Marin Mendes, pela orientação e amizade durante todo o período em que trabalhamos juntos.

Ao professor José Roberto Scolforo, pelo apoio mais que decisivo nas questões pessoais.

Aos professores e funcionários do curso de Ciência e Tecnologia da Madeira da UFLA e do Departamento de Ciências Florestais, especialmente Paulo Trugilho e José Tarcísio, e às funcionárias Cristiane, Francisca e Terezinha.

SUMÁRIO

Página

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	ii
RESUMO.....	iii
ABSTRACT	v
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	4
2.1 O gênero <i>Eucalyptus</i>	4
2.2 Contexto energético brasileiro.....	7
2.2.1 Crise no setor de produção de carvão.....	16
2.3 Propriedades da madeira para produção de carvão vegetal.....	17
2.3.1 Densidade básica.....	18
2.3.2 Composição química.....	20
2.3.2.1 Composição elementar.....	20
2.3.2.2 Composição química estrutural.....	22
2.3.2.2.1 Celulose.....	23
2.3.2.2.2 Hemiceluloses.....	24
2.3.2.2.3 Lignina.....	25
2.3.2.2.4 Extrativos.....	31
2.3.3 Composição anatômica das folhosas – qualidade das fibras.....	32
2.3.4 Poder calorífico.....	34
2.3.5 Análise termogravimétrica (TGA).....	36
2.4 Carbonização da madeira.....	39
2.5 Parâmetros para avaliação da qualidade do carvão vegetal.....	43
2.6 Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão.....	47
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	50
3.1 Material utilizado.....	50
3.2 Preparo das amostras.....	51
3.2.1 Análise química da madeira.....	51
3.2.1.1 Composição química.....	51
3.2.1.2. Relação siringil/guaiacil.....	52
3.2.1.3. Composição elementar.....	53
3.2.2 Análise física da madeira.....	53
3.2.2.1 Determinação da densidade básica da madeira.....	53
3.2.3 Análise anatômica da madeira.....	54
3.2.4 Análise termogravimétrica da madeira.....	54
3.3 Carbonização e rendimentos gravimétricos.....	55
3.4 Propriedades do carvão.....	56
3.4.1 Análise química imediata.....	56

3.4.1.1 Rendimento gravimétrico em carbono fixo	57
3.4.2 Densidade relativa aparente	57
3.4.3 Determinação do poder calorífico superior.....	57
3.5 Cálculos das estimativas de massa.....	58
3.6 Análise estatística do experimento.....	59
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.1 Propriedades da madeira	60
4.1.1 Densidade básica.....	60
4.1.2 Dimensões das fibras	62
4.1.3 Poder calorífico superior da madeira	65
4.1.4 Propriedades químicas da madeira.....	67
4.1.4.1 Composição elementar.....	67
4.1.4.2 Composição química (extrativos, lignina total e holocelulose)	69
4.1.4.3 Relação siringil/guaiacil	73
4.1.5 Análises termogravimétrica e térmica diferencial da madeira (TGA e DTA)	75
4.2 Rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, gases condensáveis, gases não-condensáveis e em carbono fixo	82
4.3 Análise química imediata.....	86
4.4 Densidade relativa aparente	89
4.5 Poder calorífico superior do carvão	91
4.6 Correlações entre as propriedades da madeira e as do carvão	92
4.7 Estimativas da massa seca, massa de lignina total, produção de carvão vegetal e energia por hectare	106
5 CONCLUSÕES	108
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110
ANEXOS	123

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Oferta interna de energia no Brasil, em 2008 (%).	8
FIGURA 2	Produção de lenha de floresta plantada (t) no Brasil, série histórica, por município.	12
FIGURA 3	Produção de carvão vegetal de florestas plantadas (t), no Brasil, série histórica, por município.	15
FIGURA 4	Estrutura química dos precursores básicos das principais unidades aromáticas presentes na molécula de lignina. (a) álcool <i>p</i> -cumarílico, (b) álcool coniferílico e (c) álcool sinapílico.	27
FIGURA 5	Principais unidades aromáticas presentes na molécula de lignina.	27
FIGURA 6	Estrutura proposta para a lignina presente em madeira das angiospermas.	29
FIGURA 7	Massas finais dos componentes da madeira versus temperatura de carbonização.	38
FIGURA 8	Densidade básica das madeiras de diferentes clones de eucalipto.	60
FIGURA 9	Dimensões das fibras em função do material genético.	62
FIGURA 10	Comprimento das fibras em função do material genético.	63
FIGURA 11	Poder calorífico superior da madeira dos diferentes clones de eucalipto.	66
FIGURA 12	Composição química da madeira dos diferentes clones de eucalipto.	70
FIGURA 13	Relação siringil/guaiacil da madeira nos diferentes clones de eucalipto.	73
FIGURA 14	Termograma e DTA da madeira para o material genético 1.	76
FIGURA 15	Termograma e DTA da madeira para o material genético 2.	76
FIGURA 16	Termograma e DTA da madeira para o material genético 3.	77
FIGURA 17	Termograma e DTA da madeira para o material genético 4.	77
FIGURA 18	Rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, gases condensáveis e gases não condensáveis obtidos de diferentes clones de eucalipto.	82
FIGURA 20	Análise química imediata do carvão vegetal obtido de diferentes clones de eucalipto.	86
FIGURA 21	Densidade relativa aparente do carvão vegetal obtido de diferentes clones de eucalipto.	90
FIGURA 22	Poder calorífico superior do carvão vegetal obtido de diferentes clones de eucalipto.	91

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Composição elementar de diferentes tipos de biomassa.....	22
TABELA 2	Características tecnológicas da madeira e do carvão de algumas espécies de eucalipto.....	42
TABELA 3	Informações gerais sobre os diferentes materiais genéticos utilizados no estudo.....	50
TABELA 4	Marcha da carbonização da madeira empregada no experimento.....	56
TABELA 5	Composição elementar da madeira dos diferentes materiais genéticos de clones de eucalipto.....	67
TABELA 6	Perda de massa (%) dos diferentes materiais genéticos em função das faixas de temperaturas.....	78
TABELA 7	Correlações entre as características da madeira e do carvão vegetal do material genético um.....	93
TABELA 8	Correlações entre as características da madeira e do carvão vegetal.....	97
TABELA 9	Correlações entre as características da madeira e do carvão vegetal.....	100
TABELA 10	Correlações entre as características da madeira e do carvão vegetal.....	103
TABELA 11	Valores do incremento médio anual, massa seca, massa de lignina, energia disponível e massa de carvão vegetal referentes ao diferentes materiais genéticos.....	106

RESUMO

SANTOS, Rosimeire Cavalcante dos. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. 2010. 159 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.*

Este trabalho foi realizado com o objetivo geral de estudar a qualidade da madeira de diferentes materiais genéticos de eucalipto para a produção de carvão vegetal. Foram utilizados quatro clones de *Eucalyptus*, aos sete anos de idade, provenientes de plantios comerciais, com espaçamento 3 x 3 m, localizados no município de Carbonita, MG. Para as análises da qualidade da madeira e do carvão foram utilizadas amostras compostas retiradas ao longo do tronco a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial da árvore. O estudo das propriedades da madeira foi realizado a partir da análise química, relação siringil/guaiacil, determinação da composição elementar, densidade básica, análise anatômica, poder calorífico superior e análises termogravimétricas e diferencial térmica. Para a avaliação da qualidade do carvão e dos rendimentos gravimétricos foi realizada carbonização em mufla de laboratório sob aquecimento elétrico, com tempo total de 7 horas e taxa de aquecimento média de $1,07^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. Posteriormente, foram determinados os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo e os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, gases condensáveis e não condensáveis e o rendimento em carbono fixo. Foram ainda determinados o poder calorífico superior e a densidade relativa aparente do carvão. O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado, com seis repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância e, quando estabelecidas diferenças entre eles, aplicou-se o teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Para o estudo das correlações foi empregado o coeficiente de correlação de Pearson a 5%, 10% e 15% de probabilidade. Os resultados experimentais mostraram que o carvão vegetal oriundo dos clones avaliados apresentou rendimento gravimétrico e qualidade satisfatórios; madeiras com baixa relação S/G promoveram aumento no rendimento em carvão vegetal; os comportamentos da madeira dos diferentes clones foram bem semelhantes quanto às perdas de massa, numa mesma estreita faixa de temperatura; o clone sete se destacou por apresentar maior resistência à degradação térmica com maior rendimento em carvão vegetal.

* Comitê Orientador: Lourival Marin Mendes (Orientador) - UFLA, Angélica de Cássia Oliveira Carneiro - UFV, Setsuo Iwakiri – UFPR, Paulo Fernando Trugilho – UFLA e Fábio Akira Mori – UFLA.

Palavras-chave: qualidade da madeira, carvão vegetal, clones de eucalipto.

ABSTRACT

SANTOS, Rosimeire Cavalcante dos. **Quality parameters of wood and charcoal from eucalyptus clones**. 2010. 159 p. Thesis (Doctors in Wood Science and Technology) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.*

The main objective of this research was to study the quality of wood from different genetic eucalyptus materials used for charcoal production. Four Eucalyptus clones were used, at seven years old, came from commercial crops that had a 3 x 3 m spacing, located at the city of Carbonita/MG. Composed samples of all long the trunk were collected at 0,25, 0,50, 0,75 e 100% of the commercial height of the tree, for the purpose of wood and charcoal quality analysis. The study of the wood properties was done through a chemistry analysis, siringil/guaiacil relation, elementary composition, basic density, anatomical analysis, calorific value and thermogravimetric and differential thermic tests. For the charcoal quality evaluation and the gravimetric efficiency, a carbonization in laboratory furnace was done, under electrical heating with total time of 7 hours and heating middle taxes of $1,07^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. After this, the determination of the levels of volatile materials, ash, fixed carbon, the charcoal gravimetric efficiency, condensable and non-condensable gases, and the fixed carbon efficiency were done. Although, the high calorific value and the relative density from the charcoal were determined. The experiment was installed on entirely casualised delineation, with six repetitions. The obtained data were submitted to analysis of variance and when differences were established, a Tukey test at 5% of probability was done. For the correlation study the Pearson correlation coefficient was used at 5, 10 and 15% of probability. The experimental results showed that the vegetal charcoal obtained from the evaluated clones presented a gravimetric efficiency and quality satisfactory; woods with low relation S/G promote increases on the vegetal charcoal efficiency, the different wood clones behavior showed quite similar in relation to the mass loss, on a thin temperature band; the clone number seven had a different perform because it present a higher resistance to the thermal degradation plus the higher vegetal charcoal efficiency.

Key-words: wood quality, vegetal charcoal, eucalyptus clones.

* Guidance Committee: Lourival Marin Mendes (Major professor) – UFLA, Angélica de Cássia Oliveira Carneiro - UFV, Setsuo Iwakiri – UFPR, Paulo Fernando Trugilho – UFLA and Fábio Akira Mori – UFLA.

1 INTRODUÇÃO

A madeira, na sua forma direta como lenha ou do seu derivado, o carvão vegetal, é um combustível utilizado para diversos fins. Na forma sólida, sob combustão direta, seu emprego abrange desde tradicionais fogões a lenha, para a cocção de alimentos, até as mais modernas caldeiras geradoras de vapor, que operam à combustão em leito fluidizado.

Como recurso energético, a madeira é tradicionalmente chamada de lenha. Esse insumo que contribuiu de forma tão marcante para o desenvolvimento da humanidade, ao longo dos tempos, passou a ser utilizado, além de na forma sólida, também como combustível líquido e gasoso, em processos como geração de energias térmica, mecânica e elétrica.

Estima-se que, a cada seis pessoas, duas utilizem a madeira como principal fonte de energia, particularmente nos países em desenvolvimento, em processos de secagens, cocção, fermentação e produção de eletricidade, entre outras (Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO, 2003).

A produção de biomassa para fins energéticos tem grandes vantagens ambientais, o que a potencializa como alternativa aos combustíveis fósseis, para a diminuição das emissões dos gases do efeito estufa.

No Brasil, o uso da madeira para a geração de energia tem sido historicamente relacionado à produção de carvão vegetal e aos consumos residencial, industrial e agropecuário. A produção de carvão vegetal se destaca em decorrência da demanda existente pelo produto junto ao setor siderúrgico.

Dados da Associação Mineira de Silvicultura destacam que, em 2009, no Brasil, foi produzido 40% do total mundial de carvão vegetal, o qual se destinou à produção de ferro gusa, aço, ferro ligas e silício metálico. Por sua vez, o país consumiu cerca de 34 milhões de m³ desse insumo (Associação Mineira de Silvicultura - AMS, 2010). O estado de Minas Gerais se destaca como maior

produtor e consumidor, pois possui o maior parque siderúrgico a carvão vegetal do mundo, o que contribuiu de forma direta para a participação do setor florestal com 7% no PIB mineiro.

A madeira utilizada para a produção de carvão tem duas origens básicas: florestas nativas, das quais as espécies florestais são abatidas, e florestas plantadas que, no Brasil, em sua grande maioria, são espécies do gênero *Eucalyptus*. No início da siderurgia a carvão vegetal, a madeira destinada às carvoarias era, essencialmente, de florestas nativas, principalmente do cerrado, o que colaborou de forma significativa para a ocorrência de extensas áreas desmatadas (Brito & Barrichelo, 2006).

Segundo Shumacher & Poggiani (1993), no Brasil, a implantação de maciços florestais formados, em maior parte, por espécies exóticas, é consequência da evolução de toda uma estrutura industrial que tem como objetivo atender à demanda das regiões mais desenvolvidas do país. Nesse contexto, várias espécies de eucaliptos foram introduzidas para atender à produção de energia e carvão vegetal.

No entanto, as variações na qualidade da madeira de eucalipto ocorrem na sua estrutura anatômica, na composição química e nas propriedades físicas, podendo ser detectadas significativas diferenças inter e intraespecíficas (Tomazello Filho, 1985). Essa variabilidade poderá ocasionar consequências negativas na qualidade do carvão, as quais refletirão nas operações dos altos-fornos siderúrgicos, visto que o carvão vegetal, além de sofrer influência do sistema de produção, também, de forma especial, sofre influência direta da madeira que lhe deu origem. Por esses motivos, as empresas buscam novas tecnologias de produção e avaliação da madeira como matéria-prima para o fornecimento de energia ou conversão em carvão vegetal.

Dessa forma, considera-se que as características da madeira são importantes parâmetros de avaliação e escolha, quando se objetiva a produção de

carvão vegetal, além de serem utilizadas também em programas de melhoramento genético florestal.

Assim, com base nos números expressivos sobre produção e consumo de carvão vegetal no Brasil, e em especial em Minas Gerais, como também na utilização da madeira como outras formas de energia, são necessários estudos sobre a qualidade da madeira, visando à utilização com fins energéticos e, em especial, para verificar a influência das variáveis ligadas às características da madeira nas propriedades do carvão produzido.

Nesse contexto, o presente trabalho foi realizado com os seguintes objetivos:

. objetivo geral

estudar a qualidade da madeira de diferentes materiais genéticos de eucalipto para a produção de carvão vegetal;

. objetivos específicos

1. caracterizar a madeira de quatro clones de eucalipto quanto às suas propriedades físicas, químicas e anatômicas;

2. estudar a decomposição térmica da madeira por meio da análise termogravimétrica;

3. obter as correlações entre as características da madeira e do carvão de quatro clones de eucalipto;

4. estimar a massa seca da madeira sem casca, massa de lignina, massa de carbono, massa de carvão e energia por hectare, em relação ao incremento médio anual;

5. avaliar, identificar e indicar, dentre os clones de eucalipto estudados, o material genético com maior potencial para a produção de carvão.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O gênero *Eucalyptus*

A madeira, principal matéria-prima utilizada pelo setor florestal para diversos fins, é obtida, em grande parte, a partir de plantios homogêneos realizados com espécies de *Pinus* e *Eucalyptus*. Segundo Silveira (2004), a elevada utilização do eucalipto nos reflorestamentos no Brasil deve-se ao seu rápido crescimento e sua boa adaptação às condições edafoclimáticas.

O *Eucalyptus* é caracterizado pela elevada plasticidade, ou seja, grande capacidade de adaptações às condições ambientais (Andrade, 1993). O autor menciona, ainda, que, além da grande plasticidade, o gênero também se destaca pelo rápido crescimento, devido ao grande avanço das práticas silviculturais, ao manejo e, principalmente, ao melhoramento genético das espécies.

O gênero *Eucalyptus* pertence à família Myrtaceae e tem, aproximadamente, 70 gêneros e 3.000 espécies. Proveniente da Austrália, foi introduzido no Brasil em 1868, no Rio Grande do Sul e no Rio de Janeiro. Até o início do século 21, as espécies de *Eucalyptus* eram utilizadas apenas como arborização de ruas ou como quebra-ventos. A cultura em larga escala foi iniciada em 1903, no estado de São Paulo (Silveira, 2004).

Atualmente, as espécies do gênero *Eucalyptus* são as mais utilizadas para a produção de carvão, especialmente no estado de Minas Gerais. Suas características de rápido crescimento e densidade consideráveis garantem, segundo a literatura, um carvão facilmente renovável e de boa qualidade. As principais espécies de *Eucalyptus* utilizadas no Brasil para a plantação de florestas energéticas são *E. grandis*, *E. saligna*, *Corymbia citriodora*, *E. camaldulensis* e *E. urophylla*, assim como seus híbridos.

De acordo com Dossa et al. (2002), a produtividade do eucalipto, dado o seu rápido crescimento, pode ser considerada como um dos principais fatores

que determinaram sua expansão no mercado de papel, carvão, celulose e, também, para serraria. Embora a produtividade média anual, considerada em torno de 35 m³ por hectare, seja relativamente baixa, existem plantios com uso de eucaliptos melhor adaptados, empregando-se boa tecnologia, que atingem rendimentos próximos a 60 m³ /ha ano.

Com destaque histórico, as áreas de florestas plantadas com eucalipto no Brasil acumularam, em 2008, o total estimado de 4.259 hectares, representando um crescimento de 7,3% em relação a 2008 (Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas - ABRAF, 2009). As espécies desse gênero, introduzidas no Brasil para fins de reflorestamento, apresentam um ciclo de corte relativamente curto e com elevada produtividade (Schumacher & Poggianni, 1993).

Diante da variabilidade natural entre e dentro de populações, espera-se encontrar consideráveis variações genéticas entre árvores para as propriedades da madeira nas várias espécies de *Eucalyptus*, conforme destaca Malan (1995).

Os programas de melhoramento das principais empresas do setor visam aumentar a produtividade dos clones plantados, juntamente com a qualidade da madeira, a fim de obter uma produção adaptada às exigências tecnológicas da siderurgia. Os progressos em melhoramento genético e em práticas silviculturais ao longo de várias décadas permitiram ganhos consideráveis nas plantações industriais do eucalipto no Brasil (Brito & Barrichelo, 2006).

Paludzysyn Filho (2008) relata que, para fins energéticos, o melhoramento enfatiza as madeiras de eucalipto que têm elevado potencial produtivo, alta densidade e alto teor de lignina, pois, segundo o autor, o rendimento na produção de carvão é maximizado com o uso da madeira mais densa, de maior poder calorífico e constituição química adequada, resultando em carvão de melhor qualidade.

Considerando o potencial do eucalipto como produtor de madeira de qualidade e que há condições ambientais e conhecimentos silviculturais suficientes para dar ao país vantagem comparativa na produção de matéria-prima oriunda de florestas renováveis, a seleção de espécies para florestas energéticas de *Eucalyptus* spp. tem sido realizada com base nas pesquisas das propriedades tecnológicas da madeira, visando homogeneizá-las e melhorar os rendimentos em carvão, teor de carbono, densidade do carvão e outras propriedades almejadas na sua utilização como termorreductor.

Segundo Silva (2001), a estrutura anatômica da madeira de eucalipto deve ser destacada, pois as mesmas têm pontuações e diâmetros diminutos, responsáveis, em grande parte, pela dificuldade de secagem e pela trabalhabilidade desses lenhos. Latorre & Henriques (2008) afirmam que a estrutura anatômica da madeira deve permitir a secagem natural eficiente, para que ela atinja, em menor tempo, teores de umidade adequados para o processo de carbonização. Já a secagem da madeira no campo é um ponto-chave para o bom desempenho do processo, e hoje, essa é uma das maiores dificuldades encontradas pelas empresas que trabalham com o processamento da madeira.

A identificação das espécies de eucalipto, de modo geral, é muito difícil, não somente pelas variações morfológicas determinadas pelo ambiente, mas também pelo frequente fenômeno de hibridação, fazendo com que a constituição anatômica seja muito homogênea entre as espécies. Bamber (1985), citado por Silva (2001), estudando a anatomia de várias espécies de eucalipto, concluiu que é grande a variação das propriedades anatômicas entre e dentro das espécies e que o conhecimento dessa variação é de suma importância quando se pretende iniciar o desenvolvimento de determinada espécie para qualquer uso final da madeira.

Dessa forma, e considerando que as características do carvão vegetal são influenciadas pelas características da madeira, a caracterização da interação

entre esses parâmetros poderá direcionar os programas de melhoramento genérico a partir da indicação de clones com maior potencial para esse fim. Latorre & Henriques (2008) relatam que estudar a qualidade do carvão relacionando-o à qualidade da madeira que o gerou direcionará não só o melhoramento genético, como também a atividade silvicultural e a nutrição, para a produção de madeira com características tecnológicas para atender à demanda do carvão de melhor qualidade para o setor siderúrgico.

2.2 Contexto energético brasileiro

A cobertura florestal do território brasileiro, associada às excelentes condições edafoclimáticas para a silvicultura, confere ao país grandes vantagens para a atividade florestal, comparado ao resto do mundo. Como consequência, a participação no contexto da geração de energia oriunda de fontes renováveis se destaca com a mesma magnitude.

Dados do Brasil (2009), ano base 2008, demonstram que de 45,4% de energia renovável utilizada no Brasil, a biomassa contribuiu com 31,5% e, deste total, a lenha participou com 11,4%. No entanto, segundo a FAO (2006), o impacto do uso energético de lenha sobre as florestas não está devidamente dimensionado. A FAO (2006) estima que, em 2005, 1,5 bilhão de m³ foram utilizados como lenha. Porém, reconhece que existe uma quantidade de madeira retirada informalmente que não é contabilizada e, portanto, o consumo de lenha é seguramente maior.

No gráfico da Figura 1 observa-se a oferta interna de energia no Brasil em 2008. De modo geral, a biomassa representou a segunda fonte de energia que compõe a matriz nacional (Brasil, 2009).

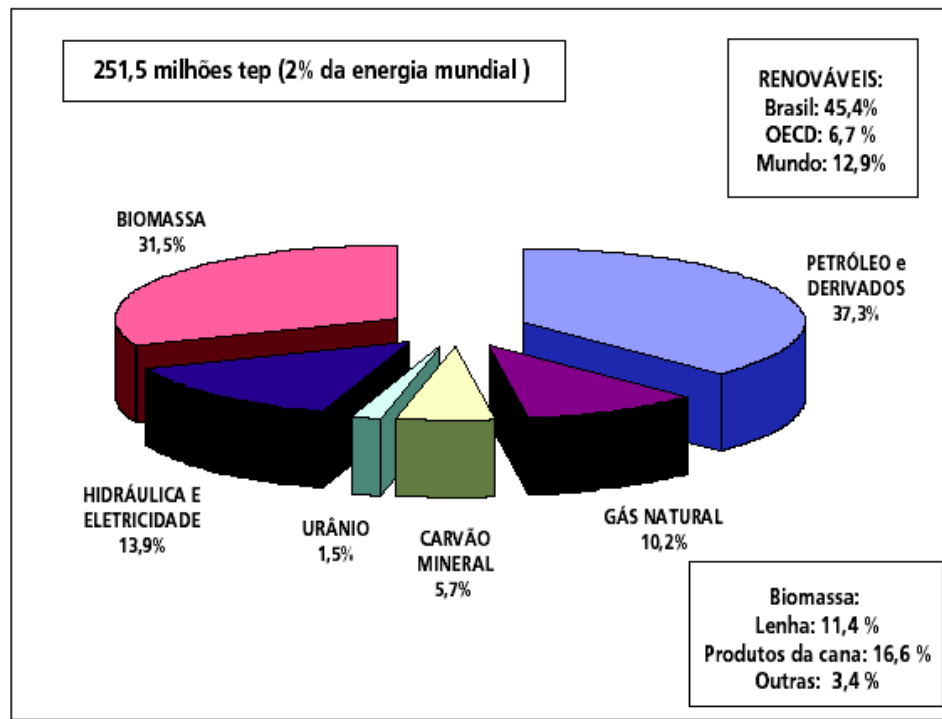


FIGURA 1 Oferta interna de energia no Brasil, em 2008 (%).

Fonte: Brasil (2009).

Nos últimos dez anos, o consumo de lenha no Brasil permaneceu praticamente constante nos setores residencial, industrial e agropecuário. As grandes alterações ocorreram no setor de transformação, onde a lenha é convertida em carvão vegetal. Este setor é o que mais utiliza e consome madeira, chegando a cerca de 39% do total destinado para energia. A razão para esse elevado consumo de carvão vegetal é a demanda existente pelo produto no setor siderúrgico. Grande parte da madeira utilizada é proveniente de florestas plantadas, na sua maioria representadas por florestas de eucalipto.

O setor industrial consumiu 8,7 milhões de toneladas de carvão vegetal em 2005, 90,5% do consumo total. As atividades industriais que mais consumiram carvão vegetal, em 2005, foram a produção de ferro-gusa (84,9%),

a produção de ferro liga (10,1%) e a fabricação de cimento (4,4%) (Brasil, 2006). Como consequência, constatou-se a importância da participação da lenha na matriz energética brasileira, visto que o seu comércio, de forma geral, representou 0,15% do PIB brasileiro que, em 2005, foi de R\$ 1,937 trilhão.

Historicamente, o emprego da madeira plantada para fins energéticos no Brasil remonta ao final do século XIX, quando a Companhia Paulista de Estradas de Ferro precisou replantar suas terras com árvores de rápido crescimento, para suprir com madeira as locomotivas a vapor, o mais importante meio de transportes de passageiros e de carga da época (Magalhães, 2001).

Em 1937, após a implantação da maior usina integrada a carvão vegetal do mundo, a segunda usina de aço da Belgo-Mineira, iniciaram-se, de maneira pioneira na América Latina, os plantios de eucaliptos para a produção de carvão vegetal para suprir os altos fornos (Matarelli et al., 2001).

Dos anos 1960 aos 80, durante a vigência dos incentivos fiscais, foram plantados cerca de 6 milhões de hectares, cerca da metade desse total no estado de Minas Gerais, sendo a maioria de espécies de eucalipto. Esses plantios reverteram o quadro de consumo de carvão vegetal, que passou a basear-se em florestas plantadas, em substituição a florestas nativas (Assis, 2001).

Couto et al. (2003) referem que a valorização da biomassa como fonte de energia moderna surgiu na década de 1970 em função das crises do petróleo, nos anos de 1973 e 1979. Na ocasião, esse recurso passou a ser considerado alternativa viável para atendimento às demandas por energia térmica e de centrais elétricas de pequeno e médio porte.

Depois se desenvolveu o conceito de florestas energéticas durante a década de 1980, para definir as plantações florestais com grande número de árvores por hectare e, conseqüentemente, de curta rotação, que tinham como finalidade a produção do maior volume de biomassa por área em menor espaço de tempo (Magalhães, 2001). Nesse contexto, os estudos que visam à seleção de

espécies para florestas energéticas de eucalipto propõem homogeneizar as propriedades da madeira e melhorar, além da eficiência na queima direta, rendimentos em carvão, teor de carbono e outras propriedades desejadas na sua utilização como termorreduzidor.

No entanto, o interesse por energias alternativas foi reduzido a partir de 1985, pois, naquela época, os preços do petróleo voltaram a cair, diminuindo novamente o interesse pelo uso da biomassa, inclusive pelo uso da madeira, como fonte de energia alternativa. Porém, mais tarde, na década de 1990, a biomassa vegetal voltou a ganhar destaque no cenário energético mundial, devido a fatores como o desenvolvimento de tecnologias mais avançadas de transformação, a ameaça de esgotamento das reservas de combustíveis fósseis e, também, a incorporação definitiva da temática ambiental nas discussões sobre desenvolvimento sustentável.

Outro fato decisivo que contribuiu para aumentar o consumo de combustíveis oriundos da madeira foi o aumento da transformação de lenha em carvão vegetal para suprir vários setores, além do siderúrgico. Em 2005, dos 42,8% da produção de lenha, 39,3 milhões de toneladas foram convertidos em carvão vegetal (Brasil, 2006).

Em 2002, metade da produção da biomassa tradicional estava concentrada em seis países: Índia, China, Brasil, Etiópia, Indonésia e Congo, totalizando 1,7 bilhão de m³ (FAO, 2004). Já em 2005, a produção mundial foi de 1,2 bilhão de m³ de lenha e metade ocorreu em nove países: Brasil, Etiópia, Congo, Nigéria, Estados Unidos, Rússia, China, Uganda e Myanmar (FAO, 2006).

No setor residencial, metade das famílias do mundo ainda utiliza lenha ou carvão vegetal para cocção e aquecimento. O consumo de lenha e carvão vegetal está associado à disponibilidade de vegetação.

A oferta de madeira proveniente de plantações energéticas corresponde à quantidade total de biomassa lenhosa acumulada entre cada ciclo de corte. No Brasil, o valor médio de produtividade de biomassa lenhosa para plantações energéticas variou entre 25 m³/ha/ano e 50 m³/ha/ano ou entre 12,5 t/ha/ano e 25 t/ha/ano (Nogueira & Lora, 2003).

Para plantações de eucalipto no Brasil, com espaçamento entre árvores de 3 x 2 m, a biomassa lenhosa acumulada entre cada ciclo de corte, 7 anos, é de 112 t/há, com produtividade média de 16 t/ha/ano (Müller, 2002, citado por Nogueira & Lora, 2003).

A produção de madeira plantada está concentrada nas regiões sul e sudeste do Brasil, onde estão as atividades industriais do país. Em 2005, com a finalidade de atender aos pólos siderúrgicos, começou a produção de madeira plantada nos estados de Mato Grosso e Maranhão e aumentou a produção no Mato Grosso do Sul.

A produção de lenha de floresta plantada, por município, em mapas elaborados a partir de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2006a,b), pode ser vista na Figura 2.

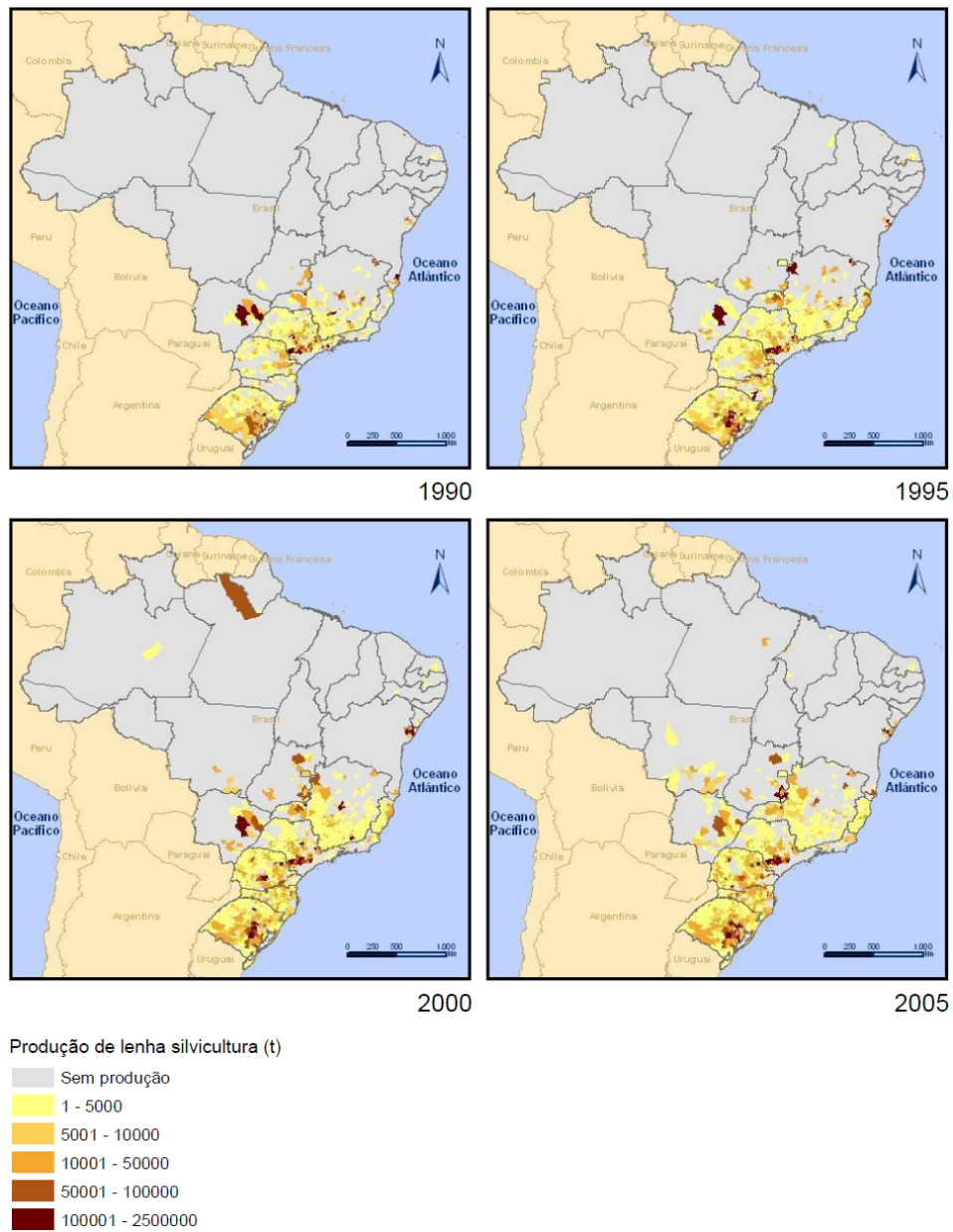


FIGURA 2 Produção de lenha de floresta plantada (t) no Brasil, série histórica, por município.
 Fonte: IBGE (2006a,b).

Segundo Zanetti (2007), as plantações de florestas para a geração de energia alternativa têm benefícios dentro do mercado de carbono, por meio do sequestro deste realizado durante o crescimento das árvores e a partir da redução de emissões na substituição da matriz energética dos combustíveis fósseis pela biomassa.

Segundo Monteiro (2005), parte da madeira para a produção de carvão vegetal no Brasil vem da expansão agrícola, parte de resíduos de serrarias, parte de exploração legal e sustentável de toras de madeira e parte de exploração ilegal.

O setor siderúrgico é responsável por grande parte do consumo do carvão vegetal produzido, utilizando-o nos altos-fornos. O alto-forno continua sendo, atualmente, o principal equipamento para a produção de ferro primário (ferro-gusa) no mundo, responsável por cerca de 60% do aço produzido mundialmente (Instituto Aço Brasil - IBS, 2008). Utilizam-se como matérias-primas uma carga metálica (minério de ferro, pelota e sinter), combustível (coque ou carvão vegetal) e fundentes (calcário, dolomita e quartzo), variando de acordo com o alto-forno e a própria matéria-prima.

Particularmente, dentre as razões para a escolha pelo uso de carvão vegetal como combustível para a redução do minério de ferro, ressaltam-se as que envolvem os custos. O preço do coque é, aproximadamente, 19,0% maior que o de carvão vegetal (AMS, 2010). Segundo a Associação Mineira de Silvicultura, dados de maio de 2010, o preço do carvão vegetal está em torno de R\$ 540,00/t, enquanto que o coque chega a ser comercializado por R\$ 640,00/t. Dessa forma, o uso de carvão vegetal torna-se economicamente competitivo, principalmente considerando os últimos aumentos de preços do coque e também o aumento da demanda mundial por ferro.

Além do exposto, por sua vez, o carvão vegetal ainda pode ser considerado uma fonte energética de uso amplo. Atualmente, no Brasil, é na

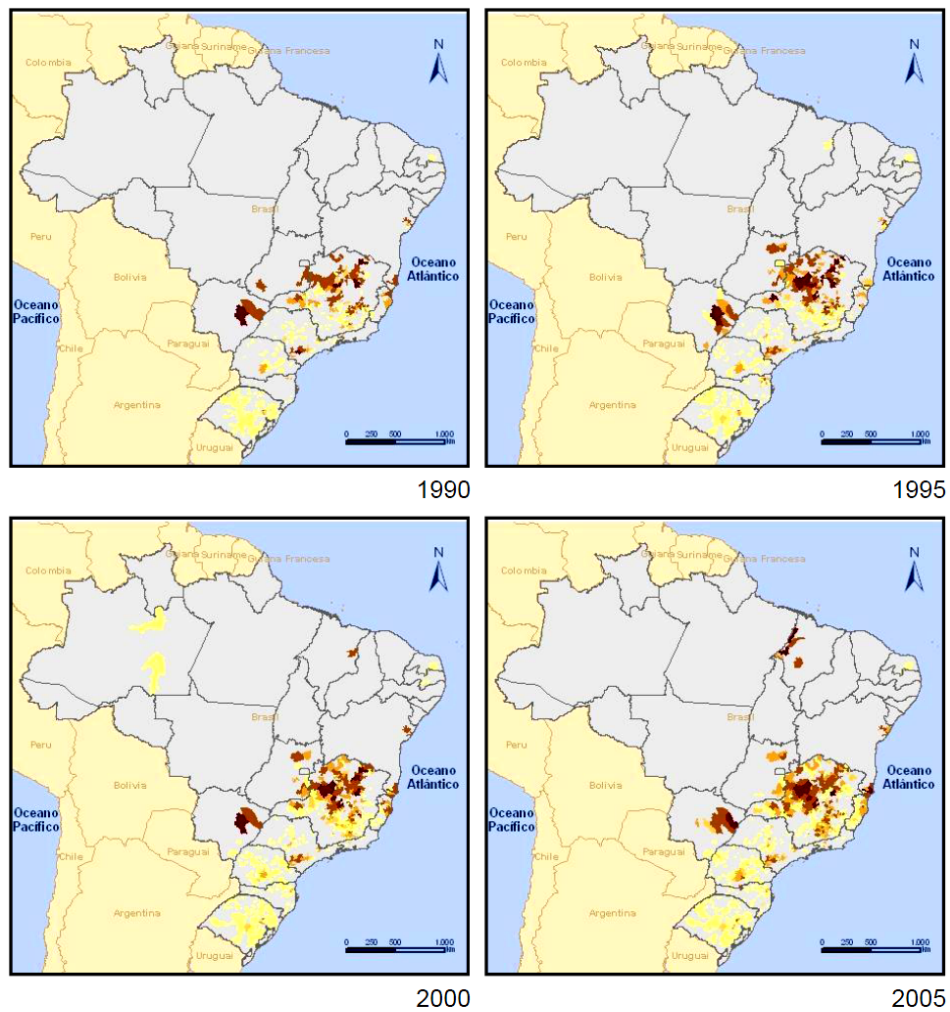
indústria metalúrgica que ele encontra seu melhor mercado por proporcionar vantagens na produção do ferro-gusa, quando comparada à de outras fontes de energia, como isenção de enxofre, fósforo e outros elementos indesejáveis. Com isso, seu uso como redutor melhora a qualidade do ferro-gusa e do aço produzidos, aumentando, conseqüentemente, o preço final do produto.

Especificamente no caso brasileiro, 35% de todo o ferro-gusa é produzido em altos-fornos a carvão vegetal (Sindicato Nacional dos Produtores de Ferro-Gusa - SINDIFER, 2010), sendo o maior produtor mundial nesse segmento.

A balança comercial do país é favorecida por este fato, pois praticamente toda a produção de metal, que é feita nos altos-fornos a carvão vegetal, é direcionada para exportação. O redutor carvão vegetal representa, na matriz de custo, mais de 55% de todo o custo do metal. É nele que têm sido feitos esforços para otimizar maiores rendimento e qualidade. Dessa forma, caracterizar as correlações entre as suas propriedades e as da madeira que o originou reflete diretamente em ganhos financeiros (SINDIFER, 2008).

A indústria metalúrgica consome cerca de 90% de carvão produzido no Brasil, com o setor de ferro-gusa e aço detendo quase 85% do consumo de carvão. Minas Gerais é o estado que detém, hoje, a maior produção de ferro-gusa a carvão vegetal, seguido do Maranhão e do Pará (SINDIFER, 2008).

Na Figura 3 estão dispostos os dados da produção de carvão vegetal de floresta plantada, a partir de informações do IBGE (2006b).



Produção de carvão vegetal de silvicultura (t)

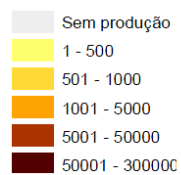


FIGURA 3 Produção de carvão vegetal de florestas plantadas (t), no Brasil, série histórica, por município.

Fonte: IBGE (2006b).

2.2.1 Crise no setor de produção de carvão

No segundo semestre de 2008, o mundo foi surpreendido por uma grave crise financeira que atingiu diferentes setores, dentre eles o siderúrgico. A retração foi sentida principalmente em Minas Gerais, estado que concentra mais de 70% da produção de ferro-gusa, que utiliza como termorredutor o carvão vegetal. Como consequência, ocorreu queda de mais de 50% no preço desse insumo, chegando a ser comercializado a R\$ 65,00/MDC. Vale ressaltar que, antes da crise, o mesmo chegou a ser vendido a R\$ 210,00/MDC. Com o preço do carvão em queda, os produtores tiveram grande dificuldade de comercialização e, quando conseguiam vendê-lo, o valor pago não era suficiente nem para cobrir os custos da produção (AMS, 2010).

No entanto, a partir de algumas medidas do governo brasileiro com o propósito de minimizar o efeito da crise econômica, como a redução da taxa de juros e de alguns impostos, foi observada, no segundo semestre de 2009, apesar de lenta, uma recuperação do setor, tendo havido até anúncios e expectativas de investimento e crescimento.

Alguns fatos são responsáveis por essa boa perspectiva, como, por exemplo, a realização da copa do mundo e das olimpíadas no Brasil, o que aquecerá o mercado interno (Silochi, 2009), além do aumento do preço do carvão vegetal, o qual está sendo comercializado a R\$ 120,00/MDC, começando a retornar a preços compensadores (AMS, 2010). Consequentemente, a essa demanda, a necessidade de matéria-prima para abastecimento dos altos fornos também será crescente, demandando cada vez mais, maiores investimentos em plantios comerciais de eucalipto com propriedades adequadas à produção de carvão com alto rendimento e qualidade.

De acordo com a Secretaria de Agricultura, o estado de Minas Gerais perde, anualmente, cerca de R\$ 300 milhões só em tributos, por causa do déficit na produção de carvão vegetal. Isso evidencia a preocupação do governo

estadual em buscar e apoiar pesquisas que aumentem a produtividade dos plantios e a qualidade da madeira para a produção do carvão vegetal, bem como parâmetros relacionados ao processo de produção.

2.3 Propriedades da madeira para produção de carvão vegetal

As propriedades da madeira podem ser definidas como características de resistência e elasticidade, as quais variam conforme a espécie, a idade e também a composição química, física e anatômica, além de sofrer influência do local geográfico, do clima e das condições do solo de origem (Carneiro, 2006).

De acordo com Trugilho (1995), a utilização da madeira para a produção de energia, apesar de não ser restritiva, depende de algumas das suas características internas, como, por exemplo, o teor de lignina e a densidade básica. Para esse fim, os estudos e as tecnologias adotadas buscam melhorar as propriedades da madeira no que se refere ao poder calorífico superior, ao teor de lignina, ao rendimento em carbono fixo, ao incremento médio anual, à produção de massa seca e à densidade básica, além de algumas propriedades mecânicas almejadas na produção de carvão para os altos-fornos.

Dessa forma, é caracterizada a qualidade da madeira e, para tanto, torna-se necessário que se estabeleça como parâmetro o uso final que será dado à mesma e a essa definição estão diretamente relacionadas as suas propriedades. Para fins de definição de valores econômico, ecológico e uso potencial das espécies, a sua composição química, especialmente o teor de lignina, é uma boa ferramenta, além da densidade básica, para caracterizá-la como uma matéria-prima renovável e potencial, disponível para a produção de energia.

Sob esse foco, observa-se, atualmente, o crescimento do interesse pelas folhosas, dentre as quais se destaca o eucalipto, para a obtenção de energia, paralelamente à demanda de informações, principalmente relacionadas às

condições de crescimento e à variação da densidade e por estudos relativos à complexidade anatômica e à composição química dessas espécies.

2.3.1 Densidade básica

A densidade básica da madeira é considerada um parâmetro referencial para a seleção de espécies florestais indicadas para produção de energia. É obtida a partir da relação entre massa absolutamente seca da madeira e o volume saturado, sendo expressa em g/cm^3 ou kg/m^3 .

A densidade básica é referenciada, por muitos autores, como índice de qualidade da madeira, pois ela influencia outras propriedades da mesma e dos produtos que são gerados.

Brito & Barrichelo (1980) obtiveram correlação positiva entre a densidade da madeira de espécies de eucalipto e a densidade do carvão produzido. Os autores encontraram valor para o coeficiente de correlação de 0,97 e concluíram, ainda, que a existência dessa correlação pode direcionar, fundamentalmente, a escolha de espécies destinadas à produção de carvão, bem como as pesquisas de melhoramento florestal. Ressaltam que, no caso de espécies de curta rotação, cujas densidades sejam elevadas, são muito vantajosas para os principais usos do carvão vegetal produzido a partir delas.

Brito (1993) afirma que a densidade da madeira afeta diretamente a capacidade de produção do carvão vegetal. O autor relaciona esse fato à maior produção em massa ocasionada pela ocupação no forno por madeiras mais densas, para um determinado volume. Refere também que madeira mais densa produz carvão com densidade mais elevada, o que resulta em algumas vantagens para a maioria dos usos aos quais se prestam esse insumo.

Trugilho et al. (1996) observaram correlação negativa entre a densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* e o teor de lignina. Os autores fizeram inferências de que o fato pode ser explicado devido ao fato de as amostras

estudadas serem de árvores jovens e, nelas, o teor de lignina ainda não havia atingido a estabilidade.

Segundo Lelles & Silva (1997), a densidade básica é uma propriedade física que retrata a qualidade da madeira, por ser influenciada por diversos fatores inerentes a cada gênero, espécie e árvore, não sendo aconselhável sua utilização isolada como parâmetro de qualidade.

Vale et al. (2001) observaram que não houve correlação entre o rendimento em carvão e a densidade básica da madeira. Contudo, Pastore et al. (1982), trabalhando com espécies da Amazônia e Oliveira (1988), com *Eucalyptus grandis*, obtiveram relação positiva e significativa entre esses parâmetros, enquanto Vital et al. (1987) observaram relação negativa.

A correlação entre a densidade básica da madeira e o rendimento em carvão é apresentada em vários trabalhos com comportamentos diferenciados, podendo ou não a densidade ter efeito sobre o rendimento gravimétrico. Esse efeito, normalmente, está associado ao teor de lignina na madeira. De modo geral, madeiras de maior densidade apresentam composição química mais estável, em função de essa característica ser comum às árvores que já se encontram em fase de maturidade e produzem, via de regra, um carvão de maior densidade, com vantagens para diversas aplicações.

Pereira et al. (2000) relatam que o aumento na densidade da madeira associado a elevados teores de lignina favorece a produção de carvão de melhor qualidade, com alto rendimento gravimétrico, aumento no teor de carbono fixo e na densidade aparente do carvão.

Trugilho et al. (2001) referem-se à densidade como a propriedade física que mais influencia a qualidade do carvão vegetal. Silva (2001) ressalta, ainda, que a densidade básica da madeira de eucalipto varia desde as mais leves até aquelas bastante pesadas, com valores entre 0,4 e 1,2 g/cm³.

Antal & Gronli (2003) relatam que a densidade do carvão é linearmente proporcional à densidade básica da madeira com um coeficiente de correlação de 0,82.

2.3.2 Composição química

2.3.2.1 Composição elementar

A análise química elementar da madeira mostra que, sem considerar as quantidades mínimas de nitrogênio e de outros elementos, como o enxofre, esta é constituída, aproximadamente, por 50% de carbono, 6% de hidrogênio e 44% de oxigênio. Independente da espécie, das diferenças genéticas ou da idade, essa composição se mantém aproximadamente constante (Penedo, 1980).

Klock et al. (2005), ao apresentarem as porcentagens dos principais componentes presentes na madeira de folhosas, mencionam que, da composição total da celulose, 40% desse polímero é formado por carbono.

A composição química elementar da madeira é citada por Brito et al. (1979) como um importante parâmetro quando o objetivo é o uso da madeira como fonte de energia. Os autores ressaltam, também, que existe uma marcada uniformidade entre diferentes espécies, podendo ser generalizada a composição com os seguintes percentuais: C: 50,2%; H: 6%; N: 0,2%; O: 43,4% e teor de cinzas: 0,2%. De acordo com a Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG (2010), a presença de oxigênio na madeira oferece a desvantagem de diminuir seu valor como combustível.

Para Raad (2004), apesar de a composição elementar dos grupos de madeira variar pouco, as frações em massa dos seus componentes diferem de uma madeira para outra. Dessa forma, a associação desse fato às possíveis alterações promovidas pelas porcentagens de cada elemento presente na massa dos componentes estruturais da madeira pode exercer importante influência nas

propriedades dos produtos considerados como fontes secundárias de energia da madeira, especialmente do carvão vegetal.

De acordo com UFMG (2010), a grande maioria dos combustíveis, excetuando-se os nucleares, depende do efeito térmico resultante da combustão do carbono e hidrogênio que eles contêm. O mesmo autor ressalta algumas características químicas da lignina e afirma que o tipo desse composto difere conforme seja originário da madeira de folhosa ou conífera e que ele caracteriza-se pelo elevado número de grupos OCH_3 e de grupos OH .

De modo geral, na literatura, há referências à influência da madeira nas propriedades do carvão. No entanto, pouco se fala sobre a relação entre a composição elementar da mesma, inferindo-se a proporção presente de cada elemento na constituição química das macromoléculas que, por sua vez, exercem o papel mais significativo na formação da madeira e, provavelmente, define as características dos produtos oriundos da mesma, como mencionado anteriormente.

Dessa forma, acredita-se que será possível relacionar, por exemplo, o percentual que o carbono, o oxigênio e o hidrogênio representam na madeira, para melhor compreender o processo de carbonização a partir do conhecimento dos comportamentos térmico da lignina, das hemiceluloses e da celulose.

Segundo Lora (1997), a celulose presente na madeira de eucalipto apresenta em sua composição 45% de carbono e a lignina tem entre 61% e 67% desse componente.

Lora (1997), estudando as perspectivas da utilização da biomassa para fins energéticos, apresentou a composição elementar da madeira de eucalipto, comparando-a com outras biomassas, conforme pode ser visto na Tabela 1.

TABELA 1 Composição elementar de diferentes tipos de biomassa.

Tipo de Biomassa	Composição elementar (%)				
	C	H	O	N	S
Eucalipto	49,00	4,87	43,79	0,30	0,01
Pinho	49,29	4,99	44,36	0,06	0,03
Casca de arroz	40,96	4,30	34,86	0,40	0,02
Bagaço de cana	44,80	4,35	39,55	0,38	0,01
Casca de coco	48,23	4,23	33,19	2,98	0,12
Sabugo de milho	46,58	4,87	44,46	0,47	0,01
Ramas de algodão	47,05	4,35	40,97	0,65	0,21

Fonte: Lora (1997).

Penedo (1980) relata que dos 50% de carbono presente na madeira, boa parte desse elemento reage com o hidrogênio e com o oxigênio, quando submetido ao processo de carbonização volatiliza, transformando-se em gases não condensáveis como CO, CO₂, C_nH_n e gases condensáveis como pirolenhoso e alcatrão. Assim, somente uma fração pode ser considerada como carbono fixo que é estável e não se decompõe sob atmosferas inertes.

2.3.2.2 Composição química estrutural

Os vários componentes químicos da madeira podem ser agrupados em: carboidratos, substâncias fenólicas, terpenos e terpenoides, ácidos alifáticos, álcoois, proteínas, aldeídos, hidrocarbonetos, alcaloides, ácidos dibásicos, entre outros. Porém, a fração mais significativa da massa da madeira é representada pelos componentes estruturais, ou macromoléculas, que são os carboidratos, principalmente celulose e hemiceluloses, e as substâncias fenólicas, especialmente a lignina.

De acordo com Tsoumis (1991), em termos médios, as madeiras são constituídas por: celulose: 40%-45%, hemiceluloses: 20%-30%, lignina: 18%-25% (Folhosas) e 25%-35% (Coníferas), extrativos: 3%-8% e cinzas: 0,4%.

Rowell (2005) afirma que, quimicamente, a madeira pode ser definida como um polímero tridimensional, formado por celulose, hemiceluloses e

lignina, e uma menor quantidade de extrativos e materiais inorgânicos. Menciona, ainda, que, na madeira, em base seca, toda a parede celular é formada por polímeros de açúcares, os carboidratos, numa porcentagem aproximada de 65% a 75%, que são combinados com a lignina numa proporção de 18% a 35%. E, em geral, há uma variação na composição química entre espécies, entre árvores de uma mesma espécie e dentro da própria árvore.

2.3.2.2.1 Celulose

A celulose, principal componente da parede celular, é um polissacarídeo linear constituído exclusivamente de um único tipo de açúcar (D-glucose), com alto grau de polimerização. Devido à sua estrutura cristalina, a celulose não é prontamente hidrolisável, ao contrário das hemiceluloses, que podem ser facilmente hidrolisadas em açúcares simples (Rowell, 2005).

Reações complexas ocorrem com os componentes químicos da madeira à medida que é fornecido calor à mesma. Embora sejam poucos os trabalhos que objetivam correlacionar os componentes químicos da madeira com as propriedades do carvão produzido, alguns trabalhos foram realizados com esse propósito.

De acordo com Martins (1980), a ruptura da ligação glicosídica na celulose, durante a carbonização, ocorre em temperaturas acima de 300°C, com produção subsequente de levoglucosana, levoglucosenona e outras substâncias. Essas reações são precedidas e acompanhadas por desidratação, seguida de outras reações de eliminação com formação de inúmeros compostos voláteis. Em atmosfera de nitrogênio, o autor observou que a celulose produz 34,6% de carvão, a 300°C.

Como o processo de carbonização em fornos de alvenaria ocorre em temperaturas superiores a 300°C, Oliveira et al. (1984) observaram que a contribuição da celulose no rendimento desse processo é pouco significativa. Os

autores concluíram que, a 400°C, a celulose contribui com o rendimento em carvão de, aproximadamente, 13%.

Por sua vez, Collet (1985), estudando madeiras utilizadas na fabricação de carvão vegetal, inferiu que o teor de celulose da madeira não tem relação definida com as propriedades do carvão produzido, especificamente, com a quantidade de carbono fixo obtida.

2.3.2.2.2 Hemiceluloses

As hemiceluloses também são polissacarídeos e diferem da celulose por serem polímeros ramificados; além disso, têm cadeia com menor grau de polimerização e são constituídas de mais de um tipo de açúcar, especificamente cinco açúcares neutros, as hexoses (glucoses, manose e galactose) e as pentoses (xilose e arabinose). Algumas hemiceluloses contêm adicionalmente ácidos urônicos. As folhosas, de maneira geral, contêm maior teor de hemiceluloses que as coníferas, e a composição é diferenciada (Klock et al., 2005).

Martins (1980) relata que as hemiceluloses são um conjunto de compostos menos estáveis termicamente, quando comparadas à celulose, devido à sua natureza amorfa e ramificada. A destilação desses compostos gera muitos produtos. Embora suas reações de pirólise sejam semelhantes, as hemiceluloses produzem maiores rendimentos de furfural. O furfural é um composto reativo e pode formar reações secundárias em condições drásticas de pirólise.

Oliveira et al. (1984) observaram que, sob 400°C, as hemiceluloses contribuem com o rendimento em carvão de, aproximadamente, 10%.

No entanto, segundo Raad (2004), o fornecimento de calor ao processo de carbonização produzirá mudanças no comportamento das hemiceluloses no que se refere ao rendimento em carvão, obtendo-se apenas 10% de rendimento sob temperatura de 500°C.

2.3.2.2.3 Lignina

A lignina é um composto amorfo, tridimensional, de composição química bastante complexa, que se constitui de unidades de fenilpropano, tendo uma cadeia altamente ramificada. É o componente mais hidrofóbico da madeira, com função adesiva entre fibras, o que confere dureza e rigidez à parede celular (Rowell, 2005).

Muitos autores relatam que a lignina é o composto mais importante quando se objetiva a produção de carvão vegetal, pois o rendimento gravimétrico do processo de carbonização e a qualidade do carvão produzido estão diretamente relacionados aos teores presentes na madeira, sem, no entanto, ser comum haver referência ao tipo do composto quando tal objetivo é citado.

Brito & Barrichelo (1977) observaram que, dentre os produtos resultantes da carbonização da lignina a 550°C, o mais abundante foi o carvão, mostrando a estreita relação entre o teor de lignina presente na madeira e o rendimento em carvão. Os mesmos autores estudaram correlações entre as características químicas da madeira de eucalipto, com idades entre 6 e 12 anos, e a produção de carvão vegetal e observaram, como uma das mais significativas, aquela existente entre o teor de lignina da madeira e o teor de carbono fixo do carvão. Os autores inferem que madeiras mais lignificadas proporcionam a produção de carvão com maiores teores de carbono fixo devido ao fato de a lignina possuir cerca de 65% de carbono elementar (C) em sua composição contra 45% que ocorre, normalmente, na celulose e nas hemiceluloses.

Collet (1985), em estudo comparativo entre diversas espécies utilizadas para a fabricação de carvão vegetal, demonstrou que a quantidade de carbono fixo, fornecida por unidade de madeira enfiada, é função da porcentagem de lignina da madeira.

Para Klock et al. (2005), o teor de carbono na lignina varia de acordo com a madeira e o método de extração, entre outros fatores. Os autores afirmam

que a madeira de folhosa é composta de lignina com teor de carbono de 60%. Dessa forma, e considerando-se que o carvão é constituído de carbono, madeiras com altos teores de lignina são mais indicadas para a produção de carvão.

Martins (1980) refere-se a esse composto mencionando sua degradação térmica sob diferentes faixas de temperatura. O autor ressalta que, embora a lignina comece a se degradar (perder massa) em temperaturas mais baixas, a partir de 150°C, sua degradação é mais lenta. O oposto pode ser observado no comportamento da celulose e das hemiceluloses. A lignina continua a perder massa mesmo em temperaturas superiores a 500°C, dando como resultado um resíduo carbonoso. Outra fração de produtos de pirólise da lignina é o alcatrão (até 15%), constituindo-se numa mistura de compostos fenólicos. O autor infere, ainda, que a perda de massa final experimentada pela lignina é bem menor do que os outros dois componentes principais da madeira.

O mesmo autor afirma que a lignina é o componente da madeira mais estável termicamente, quando comparada com a holocelulose e com a própria madeira. Esse fato está relacionado, segundo o autor, com a complexidade de sua estrutura química.

Segundo Oliveira et al. (1984), a lignina é o composto que mais contribui para produção do resíduo carbonoso e do alcatrão insolúvel, produzidos a partir da carbonização da madeira. Esses autores ressaltam que, a 400°C, a lignina proporciona rendimentos de resíduo carbonoso de, aproximadamente, 55%.

A lignina é uma macromolécula presente na parede celular secundária dos vegetais e na lamela média. Devido à diferença de volume entre essas duas regiões, aproximadamente 70% da lignina localiza-se na parede secundária, porém, sua maior concentração ocorre na lamela média (Rowell, 2005).

Segundo Salo et al. (1989), a produção de lignina na planta ocorre a partir da polimerização natural de monômeros fenilpropanoides, por meio da

condensação desidrogenativa dos álcoois *p*-cumarílico, coniferílico e sinapílico, os quais têm suas respectivas estruturas químicas mostradas na Figura 4. Esses álcoois possuem diferenças nos grupos substituintes do anel aromático e são os respectivos precursores primários das unidades conhecidas como *p*-hidroxifenila, guaiacila e siringila, conforme Figura 5.

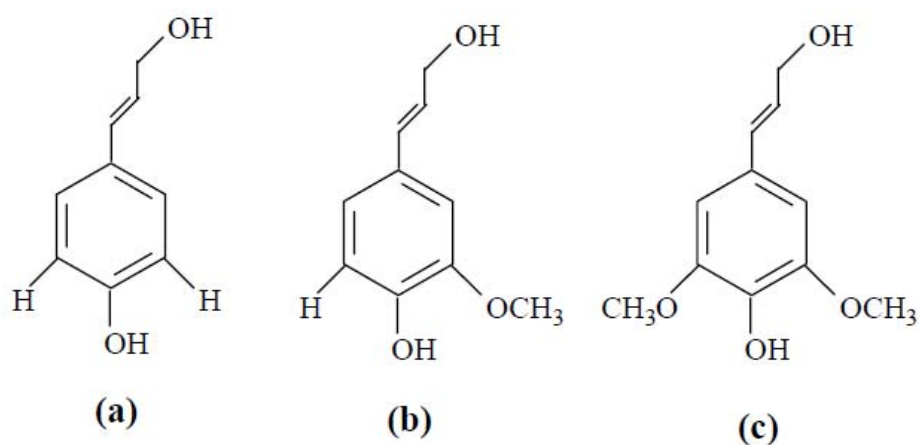


FIGURA 4 Estrutura química dos precursores básicos das principais unidades aromáticas presentes na molécula de lignina. (a) álcool *p*-cumarílico, (b) álcool coniferílico e (c) álcool sinapílico. Fonte: Rowell (2005).

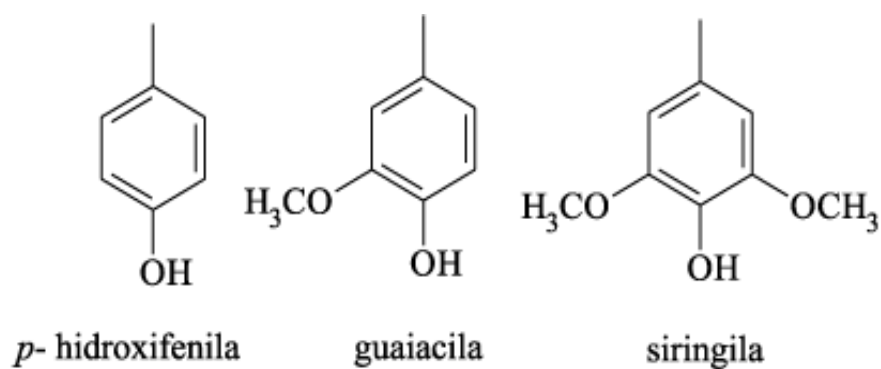


FIGURA 5 Principais unidades aromáticas presentes na molécula de lignina. Fonte: Rowell (2005).

O resultado final dessa polimerização é uma estrutura heterogênea na qual as unidades básicas são unidas por ligações carbono-carbono e ligações éter.

A quantidade das unidades citadas anteriormente, presentes na lignina, é variada e elas se classificam de acordo com a composição das mesmas. As ligninas das madeiras de gimnospermas são, basicamente, produtos da polimerização do álcool coníferico e são chamadas de lignina guaiacila, enquanto as ligninas das angiospermas lenhosas, grupo de madeira ao qual pertence o eucalipto, são, principalmente, do tipo guaiacila-siringila, devido à copolimerização dos álcoois coníferico e sinapílico (Río et al., 2001; Rowell, 2005).

As angiospermas lenhosas e gimnospermas apresentam, ainda, unidades *p*-hidroxifenila na composição estrutural de suas ligninas, porém, em menores proporções, quando comparadas às angiospermas herbáceas. A estrutura proposta da lignina presente na madeira das angiospermas é mostrada na Figura 6.

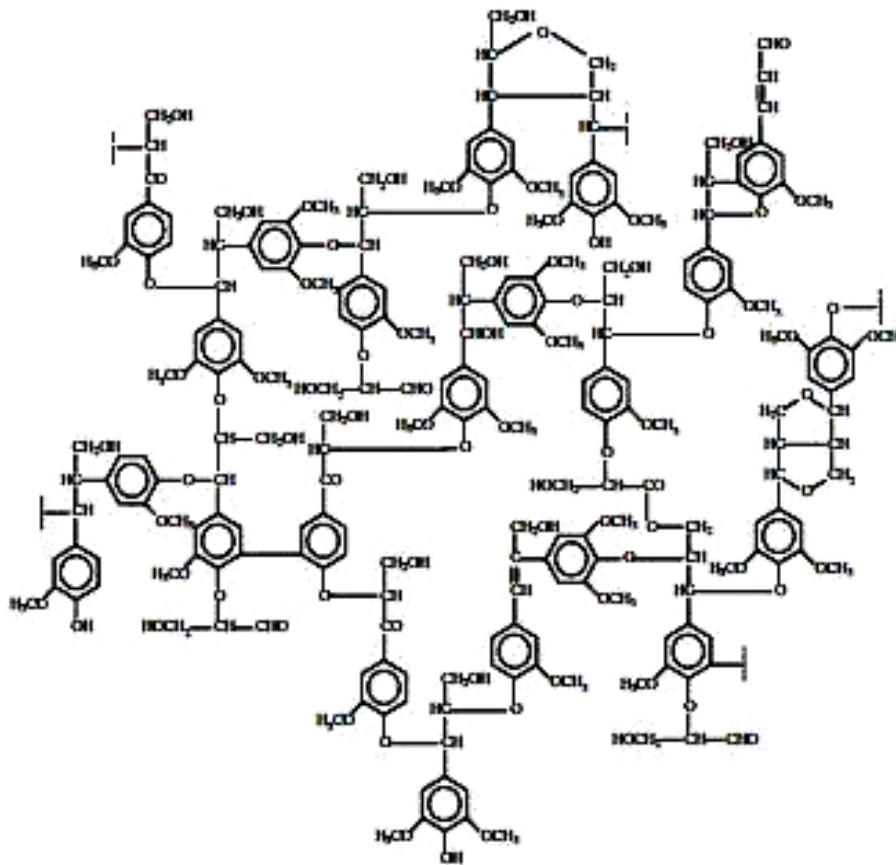


FIGURA 6 Estrutura proposta para a lignina presente em madeira das angiospermas.
 Fonte: Piló-Veloso et al. (1993).

Diante da diversidade estrutural das ligninas em diferentes gêneros vegetais ou, ainda, dentro de uma mesma espécie, vários estudos vêm sendo desenvolvidos, no intuito de caracterizar e quantificar suas unidades monoméricas. Esses estudos estão voltados, principalmente, para as madeiras de angiospermas, uma vez que estas apresentam elevadas quantidades da estrutura siringila.

O parâmetro usualmente estabelecido para tal quantificação é a relação siringila/guaiacila (S/G), ou seja, é a proporção entre as unidades siringila e guaiacila presentes na lignina (Oudia et al., 2007).

Segundo Gutiérrez et al. (2006), a razão entre as unidades monoméricas siringil/guaiacil presente nas madeiras de eucalipto pode variar de 0,5 a 4,0. Tendo em vista que a diferença química estrutural presente nos diferentes tipos de lignina pode afetar o rendimento da carbonização em função do posicionamento do grupo funcional no anel aromático, tornando esse mais ou menos reativo, a relação S/G pode ser estabelecida como um parâmetro global da qualidade tecnológica da madeira, uma vez que abrange vários fatores, dentre eles características anatômicas e químicas. Essa característica poderá, dessa forma, também, auxiliar nos processos de seleção de clones, a fim de se obter árvores com maior qualidade para a produção de carvão, em termos de reatividade e rendimento em carbono fixo.

Vários pesquisadores relataram que madeiras com maior proporção de unidades siringila (S) em relação às unidades guaiacila (G) proporcionam maior rendimento de polpa, além de serem mais facilmente deslignificadas (Collins et al., 1990; González-Vila et al., 1999; Río et al., 2001). Em função do baixo número de trabalhos na área de carbonização da madeira, a interpretação da relação S/G é citada no presente trabalho como uma inferência de que essa interpretação deve ser inversa àquela citada para área de celulose, quando se pensa nesse tipo de estudo de qualidade da madeira para a produção de carvão.

Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que o grupo guaiacila tem uma posição aromática, C5, disponível para fazer fortes ligações entre átomos de carbono durante o processo de biossíntese da lignina e, portanto, é, provavelmente, mais resistente à degradação térmica (Gutiérrez et al., 2006). Dessa forma, maiores proporções de unidades guaiacila (G) em relação às unidades siringila (S) são desejáveis quando se pretende utilizar a madeira para

produção de carvão, pois esse fato contribuiria para o maior rendimento gravimétrico em carvão.

De acordo com Wallis et al. (1996) e Carvalho (2002), a relação lignina siringila/guaiacila varia de 0,51 até 5,2, dependendo da espécie de madeira. Gomide et al. (2005), avaliando a relação S/G de diferentes clones de eucalipto, obtiveram valores variando entre 2,0 e 2,8. Gomes (2007), ao estudar a caracterização de seis clones de eucalipto aos três anos de idade, obteve relação S/G variando entre 2,50 e 3,12.

Marcelo (2007), ao analisar a relação S/G na madeira de seis espécies de eucalipto, utilizando o método de oxidação com nitrobenzeno, encontrou valores variando de 2 a 4,3. A maior relação S/G observada pela autora foi na madeira de *Eucalyptus globulus* e a menor, no híbrido de *Eucalyptus grandis* com *Eucalyptus urophylla*.

Campos (2009), ao estudar a influência das características da madeira de um híbrido de eucalipto aos 4,9 anos de idade na produção de carvão vegetal, verificou relação S/G de 3,82, proveniente de uma população que apresentou relação S/G de até 4,04.

2.3.2.2.4 Extrativos

Extrativo é um termo empregado para descrever um número de vários compostos químicos contidos na madeira, mas que não fazem parte de sua estrutura essencial. Por essa razão, são também chamados de componentes estranhos. Nesse grupo de compostos estão incluídos: polifenóis, óleos, gorduras, gomas resinas, ceras e amido, entre outros.

Oliveira (1988) afirma que há uma relação diretamente proporcional entre o teor de extrativos da madeira e o rendimento em carbono fixo do carvão. Di Blasi et al. (1999) também se referem à relação entre o teor de extrativos da madeira e maiores rendimentos em carbono fixo ao citarem a comparação entre

espécies que possuem diferentes teores de extrativo, separando-as em grupos de baixo e alto teores. Os autores relatam que maiores rendimentos são observados em madeiras ricas em extrativos. Oliveira (1989) relata a existência de correlação positiva e significativa entre o teor de extrativos e o rendimento em carvão vegetal, citando os trabalhos de Collet (1985) e Vital et al. (1987), nos quais essa correlação foi observada.

Trugilho et al. (1996), trabalhando com *Eucalyptus saligna* em quatro idades diferentes, encontraram correlações negativas significativas entre o teor de extrativos totais e a densidade básica da madeira.

No entanto, Vital et al. (1994) não encontraram correlação entre o teor de extrativos e as propriedades do carvão produzido a partir da madeira de *Eucalyptus camaldulensis*, ao 33 meses de idade.

Para Bowyer et al. (2003), a quantidade de extrativos em madeiras varia de 3% a mais de 30% do seu peso seco.

A maioria dos extrativos, tanto nas coníferas quanto nas folhosas, está localizada no cerne, sem considerar a casca, e alguns são responsáveis pela cor, odor e durabilidade da madeira. Os extrativos de origem fenólica exercem importante influência no aumento do poder calorífico da madeira e do carvão, por possuírem elevado teor de carbono (Rowell, 2005).

Frederico (2009) relata que, devido à natureza fenólica de diversos extrativos, esses são ricos em carbono, podendo contribuir com o aumento do poder calorífico da madeira; e se não forem degradados durante a carbonização, podem também contribuir com o aumento do poder calorífico do carvão e do rendimento gravimétrico.

2.3.3 Composição anatômica das folhosas – qualidade das fibras

Burger & Richter (1991) descrevem os componentes anatômicos das madeiras de folhosas como sendo os elementos de vasos responsáveis pela

condução da seiva; os fibrotraqueídeos e as fibras libriformes, pela resistência mecânica da madeira; os tecidos de reserva, pelo armazenamento de compostos e os raios, pela transferência do material no sentido radial.

Os mesmos autores relatam que as fibras presentes na madeira de folhosas, como é o caso do eucalipto, que é considerada uma espécie de fibra curta, têm comprimento variando entre 0,75 e 1,30 mm. Esse grupo vegetal é assim considerado quando comparado ao grupo das coníferas que possuem fibras (traqueídes) com comprimento três a cinco vezes superior. Segundo Moreira (1999), as folhosas têm estrutura mais complexa que as coníferas, contendo maior arranjo e tipos celulares.

Os parâmetros usualmente considerados nos estudos da qualidade das fibras, no que se refere às características anatômicas da madeira, são definidos a partir da mensuração de dimensões fundamentais, como comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede. No entanto, são poucos os trabalhos desenvolvidos com o objetivo de relacionar a composição anatômica das espécies ao seu potencial para a geração de energia e/ou a produção de carvão vegetal. Em geral, os que o fazem relacionam essa característica da madeira à sua densidade básica ou com outros fatores, como a influência genética e a identificação de espécies, entre outros.

Inferências são feitas por alguns autores em relação à influência de diferentes materiais genéticos nas dimensões dos elementos anatômicos da madeira. Para Zobel (1992), o comprimento das células pode ser controlado por fatores genéticos e alterado por mudanças de crescimento. Os mesmos autores ainda mencionam que a largura das células é uma dimensão que está relacionada com o crescimento sazonal e que o diâmetro do lume depende da largura e da espessura da parede das fibras. Quanto maior o seu valor, mais espaços vazios serão encontrados na madeira e, como consequência, menor massa específica.

Malan (1995) afirma que a espessura da parede das fibras é uma característica que também está relacionada aos fatores genéticos, bem como aos fatores ambientais e à idade da árvore. Moreira (1999) relata que esse parâmetro da fibra está intimamente relacionado com a densidade da madeira, conforme por ser visto nas citações de vários autores que mostram correlações positivas entre essa e a espessura da parede dos traqueídeos e fibras.

Segundo Silva (2001), além da identificação das espécies, os estudos anatômicos possibilitam informações sobre a estrutura do lenho, permitindo identificação das relações entre o lenho e as características gerais da madeira, inclusive seu potencial para a geração de energia. Pádua (2009) afirma que o estudo dos parâmetros referentes à qualidade das fibras fornece informações para auxiliar na indicação de espécies potenciais para a geração de energia e a produção de carvão vegetal. O autor recomenda madeiras para a geração de energia que apresentem composição anatômica caracterizada pela presença de fibras com fração parede alta e ressalta que essa característica está aliada à ocorrência de alta densidade básica.

2.3.4 Poder calorífico

O poder calorífico da madeira está relacionado à quantidade de energia liberada (kcal) por unidade de massa (kg) da matéria, quando submetida ao processo de combustão. Nesse caso, como a madeira possui hidrogênio, a combustão resulta, além de outros compostos, na formação de água na forma gasosa, a qual, se for condensada, irá liberar o calor de condensação.

De modo geral, existem três tipos de poder calorífico, a saber: poder calorífico superior, poder calorífico inferior e poder calorífico útil. Quando incluir o calor de condensação da água, o chamado calor latente de vapor d'água, esse será chamado de poder calorífico superior (PCS) e, quando o poder calorífico obtido não o fizer, trata-se, então, do poder calorífico inferior (PCI) e

será obtido menor valor quando comparado ao PCS. Sob essa condição, a água gerada será perdida, levando consigo parte da energia liberada pela madeira. Já o poder calorífico útil é obtido por meio de equações nas quais se leva em consideração o teor de umidade do combustível.

De acordo com Pereira et al. (2009), o poder calorífico superior da madeira de eucalipto varia na faixa de 4.400 a 4.800 kcal/kg. Vale et al. (2001) encontraram, em estudo comparativo, para a *Acacia mangium*, valor médio para o poder calorífico superior de 4.619 kcal/kg e, para o *Eucalyptus grandis*, de 4.641 kcal/kg. Porém, vale ressaltar que existe uma dependência entre o poder calorífico superior e o inferior, regida pela quantidade de hidrogênio presente no combustível. Portanto, o poder calorífico da madeira é influenciado diretamente pela umidade, além de o ser também pela composição química da madeira.

Ladeira (1992), citado por Cotta (1996), ratifica que a umidade é fator importante a ser considerado na aferição do poder calorífico da madeira. A autora afirma que a presença de água na madeira representa a redução do poder calorífico, em razão da energia necessária para evaporá-la. Além disso, se o teor de umidade for muito variável, o controle do processo de combustão pode se tornar difícil.

Silva et al. (1983), comparando a biomassa de diferentes espécies para a produção de energia, encontraram, para a madeira de *Eucalyptus viminalis*, com teor de umidade de 12%, poder calorífico superior igual a 4.691 kcal/kg.

Dentre os trabalhos que relacionam o poder calorífico à composição química da madeira, está o realizado por Doat & Petroff (1975) que, ao pesquisarem espécies tropicais, mostraram que uma madeira rica em lignina e em extrativos solúveis em compostos orgânicos tem elevado poder calorífico. Outras relações também são estabelecidas a partir da análise da qualidade da madeira para a geração de energia, como aquelas observadas por Pastore et al.

(1982) e Vale et al. (2001), nas quais foram encontradas altas correlações entre o teor de carbono fixo da madeira e seu poder calorífico.

2.3.5 Análise termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica (TGA) da madeira permite o registro constante da perda de massa de uma amostra submetida a um programa de temperatura, com variação de tempo ou de temperatura. Com base nessa técnica é possível interpretar como é o comportamento da madeira durante a sua decomposição térmica, além de fornecer informações sobre em quais faixas de temperatura a decomposição é mais pronunciada.

Alguns trabalhos foram realizados utilizando a termogravimetria para prever o comportamento da madeira de eucalipto, tais como os de Kifani-Sahban et al. (1996), Raveendran et al. (1996), Gómez et al. (2000), Raad (2004) e Várhegyi (2007). No entanto, a maioria consiste no estudo da decomposição térmica da madeira refletida nas curvas termogravimétricas com foco na cinética de reação. Pouco se observa sobre o comportamento de diferentes materiais genéticos, visando caracterizar aquele que apresenta maior resistência térmica nas faixas de temperatura estudadas.

Quando a análise termogravimétrica é realizada sob temperaturas variadas, é considerada como TGA dinâmica e a taxa de decomposição torna-se dependente da temperatura e do tempo. Embora a análise TG forneça apenas uma informação global sobre o conjunto de reações que ocorrem durante a pirólise, ela permite a comparação do comportamento térmico da biomassa, evidenciando, dentre outros, a influência de diferentes materiais genéticos sobre a cinética da reação.

A madeira, quando submetida a altas temperaturas, sofre a decomposição térmica dos seus componentes químicos, passando por um processo de carbonização, sob atmosfera inerte e/ou combustão, sob atmosfera

oxidante. Cada componente da madeira se decompõe mais intensamente em distintas faixas de temperatura, sendo variáveis, conforme faixas citadas por diversos autores. Segundo Conesa (1995), cada fração dos componentes da madeira tem uma cinética de decomposição térmica bem diferenciada. Os autores afirmam que as hemiceluloses sofrem maiores picos de degradação entre 200° e 300°C, a celulose entre 240° e 350°C e a lignina entre 350° e 500°C.

Como resultado do fornecimento de temperaturas crescentes ao longo do tempo durante o qual é realizada a análise termogravimétrica, há, geralmente, o decréscimo da massa da amostra, pois desse fato resulta a perda de umidade e de materiais voláteis, além da ocorrência de reações químicas. A análise pode ser realizada sob atmosfera oxidante (ar ou oxigênio) ou sob atmosfera inerte (N₂ e CO₂).

Em estudos realizados pela Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC (1979), em atmosfera de nitrogênio, objetivou-se identificar o comportamento da decomposição térmica da massa total em serragem de *Pinus*. Os resultados mostram que a maior perda de massa total registrada foi em torno de 63%, sob temperaturas variando entre 270° e 400°C, atingindo perda total de 85% em temperatura equivalente a 1000°C.

Antal & Mok (1990) relatam que o rendimento do carvão, obtido em fornos industriais no Brasil e baseado na massa total, varia em torno de 25% a 35%. No entanto, para Antal & Várhegyi (1995), o rendimento da madeira deveria ser em torno de 40% ou mais, visto sob considerações de cálculos estequiométricos e considerando também o controle eficiente dos parâmetros de pirólise, principalmente a temperatura final.

Oliveira (2003), ao estudar o comportamento das curvas termogravimétricas da madeira de *Eucalyptus grandis*, observou que a degradação térmica teve início a 150°C de temperatura, sendo mais pronunciada na faixa entre 250° e 450°C, com redução de 68,52% da massa inicial.

Raad (2004), estudando a degradação térmica dos componentes estruturais da madeira, observou a perda em massa da celulose, hemiceluloses e lignina em diferentes faixas de temperatura. Os resultados da análise podem ser observados na Figura 7. O autor observou também o comportamento da decomposição térmica da massa total da madeira de *Eucalyptus* spp., em atmosfera de nitrogênio e utilizou uma equação geral do mecanismo cinético de carbonização para a predição dos resultados. O autor relatou que os maiores picos de decomposição ocorreram nas faixas de temperaturas correspondentes a 380°C e 400°C, aproximadamente.

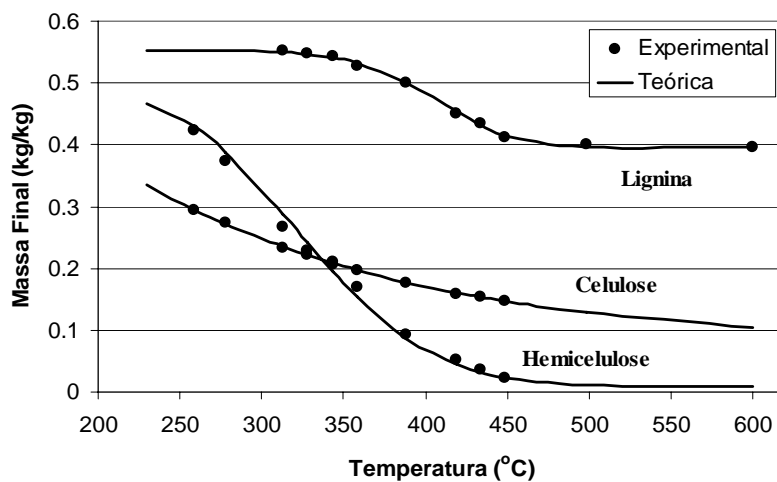


FIGURA 7 Massas finais dos componentes da madeira versus temperatura de carbonização.

Fonte: Raad (2004).

Campos (2009), ao estudar a influência dos parâmetros do processo de pirólise sobre o comportamento térmico da madeira de eucalipto e dos seus componentes principais, por meio da termogravimetria, observou uma faixa de maior degradação térmica da madeira entre 250° e 400°C. A autora constatou

que a madeira apresentou faixa mais extensa de degradação, quando comparada àquelas correspondentes aos seus componentes, e inferiu que esse fato corresponde à sobreposição das faixas de maior reação de seus componentes hemicelulósicos e celulósicos.

2.4 Carbonização da madeira

O processo de carbonização ou pirólise lenta da madeira consiste no seu aquecimento, a temperaturas acima de 200⁰C, na presença controlada de oxigênio, promovendo modificações dos seus componentes, cujo objetivo é aumentar o teor de carbono na massa resultante do processo, o carvão vegetal. A ocorrência desse processo está intimamente relacionada à composição química dos três principais componentes da madeira: a celulose, as hemiceluloses e a lignina, além de sofrer influência das suas características físicas e anatômicas.

Byrne & Nagle (1997) consideram que a pirólise da madeira dá origem aos mesmos produtos que seriam obtidos pela soma de seus três principais componentes pirolisados separadamente. Relatam, ainda, que a pirólise não ocorre de forma simultânea, mas em etapas, nas quais as hemiceluloses se degradam primeiro, sob temperaturas que variam entre 200° e 260°C, seguidas da celulose (240°-350°C) e da lignina (280°-500°C).

Andrade et al. (2004) sugerem que a resistência térmica dos constituintes químicos da madeira está intimamente relacionada às suas respectivas estruturas. Segundo os autores, quanto mais complexa, mais rígida e mais condensada for a estrutura, mais estável, do ponto de vista térmico, será o correspondente componente químico.

Durante a carbonização ocorre uma sequência de reações químicas e físicas dependentes do tempo e da temperatura e, como resultado, há o desprendimento de vapor d'água, líquidos orgânicos, gases condensáveis e não condensáveis, restando como produto o carvão vegetal. São comuns relatos que

inferem a influência da composição química da madeira, em especial do teor de lignina, no rendimento em carvão vegetal, pois, segundo os autores, materiais orgânicos com maiores teores de compostos aromáticos conferem maiores rendimentos em carvão, afetando diretamente a cinética das reações de pirólise.

Trugilho et al. (2001) referem-se às etapas ocorrentes durante a carbonização conforme faixa de temperatura e fenômenos de reação. Segundo os autores, na primeira etapa, com faixa de temperatura entre 100° e 200°C ocorre a secagem da madeira e a reação é, nesse momento, endotérmica. Na etapa com faixa de temperatura entre 200° e 280°C ocorre a liberação de ácido acético, metanol, H₂O e CO₂, entre outros e a reação continua caracterizada como endotérmica. Entre 280° e 500°C, a reação passa a ser exotérmica e ocorre liberação de gases, como CO, CH₄ e alcatrões e, sob temperaturas acima de 500° C, ocorre a liberação de pequenas quantidades de voláteis, especialmente o H₂.

Para Syred et al. (2006), quando a madeira é submetida a temperaturas entre 20° e 100°C, há a liberação de vapor de água e absorção de energia e a temperatura se mantém em 100°C, até que toda umidade seja eliminada. Entre 110° e 270°C, ocorre o início da carbonização, liberando ácido acético, metanol, CO₂ e CO. Na faixa de 270° a 290°C, iniciam-se as reações endotérmicas e, acima de 270°C, ocorrem as reações exotérmicas espontâneas.

A reação de carbonização da madeira consiste, basicamente, em concentrar carbono e expulsar oxigênio, com consequente aumento do conteúdo energético do produto. Na madeira, os teores de carbono e oxigênio são, em média, respectivamente, de 49% e 44%. Depois de carbonizada, esses teores passam, em média, no carvão vegetal, para 82% e 13,7%. O carvão retém 57% do carbono da madeira, enquanto 89% do oxigênio são volatilizados.

Alguns fatores afetam a carbonização no que se refere ao rendimento e à qualidade do carvão produzido, que reflete, especialmente, no caso da qualidade do carvão, no teor de carbono fixo presente no mesmo. Dentre esses fatores

destacam-se a temperatura final de carbonização, a taxa de aquecimento, a pressão e o tamanho da peça de madeira a ser carbonizada. De modo geral, quanto maior a temperatura final de carbonização, maior o teor de carbono fixo e menor o rendimento gravimétrico em carvão e o teor de materiais voláteis.

Além do sistema utilizado no processo, a qualidade da madeira exerce especial influência sobre os referidos parâmetros. Dessa forma, características como densidade da madeira, resistência à degradação térmica, composição química e anatômica devem ser investigadas na eficiência e nos parâmetros cinéticos da decomposição da madeira para que se possam inferir correlações entre esses e a qualidade do carvão produzido, como também entre aqueles e o rendimento gravimétrico.

A madeira para energia, seja ela para a produção de carvão vegetal ou para queima direta, deve apresentar certas propriedades que atendam a algumas características relacionadas ao seu uso final. A madeira de eucalipto, por possuir elevada versatilidade e elevada produtividade, pode ser uma matéria-prima utilizada com esse foco de pesquisa, pois atende, na maioria dos casos, à necessidade energética do país. E, aliado a esse fato, os estudos que objetivam indicar material genético para fins energéticos a partir de correlações entre a qualidade da madeira e a qualidade do produto ainda são incipientes, especialmente aqueles relacionados à qualidade da madeira, com base nas características físicas, químicas, anatômicas e térmicas, desejáveis à conversão energética, o que resultaria em respostas mais efetivas.

Segundo Valente (1986), a heterogeneidade da madeira dificulta extremamente a determinação exata da correlação entre as propriedades da madeira e o rendimento na carbonização.

No entanto, Gonçalves (1999) estudou as características da madeira de *Mimosa caesalpiniaefolia* para a produção de carvão vegetal e concluiu que a madeira é indicada para essa finalidade em função das boas características

físico-químicas apresentadas pelo carvão, destacando-se o elevado rendimento gravimétrico (32,04%), o teor de cinza (1,71%) e o rendimento em carbono fixo (25,40%).

Pereira et al. (2000), citados por Couto et al. (2003), ao estudarem as características da madeira e do carvão de algumas espécies de eucalipto, com dez anos e meio, ressaltaram que as mesmas podem ser indicadas para a produção de carvão vegetal. Os resultados observados pelos autores são apresentados na Tabela 2.

TABELA 2 Características tecnológicas da madeira e do carvão de algumas espécies de eucalipto.

Propriedade	Espécie				
	<i>E. camaldulensis</i>	<i>E. citriodora</i>	<i>E. grandis</i>	<i>E. saligna</i>	<i>E. urophylla</i>
DB	0,687	0,73	0,479	0,548	0,564
LIG	30,6	22,4	23,9	26,3	27,3
RGCV	34,7	32,6	33,7	33,7	34,1
CF	15,4	17,3	18,7	14,7	16,3
MV	84,1	81,1	80,7	84,8	82,8
CZ	0,5	1,6	0,6	0,5	0,9
PCS	5.085	4.718	4.340	4.633	4.312
PCS	7.977	8.088	6.626	6.972	7.439

DB: densidade básica da madeira (g/cm^3); LIG: teor de lignina da madeira (%); RGCV: rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); CF: teor de carbono fixo da madeira (%); MV: teor de materiais voláteis na madeira (%); CZ: teor de cinzas da madeira (%); PCS madeira: poder calorífico superior da madeira (Kcal/kg); PCS carvão: poder calorífico superior do carvão (kcal/kg).

Fonte: Adaptado de Pereira et al. (2000), citados por Couto et al. (2003).

Frederico (2009), ao estudar o efeito de diferentes regiões nas propriedades da madeira e do carvão a partir de cinco clones de eucalipto aos três anos de idade, encontrou valores variando entre 28,36% e 31,60%, 42,25% e 47,45% e 22,89% e 27,97%, respectivamente, para os rendimentos em carvão vegetal, gases condensáveis e gases não condensáveis.

Arantes (2009), ao determinar a variação dos rendimentos gravimétricos da carbonização da madeira de um clone híbrido de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis* aos seis anos de idade, utilizando temperatura máxima de carbonização de 450°C e taxa de aquecimento 1,67°C, durante 4 horas, encontrou valores variando entre 33,68% e 35,07%, 46,69% e 48,32% e 17,33% e 18,24%, respectivamente, para os rendimentos em carvão vegetal, gases condensáveis e gases não condensáveis. Segundo Brito & Barrichelo (1982), o rendimento em carvão vegetal apresenta-se nos limites entre 25% e 35%, com base na madeira seca.

Brito & Barrichelo (1977) afirmam que os estudos indicam a influência do teor de extrativos na madeira sobre o rendimento gravimétrico em carvão. Di Blasi et al. (1999) relataram maiores rendimentos em madeiras ricas em extrativos, em comparação com espécies com pouco extrativo, ao estudarem espécies nativas da região norte. Frederico (2009) encontrou maiores valores para rendimentos em carvão vegetal a partir da carbonização de clones de eucalipto com os maiores teores de extrativos totais.

2.5 Parâmetros para avaliação da qualidade do carvão vegetal

O carvão vegetal é definido por Carvão (1998) como um material sólido, poroso, de fácil combustão e capaz de gerar significativas quantidades de calor (6.800Kcal/kg). Pode ser produzido artificialmente, pela pirólise da madeira ou originar-se de um processo natural, pelo qual substâncias orgânicas são submetidas à ação da temperatura terrestre durante milhões de anos.

O estudo das suas propriedades proporciona o direcionamento na escolha da madeira com propriedades desejadas para conversão energética. O carvão é composto por três frações distintas: carbono fixo, materiais voláteis e cinzas. Dessa forma, suas propriedades químicas podem ser investigadas

mediante a realização da análise química imediata que responderá pelas frações citadas anteriormente, bem como pelo teor de umidade presente no mesmo.

A umidade de equilíbrio higroscópico do carvão vai depender, basicamente, da temperatura em que foi obtido e da umidade do ambiente ao qual está exposto; os materiais voláteis consistem na matéria volátil residual do carvão, que é composta, principalmente, de hidrogênio, hidrocarbonetos, CO e CO₂. O teor de cinzas refere-se ao resíduo de óxidos minerais obtido pela combustão completa do carvão e o teor de carbono fixo consiste no carbono responsável pela formação da massa amorfa. De acordo com Sèye (1998), o carbono fixo é um dos mais importantes indicadores de qualidade do carvão vegetal como termorreduzidor na siderurgia.

No que se refere ao processo, a temperatura é importante parâmetro, responsável por regular a composição química do produto, em termos de carbono fixo e, também, de rendimento gravimétrico, durante a carbonização da madeira. Quanto maior o teor de carbono fixo alcançado pelo aumento da temperatura, menor será o rendimento gravimétrico da conversão da madeira em carvão. Quanto aos parâmetros referentes à madeira, a massa específica, ou densidade básica, é o parâmetro que permite atuar na densidade do carvão vegetal. Quanto maior a densidade da madeira, maior será a do carvão produzido (CETEC, 1979).

É bastante variável o percentual de rendimento em carvão, após a carbonização. Em média, o rendimento em carvão é de 30%, contendo 75% de carbono fixo, como mencionado anteriormente.

Outras propriedades também são investigadas no carvão, visando determinar sua qualidade. De acordo com Oliveira et al. (1982), as propriedades do carvão usualmente investigadas e utilizadas como parâmetros de qualidade são densidade, porosidade, poder calorífico superior, resistência mecânica, reatividade, rendimento gravimétrico e rendimento em líquido pirolenhoso.

Trugilho et al. (2001), ao estudarem clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal, mencionam, como características químicas desejáveis no carvão produzido, o baixo teor de materiais voláteis e de cinzas e os maiores teores de carbono fixo. Os mesmos autores observaram, a partir da madeira de *Eucalyptus grandis* aos sete anos de idade, teores de materiais voláteis variando entre 18,0% e 21,9%. Frederico (2009), ao avaliar as propriedades qualitativas do carvão de cinco clones de eucalipto aos três anos de idade, encontrou valores para essa variável entre 15,01% e 19,15%.

Arantes (2009) encontrou porcentagens de materiais voláteis, em madeira de eucalipto aos seis anos de idade, variando entre 26,72% e 27,30%.

Santos (2008) relata que o teor de materiais voláteis no carvão situa-se entre 20% e 25% e que porcentagens inferiores a 25% são desejadas para o uso siderúrgico, visto que esse é um parâmetro que apresenta comportamento inversamente proporcional ao teor de carbono fixo no carvão, comprometendo, dessa forma, a eficiência do redutor durante as operações. No entanto, essa característica determina a estabilidade da chama e a velocidade de combustão, pois promove o aumento da permeabilidade da carga no alto-forno e a diminuição da reatividade do carvão vegetal. Sendo assim, faz-se necessária uma fração significativa de materiais voláteis no carvão para uso siderúrgico. Frederico (2009) afirma que um alto teor de voláteis ocasiona a produção de muita fumaça, além da menor eficiência energética, o que não seria desejável para o carvão para uso doméstico.

Frederico (2009) obteve teores de cinzas variando entre 0,59% e 1,26%. De acordo com Santos (2008), para uso siderúrgico, teores ideais de cinzas presentes no carvão devem ser inferiores a 1% e o teor de cinzas no carvão vegetal varia entre 0,5% e 4%. A alta presença de cinzas no carvão vegetal pode indicar possível contaminação do carvão com resíduos do solo, não sendo desejável, pois, além de reduzir o poder calorífico do produto, causa desgaste no

alto-forno e pode comprometer a qualidade do ferro-gusa, com consequentes formações de trincas e fissuras.

Ao analisar o teor de carbono fixo no carvão da madeira de eucalipto, Trugilho et al. (2001) encontraram valores variando entre 78,2% e 81,5%. Frederico (2009) encontrou, no carvão dos clones de eucalipto, valores para o teor de carbono fixo entre 80,13% e 83,74%. Arantes (2009) observou, para a mesma variável, valores compreendidos entre 72,54% e 73,07%. Ressalta-se que fatores como temperatura final de carbonização e composição química da madeira interferem nesses percentuais.

No entanto, as maiores variações observadas para o teor de carbono fixo no carvão são atribuídas, de modo geral e segundo a literatura, às variáveis do processo de carbonização. Botrel (2006) afirma que os teores de carbono fixo no carvão são sensivelmente influenciados pela temperatura final e taxa de aquecimento do sistema. A taxa de aquecimento utilizada nesse trabalho difere daqueles e também o tempo de carbonização que foi mais longo quando comparado aos trabalhos citados anteriormente.

Segundo Santos (2008), a faixa desejada de carbono fixo no carvão para uso siderúrgico está compreendida entre 75% e 80%, no entanto, maiores teores de carbono fixo contribuem para o aumento na produtividade dos alto-fornos para o mesmo consumo redutor. Rocha & Klitzke (1998) ratificam que o efeito da quantidade de carbono fixo num determinado carvão vegetal é refletido na utilização do forno por volume e ressaltam que quanto maior for a quantidade de carbono fixo, menor será o volume ocupado no forno pelo carvão, restando mais espaço para o minério a ser reduzido.

De acordo com Santos (2008), o teor de carbono fixo no carvão varia entre 72% e 75% e o poder calorífico está próximo de 7.500 kcal/kg. Frederico (2009) observou valores entre 8.129 e 8.389 kcal/kg para o poder calorífico e

entre 80,13% e 83,74% para o teor de carbono fixo no carvão de clones de eucalipto.

2.6 Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão

Para atender à produção de carvão vegetal com controle da alta variabilidade inerente, dentre diversos fatores destaca-se a influência do material genético de origem, tornando-se necessário o estudo dos níveis de correlações entre a qualidade da madeira e do carvão produzido.

Alguns trabalhos foram realizados com esse objetivo e, dentre eles, os de Almeida (1983), Oliveira (1988) e Trugilho (1995). No entanto, ainda é preciso o aprofundamento do estudo no que se refere à indicação do material genético para uso energético, com base nas características da madeira.

Dos trabalhos existentes que mostram correlações positivas entre as composições químicas da madeira e do carvão, particularmente entre teor de lignina e teor de carbono fixo, podem ser citados os de Brito & Barrichelo (1977) e Collet (1985). Trugilho et al. (2001) concluíram, a partir da avaliação de clones de *Eucalyptus*, que a massa de lignina observada pode ser utilizada como variável de classificação dos clones para a produção de carvão, com base no nível de correlação entre essa característica e a produção de carvão vegetal.

Vale et al. (2001) observaram relação direta e positiva entre densidade básica da madeira e densidade relativa aparente do carvão. Os autores ressaltam que a densidade é uma característica fundamental no carvão vegetal, pois, quanto mais denso, maior é a quantidade de energia por unidade de volume, além de caracterizar também um produto menos friável.

Ratificando a correlação entre as propriedades da madeira e a qualidade do carvão, Brito & Barrichelo (1977) inferem que a escolha do material genético a partir da madeira de *Eucalyptus*, visando à produção de carvão com propriedades desejáveis, como o alto teor de carbono fixo e menores teores de

materiais voláteis e cinzas, deve ser feita baseando-se na escolha da madeira que apresente determinadas características, como elevado teor de lignina e alta densidade, o que proporciona também, segundo os autores, maior rendimento gravimétrico em carvão. Os autores observaram, a partir da carbonização de diferentes espécies de *Eucalyptus*, um coeficiente de correlação de 0,78 entre o teor de carbono fixo e o teor de lignina.

Oliveira (1988), ao estudar correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão de *Eucalyptus grandis*, relatou que há correlação positiva entre o teor de lignina total, de extrativos, densidade da madeira e rendimento gravimétrico do carvão. A autora cita, ainda, correlação negativa entre dimensões das fibras, teor de holocelulose e rendimento gravimétrico do carvão. E afirma que o estudo de correlações entre a anatomia (espessura da parede) e a densidade da madeira proporciona a escolha de espécies indicadas para produção de carvão vegetal, baseando-se na escolha de madeiras com elevada densidade e que apresentem fibras com parede celular espessa.

Apesar de, muitas vezes, as dimensões das fibras, isoladamente, não apresentarem correlações significativas com a qualidade do carvão vegetal, esse parâmetro é usualmente considerado nos estudos da caracterização da madeira de diferentes materiais genéticos e compreendem quatro medidas fundamentais: comprimento, largura, espessura da parede e diâmetro do lume. No entanto, segundo a literatura, ao agrupá-la a outros parâmetros de avaliação de qualidade da madeira, as influências são mais acentuadas, podendo ser obtidas correlações significativas. Esse agrupamento sob diversas formas resulta em índices que auxiliam na interpretação da qualidade do carvão vegetal, inclusive, na identificação e seleção de madeiras. Dentre esses índices pode-se citar a fração parede.

Paula (2005), ao estudar a caracterização anatômica da madeira de sete espécies da Amazônia com vistas à produção de energia e papel, observou que

quanto maiores a fração parede e as proporções de celulose, lignina e hemiceluloses presentes na fibra, conseqüentemente, mais substâncias básicas geradoras de energia. Para o mesmo autor, madeiras ricas em fibras de fração parede altas devem ser recomendadas para a geração de energia, no entanto, ressalta que se a fração parede for alta, mas a madeira apresentar baixa porcentagem de fibras, ela não deve ser recomendada para a geração de energia.

Para Andrade (1993), existe estreita correlação entre as propriedades do carvão vegetal e as características anatômicas da madeira que lhe deu origem. Neste sentido, a constatação de características anatômicas que se correlacionem com massas específicas básicas elevadas, a exemplo da ocorrência de paredes celulares espessas e de diâmetros de lumes reduzidos, indica a possibilidade da produção de carvão vegetal denso, com menor volume de poros e, conseqüentemente, menos higroscópico. Madeiras com altos teores de vasos, com dimensões demasiadamente elevadas, apresentam, ao contrário, características indesejáveis para a produção de carvão vegetal, a exemplo da baixa massa específica.

Martins (1980) também relata correlação positiva e significativa entre o teor de carbono fixo e o teor de lignina.

Campos (2008) obteve coeficiente de correlação de 0,8 entre o teor de carbono fixo e o teor de lignina, magnitude também observada por Vital et al. (1994).

Frederico (2009), estudando o efeito da região e do material genético na qualidade e rendimento do carvão vegetal, verificou que os clones com os maiores poderes caloríficos apresentaram também maiores teores de extrativos, maiores rendimentos em carvão, tendência de menores teores de holocelulose e, conseqüentemente, maiores teores de lignina.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material utilizado

Foram utilizados quatro clones híbridos de *Eucalyptus*, sendo três de *E. urophylla* x *E. grandis* e um *E. camaldulensis* x *E. grandis*, provenientes de plantios comerciais localizados no município de Carbonita, MG, situado na bacia do rio Jequitinhonha. O local apresenta características climáticas que variam do clima semiárido a árido, com totais pluviométricos anuais compreendidos entre 600 e 1.600 mm, irregularmente distribuídos ao longo do ano. As chuvas se concentram basicamente entre os meses de outubro e março, sendo o trimestre compreendido entre dezembro e fevereiro responsável por mais de 50% da precipitação total. A temperatura média anual apresenta pouca variação, situando-se na faixa de 21° a 24°C. As temperaturas mais elevadas ocorrem no mês de fevereiro, enquanto as mais amenas são registradas, geralmente, no mês de junho.

As árvores dos clones foram coletadas nos plantios comerciais da empresa Sada Bioenergia e suas informações gerais são apresentadas na Tabela 3.

TABELA 3 Informações gerais sobre os diferentes materiais genéticos utilizados no estudo.

Clone	Material genético	Espaçamento (m)	Idade (anos)	IMA (m ³)
1	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	3 x 3	7	49,1
2	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	3 x 3	7	43,9
3	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	3 x 3	7	47,0
4	<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>	3 x 3	7	40,0

As árvores selecionadas tinham diâmetro médio de 15 cm (± 2 cm de desvio padrão). A seleção foi feita excluindo-se aquelas que, visualmente, apresentavam defeito e também as que estavam localizadas nas bordas dos plantios. Foram coletadas 6 árvores, por clone, totalizando 24 árvores.

3.2 Preparo das amostras

Foram retiradas das árvores toretes a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial do tronco. De cada torete, foi retirado um disco e dele foram obtidas duas cunhas opostas, as quais foram utilizadas para a determinação da densidade básica da madeira. O restante do disco foi utilizado, parte para a produção do carvão vegetal e outra parte para a produção de serragem e amostras para maceração, visando às análises da composição química, composição elementar, análise termogravimétrica, poder calorífico superior e análise anatômica da madeira dos diferentes materiais genéticos estudados. As análises foram realizadas sob amostragem composta.

3.2.1 Análise química da madeira

3.2.1.1 Composição química

As amostras de madeira foram transformadas em serragem utilizando-se um moinho de laboratório tipo Wiley, de acordo com a norma 257 om-52. Foi utilizada a fração que passou pela peneira n° 16 internacional, com malha de 40 mesh e ficou retida na peneira n° 24 internacional, com malha de 60 mesh, (American Society for Testing and Materials - ASTM, 1982). A determinação do teor absolutamente seco da madeira foi realizada conforme a norma TAPPI 264 0m-88 (Tappi Technical Divisions and Committees - TAPPI, 1998). Os teores de extrativos na madeira foram determinados em duplicatas, de acordo com a norma TAPPI 264 om-88, apenas alterando o etanol/benzeno, pelo etanol/tolueno, por ser aquele perigoso para a saúde humana. Os teores de

lignina insolúvel foram determinados em duplicata pelo método Klason, modificado de acordo com o procedimento proposto por Gomide & Demuner (1986), derivado da norma TAPPI T 222 om-88. A lignina solúvel foi determinada por espectrometria, conforme Goldschimid (1971), e foi considerado teor de lignina total a soma dos dois valores. O teor de holocelulose foi obtido pelo somatório dos teores de extrativos e lignina totais, decrescido de 100.

3.2.1.2. Relação siringil/guaiacil

A relação siringila/guaiacila da lignina foi realizada em duplicata por meio da cromatografia líquida após oxidação da serragem da madeira com nitrobenzeno, conforme Lin & Dence (1992).

Após aferida 200 mg a.s. de serragem livre de extrativo, essa foi colocada em reatores de aço inox, juntamente com 7 mL da solução aquosa de NaOH (2 mol/L) e 0,5 mL de nitrobenzeno. Após lacrar os reatores, a amostra foi levada ao banho de óleo (glicerina) por 2 horas e 30 minutos, a 170°C. Em seguida, o material oxidado foi submetido à extração com clorofórmio por seis vezes, utilizando-se 30 mL do solvente em cada extração. Após a primeira extração, foram adicionados 2,5 mL de HCl (4 mol/L), na fase aquosa. As fases orgânicas foram reunidas e o solvente evaporado em capela.

A amostra foi transferida para um balão volumétrico de 50 mL e o volume completado com solução de acetonitrila/água (1:1 v/v). Em seguida, a solução resultante foi filtrada em membrana de celulose regenerada de 0,45 µm e analisada por cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE). A separação dos produtos da oxidação por nitrobenzeno foi alcançada utilizando-se uma coluna LC-18. A fase móvel usada foi acetonitrila/água (1:6 v/v) com pH igual a 2,6, tamponado com ácido trifluoroacético (TFA), detecção: UV, 280 nm, T=40°C, fluxo: 1,0 mL/minuto, injeção 20µl; padrão cromatográfico: vanilina

para guaiacil e siringaldeído para siringil. A pressão utilizada foi de, aproximadamente, 160 kgf/cm².

3.2.1.3. Composição elementar

A análise elementar (carbono, nitrogênio, hidrogênio, enxofre e oxigênio) foi realizada aferindo-se uma massa equivalente a 2,5 mg ($\pm 0,5$) de serragem seca que foi selecionada em peneiras sobrepostas de 200 e 270 mesh, sendo utilizada a fração retida nessa última. O equipamento utilizado foi Vario Micro Cube CHNS-O.

A partir da combustão ocorrida no interior do aparelho, sob temperaturas que atingem até 1.200°C, ocorrem reações químicas das quais resulta a formação dos gases que serão conduzidos aos tubos redutores presentes em um compartimento específico. Daí, então, os elementos químicos são individualizados numa sequência induzida de acordo com a massa molecular de cada um deles e quantificados a partir de um software desenvolvido para essa finalidade. O oxigênio foi quantificado pelo somatório do C, N, H e S decrescido de 100.

3.2.2 Análise física da madeira

3.2.2.1 Determinação da densidade básica da madeira

De cada árvore, foram retirados discos com 2,5 cm de espessura, a 0% (base), 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial do tronco. De cada disco retiraram-se duas amostras opostas, em forma de cunha, passando pela medula, as quais foram identificadas e destinadas à determinação da densidade básica da madeira.

Os procedimentos utilizados para a análise estão de acordo com o método de imersão em água, descrito por Vital (1984). Os valores foram calculados a partir da média aritmética das densidades das respectivas cunhas.

3.2.3 Análise anatômica da madeira

As amostras foram obtidas das cunhas opostas retiradas dos cinco discos distribuídos ao longo do tronco e de cada cunha foram retiradas amostras, obtendo-se uma amostragem composta por árvore.

Para a individualização das fibras, as amostras foram colocadas em um tubo de ensaio, com solução de peróxido de hidrogênio, segundo método preconizado por Dadswell (1972). Posteriormente, lâminas temporárias foram montadas e mediram-se trinta fibras, individualmente, determinando-lhes o comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede. Para as medições do comprimento, largura da fibra e diâmetro do lume, utilizou-se um microscópio ótico, com um sistema de aquisição de imagens, por meio de uma câmera acoplada, possibilitando a visualização das fibras diretamente no monitor e a posterior captura da imagem, com o auxílio do software Axio-Vision. A espessura da parede foi obtida por meio da seguinte fórmula:

$$EP = \frac{LF - DL}{2}$$

em que

EP = espessura da parede da fibra (μm);

LF = largura da fibra (μm);

DL = diâmetro do lume da fibra (μm).

3.2.4 Análise termogravimétrica da madeira

Para análise termogravimétrica da madeira dos clones de eucalipto utilizou-se o aparelho TGA-60 da Shimadzu. As análises foram realizadas sob atmosfera de gás nitrogênio, a uma vazão constante de $30 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$, utilizando-se $\pm 6 \text{ mg}$ de serragem selecionada em peneiras sobrepostas n° 16 internacional, com malha de 40 mesh, e n° 24 internacional, com malha de 60 mesh (ASTM, 1982). A fração utilizada foi aquela retida nessa última. Os termogramas foram

obtidos a partir da temperatura ambiente, em torno de 25°C, até temperatura máxima de 500°C, com taxa de aquecimento de 10°C/minuto.

As curvas de perda de massa foram obtidas utilizando-se o programa estatístico indicado para o tipo de aparelho e as funções obtidas foram, então, interpoladas e derivadas, gerando as curvas termogravimétricas (TG) para análise do comportamento da resistência térmica da madeira sob diferentes faixas de temperatura e as derivadas para análise térmica diferencial (DTA).

A partir dos termogramas, procederam-se aos cálculos de perda de massa nos seguintes intervalos de temperatura: 25°-100°C, 100°-200°C, 200°-300°C, 300°-400°C, 400°-500°C e o somatório até a temperatura de 500°C. As curvas do DTA indicam as temperaturas nas quais ocorrem as maiores perdas de massa nos intervalos selecionados visualmente nos gráficos.

3.3 Carbonização e rendimentos gravimétricos

Para a carbonização, amostras de madeiras foram retiradas de discos ao longo da altura comercial das árvores (0%, 25%, 50%, 75% e 100%). Retiraram-se duas cunhas opostas por disco, totalizando dez cunhas por árvore, com as mesmas dimensões, obtendo-se uma amostra composta. A amostra composta foi, então, seca em estufa, a 103±2°C, por 24 horas até peso constante.

As carbonizações foram realizadas em mufla de laboratório com aquecimento elétrico, utilizando-se cerca de 250 g de madeira, as quais foram inseridas em um contêiner metálico com dimensões nominais de 30 cm de comprimento e 12 cm de diâmetro. Para a recuperação dos gases condensáveis, adaptou-se na saída dos gases um condensador tubular.

O tempo total de carbonização da madeira foi de 7 horas, com taxa de aquecimento média de 1,07°C.min⁻¹. Após as carbonizações, foram determinados, com base na massa seca da madeira, os rendimentos gravimétricos em carvão, gases condensáveis e não condensáveis, sendo esse

último obtido por diferença. A marcha de carbonização utilizada para a produção do carvão vegetal é mostrada na Tabela 4.

TABELA 4 Marcha da carbonização da madeira empregada no experimento.

Tempo (minutos)	Temperatura (°C)
60	150
60	200
60	250
60	300
60	350
60	400
60	450
Tempo total: 7 horas	

3.4 Propriedades do carvão

3.4.1 Análise química imediata

A composição química imediata do carvão vegetal foi obtida em amostras moídas e peneiradas a uma granulometria de, aproximadamente, 0,2 mm, seguindo os procedimentos preconizados nas normas ABNT NBR 6923 e ABNT NBR 8112, com algumas adaptações, para a determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, em base seca (Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 1986).

O teor de materiais voláteis foi determinado pelo aquecimento do carvão, a 950°C, em forno mufla, sem que ocorresse a oxidação do mesmo. As amostras foram colocadas em cadinhos, depois tampadas e levadas à porta da mufla, por dois minutos, para aclimatação e, posteriormente, para o seu interior por mais nove minutos, totalizando onze minutos.

O teor de cinzas foi determinado após o carvão sofrer combustão completa, sendo aquecido em forno mufla, a 650°C, durante 6 horas. A massa de cinzas em relação à massa de carvão seco é o teor de cinzas.

O teor de carbono fixo foi calculado pela soma dos teores de materiais voláteis e cinzas decrescida de 100.

3.4.1.1 Rendimento gravimétrico em carbono fixo

O rendimento gravimétrico em carbono fixo foi obtido multiplicando-se o rendimento gravimétrico em carvão vegetal pelo teor de carbono fixo.

3.4.2 Densidade relativa aparente

A densidade relativa aparente do carvão foi determinada de acordo com o método proposto por Vital (1984), utilizando-se uma balança hidrostática para a determinação do volume deslocado. Para tanto, amostras de, aproximadamente, 5 g de carvão foram pesadas para a obtenção da massa e, posteriormente, imersas em mercúrio para determinação do volume deslocado.

3.4.3 Determinação do poder calorífico superior

O poder calorífico superior do carvão, como também da madeira, foram determinados de acordo com a metodologia descrita pela norma da ABNT NBR 8633 (ABNT, 1984), utilizando-se uma bomba calorimétrica adiabática.

As amostras de carvão foram trituradas em um cadinho metálico e classificadas em peneiras de 40/60 mesh (ASTM, 1982). As frações das amostras, retidas na peneira de 60 mesh, foram secas em estufa a 103±2°C, até peso constante, para a determinação do poder calorífico superior.

3.5 Cálculos das estimativas de massa

A massa seca de madeira sem casca por hectare/ano foi obtida multiplicando-se o incremento médio anual (m^3 .ha.ano) da madeira sem casca pela densidade básica da madeira (kg/m^3), conforme equação:

$$MSM = IMA \times Dbm$$

em que MSM = massa seca de madeira (t); IMA = incremento médio anual e Dbm = densidade básica da madeira.

As massas de lignina e de carvão vegetal, expressas em tonelada, foram determinadas multiplicando-se a massa seca de madeira pelo percentual de lignina total e rendimento gravimétrico em carvão vegetal, respectivamente, conforme as seguintes equações:

$$ML (t) = Msm \times LT$$

em que ML = massa de lignina; Msm = massa seca da madeira (t) e LT = lignina total/100.

$$MCV (t) = Msm \times RCV$$

em que MCV = massa de carvão vegetal; Msm = massa seca da madeira e RRCV = rendimento gravimétrico em carvão vegetal/100.

A massa de carbono, expressa em tonelada, foi obtida multiplicando-se a massa seca de madeira pela porcentagem de carbono presente na madeira, conforme a equação abaixo:

$$MC (ton) = Msm \times \%C$$

em que MC = massa de carbono; Msm = massa seca da madeira e %C = porcentagem de carbono/100.

Para o cálculo da quantidade de energia por hectare, expressa em kW.h, multiplicou-se a massa seca da madeira (t) pelo poder calorífico superior. A partir da energia calculada para cada clone, foi calculada também a energia útil, considerando 30% de umidade, utilizando-se as fórmulas de poder calorífico inferior e poder calorífico útil descritas por Brito (1993).

$$\text{Energia (kW.h)} = \text{Msm} \times \text{PCS mad}$$

em que: energia (kW.h) = energia por hectare; Msm = massa seca da madeira e PCS mad = poder calorífico superior da madeira.

3.6 Análise estatística do experimento

O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos (clones), com seis repetições (árvore-amostra), totalizando 24 unidades amostrais.

Todos os dados foram submetidos aos testes Cochran e Bartlett (homogeneidade de variâncias) e Lilliefors (normalidade).

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando estabelecidas diferenças significativas, os tratamentos foram comparados entre si, por meio do teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Para determinar as correlações existentes entre as propriedades da madeira e a qualidade e rendimento gravimétrico do carvão vegetal foi empregado o coeficiente de correlação de Pearson, que mede o grau de associação linear entre duas variáveis quantitativas. Para as correlações significativas, foram feitas as regressões a 5%, 10% e 15% de significância.

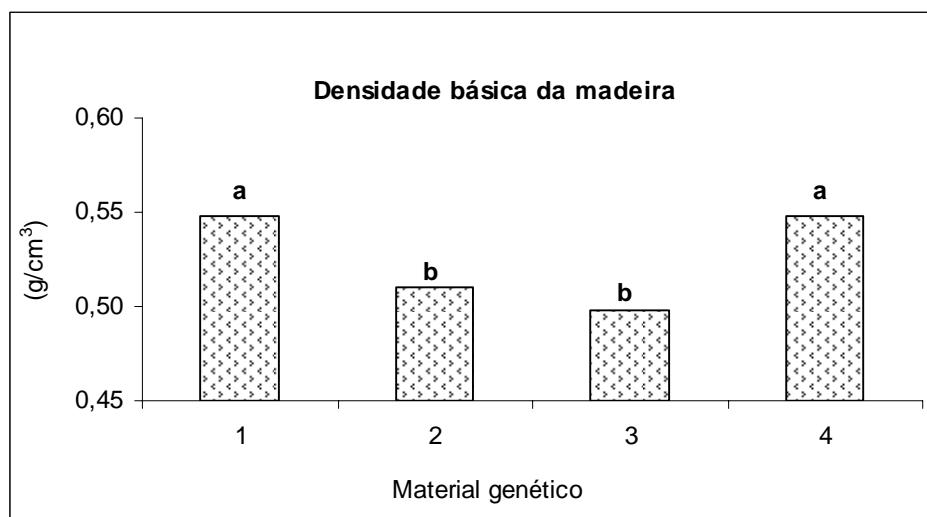
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Propriedades da madeira

4.1.1 Densidade básica

Os valores médios da densidade básica da madeira dos diferentes materiais genéticos de eucalipto são mostrados na Figura 8.

A análise de variância indicou que o efeito de clone foi significativo a 5% de probabilidade.



Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Tukey.

FIGURA 8 Densidade básica das madeiras de diferentes clones de eucalipto.

Verifica-se, pelo gráfico da Figura 8, que a densidade básica dos clones 2 e 3 foram menores em relação aos demais e não diferiram significativamente entre si. Os clones 1 e 4 obtiveram os maiores valores para essa propriedade e também não apresentaram diferença significativa entre si. Para esses materiais, foram observados valores médios superiores a $0,54 \text{ g/cm}^3$, o que é interessante para a produção de carvão vegetal, visto que, quando se degrada a madeira,

cerca de 60% de sua massa é perdida. Conseqüentemente, quanto maior a densidade da madeira, maior a massa de carvão vegetal produzido para um determinado volume. Além disso, proporciona, de modo geral, carvão com maior resistência mecânica.

Essa característica confere ao carvão maior capacidade calorífica por volume, otimizando, por exemplo, a câmara de combustão de fornalhas para secagem de grãos. Na siderurgia, também haverá vantagem no uso de madeira mais densa, pois o volume requerido pelo termorreduzidor será menor (Valente, 1986).

Silva (2001) cita faixas de valores de densidade básica para a madeira de eucalipto e ressalta variação entre 0,4 e 1,2 g/cm³, sendo indicada como faixa ideal para a produção de carvão aquelas que apresentam densidades mais elevadas.

Trugilho et al. (2001), ao estudarem o potencial energético de clones de eucalipto aos sete anos de idade, referem-se à densidade básica da madeira como a propriedade que mais influencia a qualidade do carvão vegetal. Os autores concluíram que os clones que apresentaram densidade variando de 0,52 a 0,59 g/cm³ foram potenciais para a produção de carvão. Os valores observados no presente trabalho variam entre 0,50 e 0,55 g/cm³.

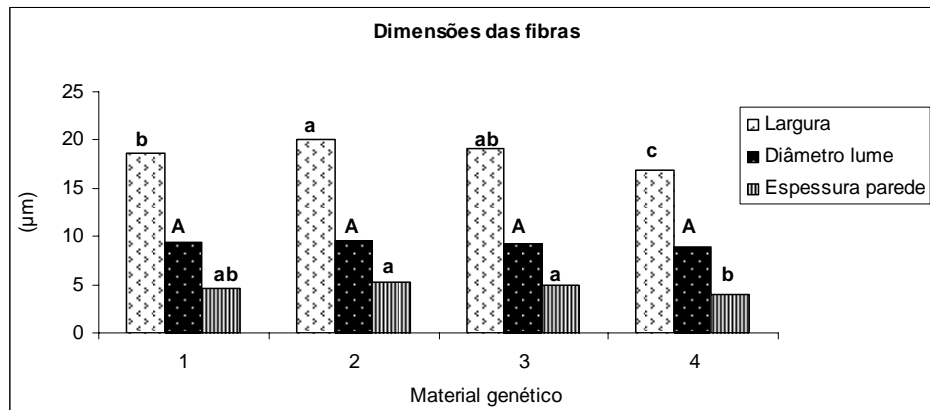
Alta densidade básica da madeira é desejável, também, no planejamento dos custos de produção de carvão, visto que madeiras com baixa densidade elevam o custo de transporte e acarretam menor rendimento por fornada, comprometendo, dessa forma a massa total de carvão produzida por forno. Situação oposta é observada para o carvão oriundo de madeira que tem alta densidade, pois o mesmo tende a apresentar uma densidade também elevada, o que acarreta redução nos custos do frete em função do volume transportado, além de aumento de produtividade dos altos fornos.

Brito (1993) ratifica essa relação ao mencionar que a capacidade de produção de carvão é afetada pela densidade da madeira, o que pode ser observado na produção em massa, ocasionada pela ocupação no forno por madeiras mais densas, para um determinado volume.

4.1.2 Dimensões das fibras

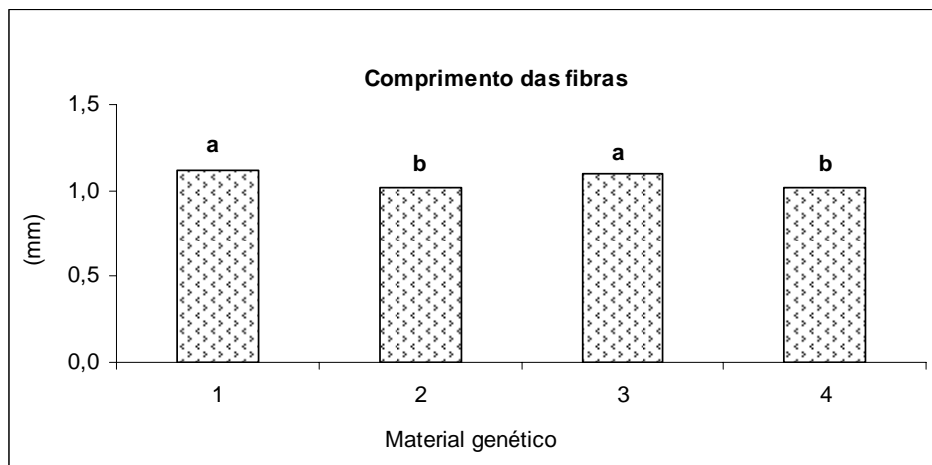
Os valores médios das dimensões das fibras das madeiras dos diferentes materiais genéticos de eucalipto são mostrados nas Figuras 9 e 10.

A análise de variância indicou que o efeito de clone foi significativo a 5% de significância.



Médias seguidas da mesma letra e fonte não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Tukey.

FIGURA 9 Dimensões das fibras em função do material genético.



Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Tukey.

FIGURA 10 Comprimento das fibras em função do material genético.

Observaram-se maiores valores médios para a largura das fibras nas madeiras dos clones 2 e 3, que não diferiram estatisticamente entre si, porém, apresentam diferenças significativas dos clones 1 e 4. Por sua vez, esses clones apresentam diferença estatística entre si, tendo o clone 4 sido o que apresentou a menor largura de fibra.

Os valores observados para a largura das fibras estão em conformidade com os encontrados por Ruy et al. (2001). Os autores relatam, citando várias literaturas, que a largura média das fibras na madeira de eucalipto apresenta valores compreendidos entre 15,6 e 20,1 μ m.

Os valores encontrados para o diâmetro do lume das fibras nas madeiras dos quatro clones avaliados não apresentaram diferença significativa entre si.

Os maiores valores significativos para a espessura da parede das fibras foram observados na madeira dos clones 2 e 3, que não diferiram estatisticamente entre si, no entanto, apresentam diferença significativa dos

valores encontrados para o clone quatro, o qual apresenta os menores valores para essa variável.

Maiores valores médios significativos foram observados para o comprimento das fibras nas madeiras dos clones 1 e 3. Esses valores não apresentam diferença estatística entre si, no entanto, diferem daqueles observados nos clones 2 e 4, que apresentam os menores valores para essa propriedade e que também não diferem estatisticamente entre si.

A espessura de parede das fibras influencia diretamente na densidade e no grau de alteração volumétrica e indiretamente nas propriedades energéticas da madeira, visto que, se as fibras tiverem a parede celular espessa haverá, dessa forma, volume satisfatório de biomassa para sustentar uma combustão duradoura. No entanto, não foi observada nenhuma correlação significativa entre a espessura da parede das fibras e a densidade da madeira.

Evangelista (2007) afirma que parede espessa, ou seja, a partir de 60% de ocupação de todo volume da fibra, é de boa qualidade para geração de energia oriunda da madeira, como etanol, carvão e lenha.

De modo geral, os valores observados neste trabalho para comprimento das fibras variaram entre 1,02 e 1,12 mm, para largura entre 16,82 e 20,02 μm , diâmetro do lume entre 8,93 e 9,38 μm e espessura da parede entre 3,94 e 5,25 μm . Os valores médios encontrados para o comprimento das fibras estão dentro da faixa de variação citada por Burger & Richter (1991), ao relatarem que as fibras presentes na madeira de folhosas têm comprimento variando entre 0,75 e 1,30 mm.

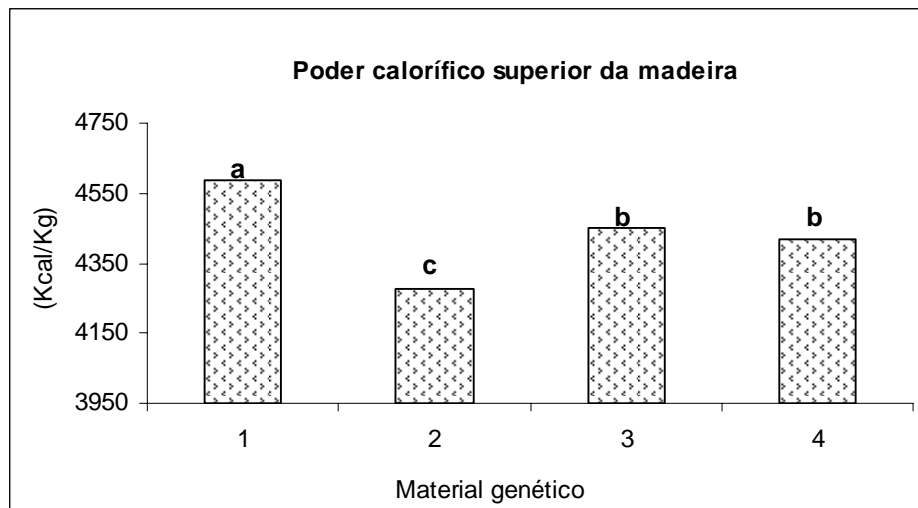
Evangelista (2007), ao estudar o efeito de três clones de eucalipto aos seis, oito e dez anos de idade, nas propriedades anatômicas da madeira, encontrou valores variando entre 0,92 e 0,97 mm para o comprimento das fibras, largura com valores entre 19,3 e 21,3 μm , diâmetro do lume medindo de 8,8 a 12,7 μm e espessura da parede das fibras entre 4,3 e 5,3 μm .

Nos estudos de mensuração de fibras em árvores da mesma espécie, o comprimento e a largura das fibras tendem a apresentar menor variação, ou seja, menor coeficiente de variação do que o diâmetro do lume e espessura da parede das fibras, como foi observado neste trabalho, no qual se observaram coeficientes de variação (%) para comprimento e largura das fibras iguais a 4,52 e 4,32, respectivamente, contra 12,04 para o diâmetro do lume e 10,01 para a espessura da parede. Tal fato também foi observado por Oliveira (1997), estudando a madeira de sete espécies de eucalipto e por Evangelista (2007), ao estudar as características de três clones de eucalipto.

4.1.3 Poder calorífico superior da madeira

Os valores médios do poder calorífico superior da madeira dos diferentes materiais genéticos de eucalipto são mostrados na Figura 11.

A análise de variância indicou que o poder calorífico superior da madeira dos diferentes materiais genéticos apresentaram diferenças significativas entre os clones.



Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Tukey.

FIGURA 11 Poder calorífico superior da madeira dos diferentes clones de eucalipto.

Observa-se maior valor médio significativo para o poder calorífico da madeira do clone 1, que diferiu estatisticamente dos demais. Menores valores foram observados no clone 2, seguido dos clones 3 e 4, que não apresentaram diferenças estatísticas entre si.

Week et al. (1977), citados por Brito & Barrichelo (1982), citam que madeira mais densa propicia maior energia por volume. Uceda (1984) também observou essa relação ao determinar o poder calorífico de espécies florestais. O autor relata que, para uma mesma porcentagem de umidade, um dado volume de madeira densa tem um poder calorífico mais elevado que uma madeira menos densa.

A quantidade de calor desprendida da madeira é muito importante para conhecer a capacidade energética de uma determinada espécie. Essa característica também é citada na literatura como influenciada por outros fatores,

como a composição química, especialmente, pelos teores de extrativos, cinzas, lignina.

Silva et al. (1983) estudaram a madeira de diferentes espécies de eucalipto visando à produção de energia e observaram poder calorífico médio de 4.691 kcal/kg. Os valores médios observados no presente trabalho variaram de 4.274 a 4.585 kcal/kg. Esse resultado se aproxima dos valores citados por Howard (1973), ao relatar que o poder calorífico superior das folhosas varia na faixa de 4.600 a 4.800 kcal/kg. Já para Brito (1993), valor para folhosas tropicais está entre 3.500 a 5.000 kcal/kg. Vale et al. (2000) encontraram valor médio para o poder calorífico superior da madeira de *Eucalyptus grandis* igual a 4.641 kcal/kg.

4.1.4 Propriedades químicas da madeira

4.1.4.1 Composição elementar

Os valores médios da composição elementar da madeira dos diferentes clones de eucalipto são mostrados na Tabela 5.

A análise de variância indicou que o efeito de clone foi significativo para os teores de carbono, nitrogênio e oxigênio.

TABELA 5 Composição elementar da madeira dos diferentes materiais genéticos de clones de eucalipto.

Material genético	Composição elementar da madeira (%)				
	C	N	H	S	O
1	48,8 a	0,20 a	6,68 a	0,12 a	44,21 b
2	48,04 ab	0,17 ab	6,44 a	0,09 a	45,27 ab
3	47,53 b	0,15 b	6,32 a	0,08 a	45,93 a
4	47,23 b	0,16 ab	6,51 a	0,08 a	46,02 a

Médias seguidas da mesma letra minúscula, na coluna, não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Tukey.

Observa-se que as porcentagens de carbono (C) presentes nos clones 1 e 2 foram estatisticamente superiores. De modo geral, o percentual de carbono elementar tem relação positiva com o rendimento em carvão, devido à degradação térmica do mesmo. Isso pode ser observado para o clone 1, que apresentou maior valor médio de carbono na madeira e, conseqüentemente, maior rendimento em carvão vegetal. Os menores valores foram observados nas madeiras dos clones 3 e 4, que não apresentaram diferenças significativas entre si.

O clone 1 também apresentou os maiores valores médios de nitrogênio. Os menores valores médios observados para nitrogênio foram, no entanto, encontrados na madeira do clone 3, porém, não diferiram estatisticamente dos clones 2 e 4.

Os maiores teores de oxigênio (O) foram obtidos nas madeiras dos clones 2, 3 e 4, e esses não apresentaram diferenças entre si. O menor valor para a porcentagem desse elemento foi observado na madeira do clone 1, o qual não diferiu do clone 2.

As porcentagens de hidrogênio (H) e enxofre (S) não apresentaram diferenças significativas entre os materiais genéticos avaliados.

De modo geral, os resultados significativos da análise elementar da madeira dos diferentes clones de eucalipto mostraram que: o clone 1 apresentou maiores valores para os teores de C (48,8%) e N (0,20%) e menores valores para a porcentagem de O (44,21%); os clones 3 e 4 apresentam maiores teores de O (45,93% e 46,02%, respectivamente) e menores teores de C (47,53% e 47,23%, respectivamente) e o clone 3 apresenta, ainda, destaque para os menores valores médios de N (0,15).

Arantes (2009), ao determinar a variabilidade existente nas características da madeira um híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, aos seis anos de idade, encontrou valores para teores de C (carbono)

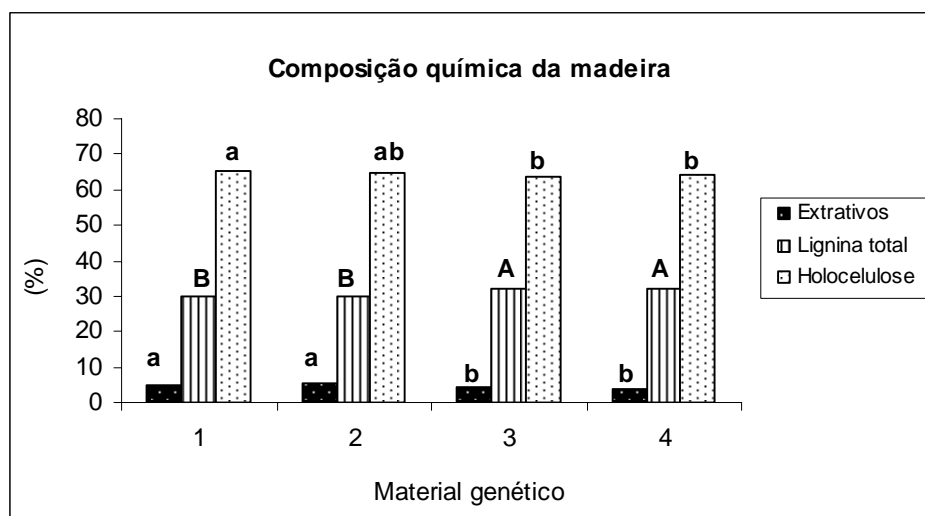
variando entre 49,51% e 49,84%; N (nitrogênio) entre 0,13% e 0,23%; O (oxigênio) entre 43,65% e 43,89% e H (hidrogênio) entre 6,32% e 6,37%. Ao comparar os valores observados pela autora com os encontrados no presente trabalho, observa-se que os mesmos são superiores para o teor de carbono e inferiores para os teores de N e O. De modo geral, observa-se, em diferentes trabalhos de composição elementar, citados por vários pesquisadores, que a mesma não tem muita variabilidade entre espécies e também entre gêneros.

Espera-se, para as madeiras que têm maiores teores de carbono e hidrogênio, maior capacidade térmica em função da maior energia liberada por esses na reação de combustão. Essa tendência pode ser observada na madeira do clone 1, que tem maiores valores médios de carbono e hidrogênio e, conseqüentemente, apresentou maior poder calorífico superior (Figura 11).

4.1.4.2 Composição química (extrativos, lignina total e holocelulose)

Os valores médios da composição química das madeiras dos diferentes materiais genéticos de eucalipto são mostrados na Figura 12.

A análise de variância indicou que o efeito de clone foi significativo para as características químicas avaliadas.



Médias seguidas da mesma letra e fonte não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Tukey.

FIGURA 12 Composição química da madeira dos diferentes clones de eucalipto.

Pela Figura 12 pode-se observar que os clones 1 e 2 apresentaram maiores teores de extrativos totais e holocelulose e menores teores de lignina total na madeira. Maiores teores de lignina estão presentes nas madeiras dos clones 3 e 4.

Os valores médios observados para as características químicas da madeira dos clones de eucalipto foram de 5% para extrativos totais, 32% para o teor de lignina total e 65% de holocelulose. Os resultados encontrados estão de acordo com os observados por Trugilho et al. (2001), ao avaliarem a madeira de clones de eucalipto com a mesma idade. Os autores objetivaram selecionar os clones com maior potencial para a produção de carvão e consideraram como superiores aqueles que apresentaram porcentagem de extrativos entre 4% e 6% e teor de lignina entre 30% e 34%. Associado às análises químicas, os autores estudaram o fator crescimento e o consideraram como decisivo para classificação dos clones.

De modo geral, os valores médios encontrados para o teor de lignina são considerados satisfatórios, especialmente nesse caso, em que se pretende indicar um ou mais materiais genéticos com potencial para energia, pois a lignina é um componente químico que muito contribui para o rendimento gravimétrico durante o processo de carbonização em função da sua maior resistência à degradação térmica, resultado da complexidade e dos tipos de ligações presentes na sua estrutura química. Esse percentual encontrado no presente trabalho é, particularmente, considerado alto para madeira de folhosas. Gomide et al. (2005) referem que teores de lignina acima de 30% são mais comuns em madeira de coníferas. Frederico (2009), ao avaliar a correlação entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de cinco clones de eucalipto aos três anos de idade, encontrou valores para teor de lignina variando entre 28,9% e 31,1%.

Outra vantagem de se utilizar madeira com maiores porcentagens de lignina para carbonização é a possibilidade de se obter carvão com maiores teores de carbono fixo em virtude de a lignina possuir porcentagens consideráveis de carbono elementar em sua composição. Para Klock et al. (2005), o teor de carbono na lignina da madeira de folhosa é de 60%.

Os clones 1 e 2 apresentaram valores médios para extrativos totais de 4,80% e 5,36%, respectivamente. Trugilho et al. (2001), analisando a madeira de *Eucalyptus grandis* com sete anos de idade, encontraram porcentagens de extrativos variando entre 4,8% e 7,6%. Frederico (2009) encontrou valores para extrativos presentes em clones de eucalipto, extraíveis em cetona, variando entre 0,47% e 1,12%.

Dependendo da resistência à degradação térmica dos extrativos presentes na madeira, maior porcentagem de extrativos poderá colaborar para o aumento no poder calorífico do carvão, além de elevar o rendimento em carbono fixo, em função da natureza química dessas substâncias possuírem, de modo geral, compostos de elevado teor de carbono.

De modo geral, o teor de holocelulose observado nos diferentes materiais genéticos variou entre 63,88% e 65,25%. Como eram esperados, os maiores valores médios para a porcentagem de holocelulose foram observados nos clones 1 e 2, exatamente aqueles que apresentaram menores valores para o teor de lignina, visto que se trata de uma relação inversa.

Frederico (2009) encontrou valores médios para o teor de holocelulose presente na madeira de cinco clones de eucalipto, aos três anos de idade, variando entre 68,18% e 70,53%.

A porcentagem de holocelulose corresponde a uma parte da fração mais significativa da massa da madeira e é representada pelos componentes estruturais que são os carboidratos. O comportamento da celulose e das hemiceluloses, diante da degradação térmica, apresenta um perfil bastante instável e pouco resistente, especialmente as hemiceluloses, por ser um composto que apresenta natureza amorfa e ramificada, colaborando para maior degradação.

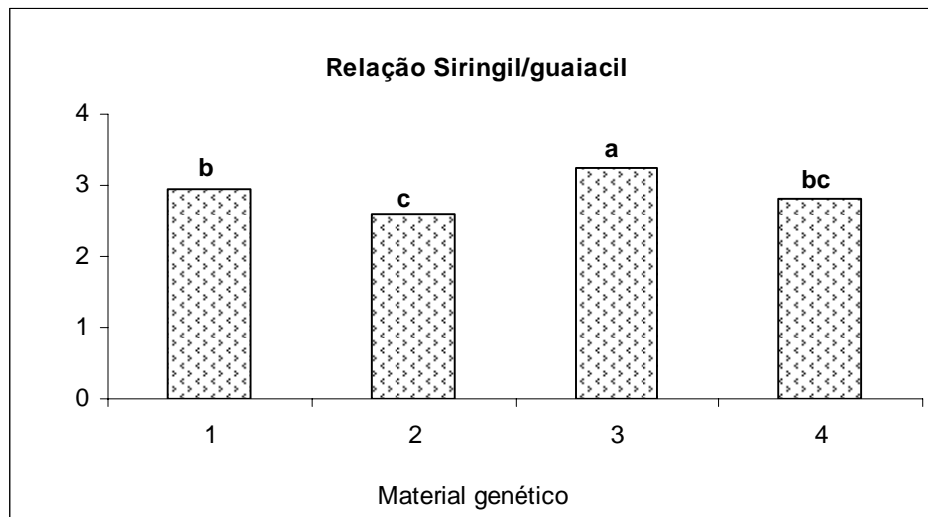
Com isso não são desejáveis altas porcentagens desses compostos quando se pretende utilizar a madeira para a produção de carvão, visto que a degradação desses componentes resulta em maiores porcentagens de gases não condensáveis e gases condensáveis resultantes das reações que ocorrem entre o carbono, o hidrogênio e oxigênio presentes em sua estrutura durante a carbonização. Essas reações proporcionam a volatilização do carbono e, conseqüentemente, a formação de frações gasosas e líquidas em detrimento da formação do resíduo sólido, o carvão vegetal.

Foram observadas, neste estudo, porcentagens menores de holocelulose em relação a outros materiais genéticos de eucalipto que, normalmente, são utilizados para produção de carvão vegetal. Isso colabora para um maior rendimento gravimétrico em carvão, visto que os componentes químicos que compõem a holocelulose são de baixa resistência térmica.

4.1.4.3 Relação siringil/guaiacil

Os valores médios da relação siringil/guaiacil da madeira dos diferentes materiais genéticos de eucalipto são mostrados na Figura 13.

A análise de variância indicou que essa relação apresenta diferenças significativas entre si nos diferentes clones.



Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Tukey.

FIGURA 13 Relação siringil/guaiacil da madeira nos diferentes clones de eucalipto.

Os resultados encontrados para a relação siringil/guaiacil indicam que a madeira do clone 3 diferiu estatisticamente dos demais materiais genéticos e se destacou por apresentar maiores valores (3,25). Os menores valores médios significativos foram observados para a madeira do clone 2, que não diferiu estatisticamente do clone 4 e esse, por sua vez, não apresentou diferença estatística do clone 1.

Vale ressaltar que a lignina é um componente desejável na conversão da madeira em carvão e seu teor e tipo são parâmetros importantes, do ponto de

vista industrial. Isso porque, de modo geral, espera-se que quanto maior a proporção de lignina total e menor a relação siringil/guaiacil, maior será a conversão em carvão vegetal em função da maior resistência à degradação térmica, promovida pela presença de estruturas mais condensadas.

Oudia et al. (2007) referem-se a essa relação destacando que as madeiras de angiospermas apresentam elevadas quantidades da estrutura siringila, que é a mais reativa. Ressalta-se que essa consideração feita pelos autores refere-se à deslignificação da madeira para uso na indústria de celulose, ou seja, significa que a estrutura siringila é menos condensada e, assim, considerada mais reativa. Para Marcelo (2007), apesar das vantagens apresentadas pelos grupos siringila em termos da sua maior reatividade em processos de deslignificação, na indústria de celulose, sabe-se que existe uma grande diversidade estrutural de ligninas em árvores do mesmo gênero, da mesma espécie ou, até mesmo, em diferentes regiões morfológicas do vegetal. Assim, considerando a elevada variedade de espécies existentes, torna-se indispensável investigar a composição estrutural da lignina presente nas madeiras de eucalipto destinadas à produção de carvão, visto que há poucos estudos realizados com esse foco, inclusive sobre a diversidade de fatores que podem influenciar a relação S/G.

De acordo com Wallis et al. (1996) e Carvalho (2002), a relação lignina siringila/guaiacila varia de 0,51 até 5,2, dependendo da espécie de madeira. A relação S/G das ligninas obtidas neste estudo variou de 2,6 a 3,25. Esses valores estão próximos aos observados por Gomes (2007), ao estudar a caracterização de seis clones de eucalipto aos três anos de idade. A autora encontrou relação S/G variando entre 2,50 e 3,12. Marcelo (2007), ao analisar a relação S/G na madeira de seis espécies de eucalipto, utilizando o método de oxidação com nitrobenzeno, encontrou valores variando de 2 a 4,3. A maior relação S/G observada pela autora foi na madeira de *Eucalyptus globulus* e a menor foi no híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla*.

Os valores médios encontrados no presente trabalho foram menores aos observados por Campos (2009), ao estudar a influência das características da madeira de um híbrido de eucalipto aos quatro anos e nove meses de idade, na produção de carvão vegetal, a qual verificou relação S/G de 3,82, proveniente de uma população que apresentou relação S/G de até 4,04.

De acordo com os resultados obtidos, observa-se que as madeiras dos materiais genéticos 1, 2 e 4 se destacam para a produção de carvão vegetal, em termos das características estruturais de lignina, uma vez que apresentaram menor relação S/G. Estes clones tendem a apresentar maior rendimento gravimétrico em carvão, conforme se constata na Figura 18. O clone 3 apresentou significativamente a maior relação siringil/guaiacil e menor rendimento em carvão.

A seleção de madeiras com a menor relação S/G é uma das tendências do setor de produção de carvão vegetal para aumentar o rendimento, e conseqüentemente reduzir os custos com matéria prima.

4.1.5 Análises termogravimétrica e térmica diferencial da madeira (TGA e DTA)

Nas Figuras 14, 15, 16 e 17 observam-se, respectivamente, os termogramas referentes às análises de TGA e DTA dos materiais genéticos 1, 2, 3 e 4 e as perdas de massa em função das faixas de temperatura avaliadas a partir da madeira de eucalipto dos diferentes materiais genéticos.

O gráfico da Tabela 6 representa a perda de massa em função das faixas de temperaturas consideradas para os materiais genéticos estudados.

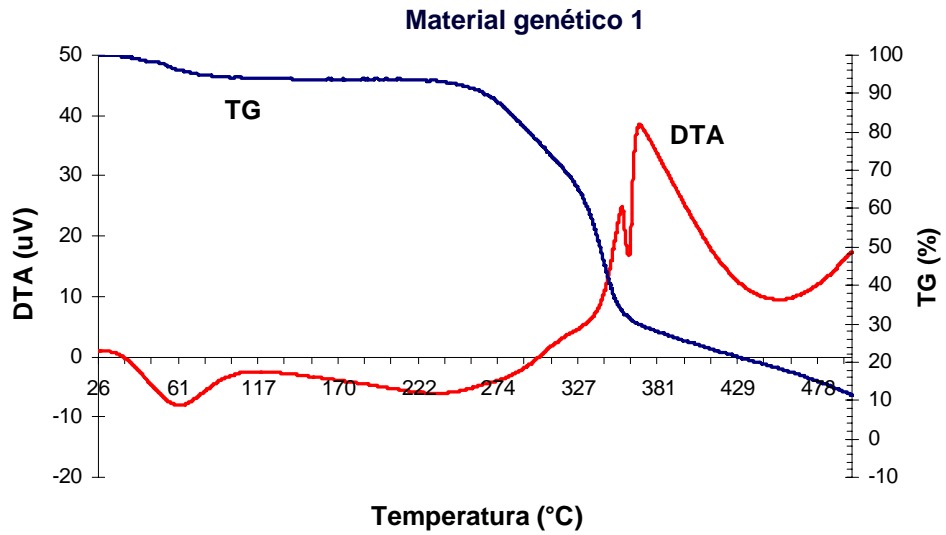


FIGURA 14 Termograma e DTA da madeira para o material genético 1.

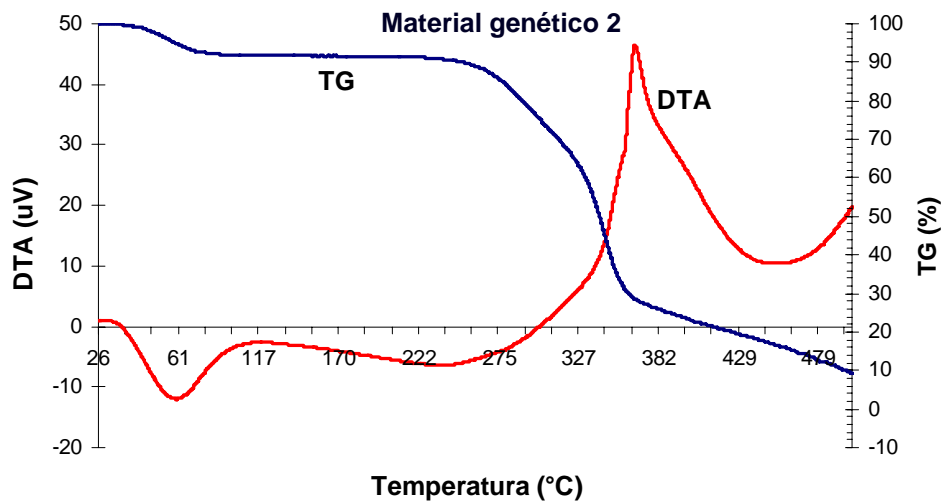


FIGURA 15 Termograma e DTA da madeira para o material genético 2.

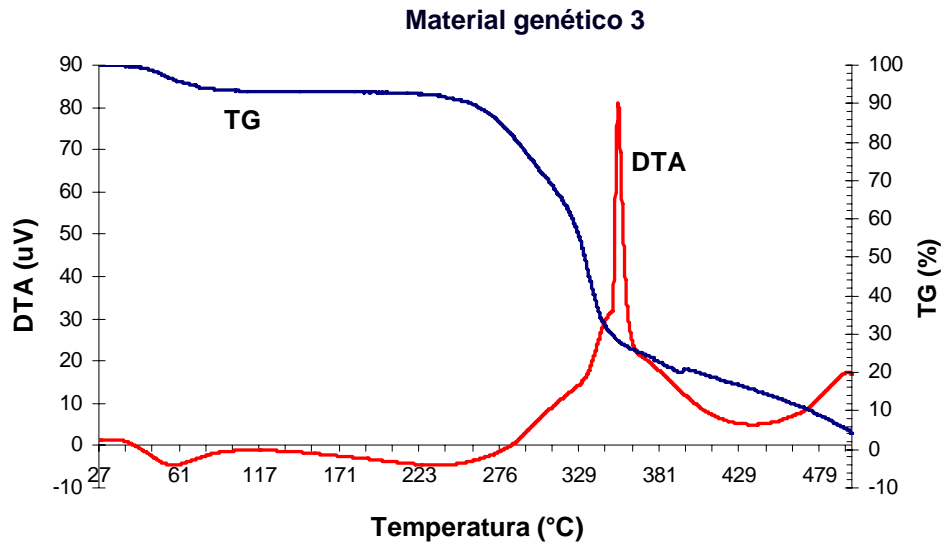


FIGURA 16 Termograma e DTA da madeira para o material genético 3.

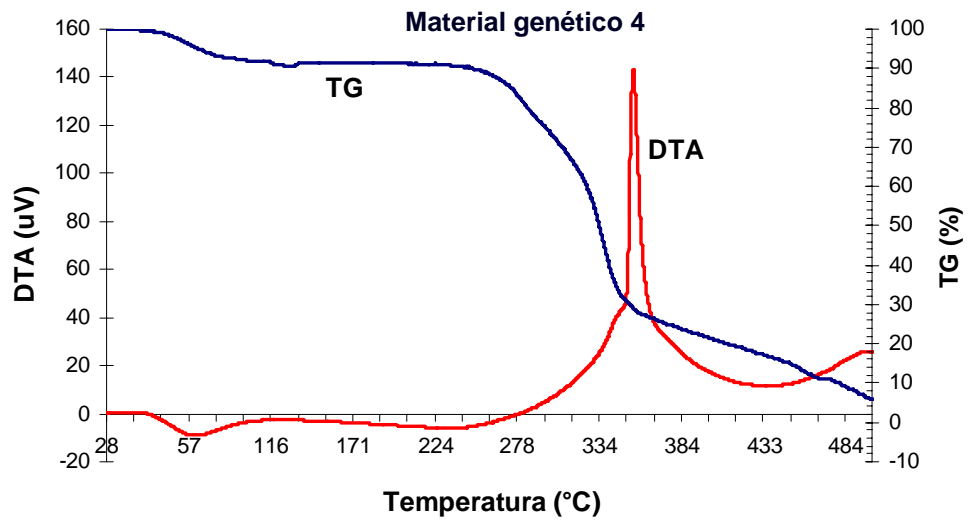


FIGURA 17 Termograma e DTA da madeira para o material genético 4.

TABELA 6 Perda de massa (%) dos diferentes materiais genéticos em função das faixas de temperaturas.

Material genético	Perda de massa (%)					Massa residual
	25°-100°C	100°-200°C	200°-300°C	300°-400°C	400°-500°C	
1	6	0	16	53	14	11
2	8	0	16	53	14	9
3	7	0	19	54	16	4
4	8	1	17	52	16	6

Pelos dados da Tabela 6, observa-se que o material genético 1 foi o que apresentou a menor perda de massa total (89%), sendo esse considerado, portanto, mais estável termicamente em relação aos demais. Por outro lado, o material genético 3 foi o menos estável, com 96% de perda de massa até a temperatura de 500°C. De modo geral, quanto mais estável termicamente a madeira espera-se maior rendimento em carvão vegetal. Isso foi observado neste trabalho, pois, os materiais genéticos 1 e 3 apresentaram maior e menor rendimento gravimétrico em carvão, respectivamente, conforme se constata na Figura 18.

Observa-se, na faixa de 25° a 100°C, que compreende a fase de secagem, a típica fase endotérmica do processo de carbonização, que a perda de massa média dos diferentes materiais foi de, aproximadamente, 7,25%. Ressalta-se que nessa perda de massa está incluída a presença de água na madeira, em função da metodologia utilizada no processo. Oliveira & Silva (2003), estudando a decomposição térmica de espécies da caatinga nordestina e comparando-as com o *Eucalyptus grandis*, por meio da análise termogravimétrica, observaram que não houve diferença significativa entre as espécies e que as curvas termogravimétricas mostraram o início da degradação térmica das madeiras a 150°C, o que evidencia que as amostras utilizadas pela autora se encontrava, provavelmente, a 0% de umidade. Segundo Raad (2004), na faixa de temperatura entre 105° e 200°C, normalmente, ocorre o desprendimento de água

de constituição e o processo de decomposição dos componentes da madeira é estável em períodos não prolongados de exposição de calor nessas temperaturas. Observa-se que não houve perda de massa na faixa de temperatura compreendida entre 100° e 200°C, evidenciando a estabilidade dos componentes químico da madeira nestas temperaturas.

De acordo com Conesa (1995) e Resende (1995), cada componente da madeira se decompõe mais intensamente em distintas faixas de temperatura e que as hemiceluloses apresentam essa faixa entre 200° e 300°C. Observa-se que, nesta faixa, os diferentes materiais genéticos tiveram entre 16% a 19% de perda de massa total. Caso se considere o teor de hemiceluloses médio de 25%, a perda será de mais de 68% das hemiceluloses nesta faixa.

Verifica-se que a maior degradação térmica ocorreu na faixa de temperatura compreendida entre 300° e 400°C, durante a qual se obtiveram perdas superiores a 50% da massa inicial da madeira. Essa faixa de temperatura compreende a fase de degradação, principalmente da celulose, que, de acordo com a literatura, tem sua maior degradação na faixa compreendida entre 325° e 375°C. Oliveira (2003) observou, em seu estudo, que a degradação térmica foi mais acentuada nas faixas de temperatura entre 250° e 450°C.

Em estudo realizado por CETEC (1979), com madeira de *Pinus*, verificou-se, por meio da curva termogravimétrica realizada, em meio de nitrogênio, maior perda de massa, em torno de 63%, na faixa de temperatura entre 270° e 400°C. Esses resultados permitem a comparação do comportamento térmico a partir de diferentes biomassas sobre a cinética da reação, inferindo-se a influência de alguns parâmetros, como composição química, temperatura, taxa de aquecimento, pressão, entre outros. Campos (2009) estudou as faixas de degradação térmica da madeira de *Eucalyptus* e dos seus componentes isoladamente (celulose, hemiceluloses e lignina) e observou maior degradação térmica da madeira entre 250° e 400°C. A autora encontrou, para a madeira, uma

faixa mais extensa de degradação e inferiu que esse fato deve-se à sobreposição das faixas de maior reação de seus componentes hemicelulósicos e celulósicos.

A lignina é o componente da madeira que começa a se decompor primeiro, porém, a sua maior degradação ocorre em temperaturas compreendidas entre 350° e 500°C (Conesa, 1995). Verifica-se que os materiais genéticos 1 e 2 foram os que menos perderam massa na faixa de temperatura entre 400° e 500°C e também tiveram os maiores rendimentos gravimétrico em carvão vegetal. Isso evidencia, também, que a temperatura final de carbonização é um parâmetro importante quando se desejam altos rendimentos em carvão, haja vista a faixa de maior perda de massa do componente mais estável (lignina). Esta faixa de temperatura é compatível com a temperatura de operação dos fornos de alvenaria, o que demonstra a importância da lignina na produção de carvão vegetal.

Dessa forma, os resultados obtidos pelos clones 1 e 2 podem ser atribuídos ao tipo de lignina presente em cada material, uma vez que a relação siringil/guaiacil do material genético 2, por exemplo, foi a menor (2,6), indicando a maior presença de estruturas do tipo guaiacil, mais resistente à degradação térmica, devido à sua maior condensação.

Pode ser observada, a partir da Figura 15, as curvas de DTA, obtida por diferenciação da curva de perda de massa, na qual está expressa o maior pico de perda de massa no clone 1 na faixa de temperatura próxima a 380°C. O pico inverso observado no início da reação corresponde à perda de água na fase inicial do processo. Para esse clone, os picos observados, dentro das faixas compreendidas entre 360° e 380°C, correspondem, provavelmente, a algum ruído do equipamento. Campos (2009), estudando as curvas DTA na degradação térmica dos principais componentes da madeira e comparando-as àquelas referentes à degradação da madeira de eucalipto, observou um pico de reação para celulose em temperaturas que variaram de 320° a 360°C. A autora observou

também, para madeira de *Eucalyptus*, 2 picos de reação bem definidos entre 280°C e 340°C.

Kifani-Sahban et al. (1996), ao estudarem curvas de análise térmica diferencial para a madeira de *Eucalyptus*, encontraram picos de reação nas temperaturas entre 265°C e 370°C.

No presente estudo, para as mesmas condições, foram encontrados, de modo geral, para todos os clones, picos próximos a 360°C e 380°C. Partindo do fato de que a velocidade de perda de massa da lignina é consideravelmente inferior àquelas referentes às hemiceluloses e celulose, é possível atribuir os picos de reação de pirólise de *Eucalyptus* às decomposições térmicas das hemiceluloses e celulose, constituintes básicos da madeira que apresentam menores estabilidades térmicas quando comparadas à lignina. A lignina, por apresentar uma taxa de degradação térmica consideravelmente pequena, provavelmente, contribui para reduzir a evidência de outros picos de perda de massa da madeira.

No gráfico da Figura 15 pode ser observado o DTA referente ao clone 2, o qual apresenta comportamento semelhante ao citado anteriormente, no que se refere à temperatura observada no maior pico de degradação em massa da madeira. No entanto, pode-se observar menor porcentagem de perda de massa do clone um em relação a esse.

A mesma tendência de maiores perdas refletidas nos picos de DTA em torno de 360°C pode ser observada também para os clones 3 e 4. No entanto, como observado na Tabela 6, o clone 3 expressou maior perda, com apenas um pico degradação.

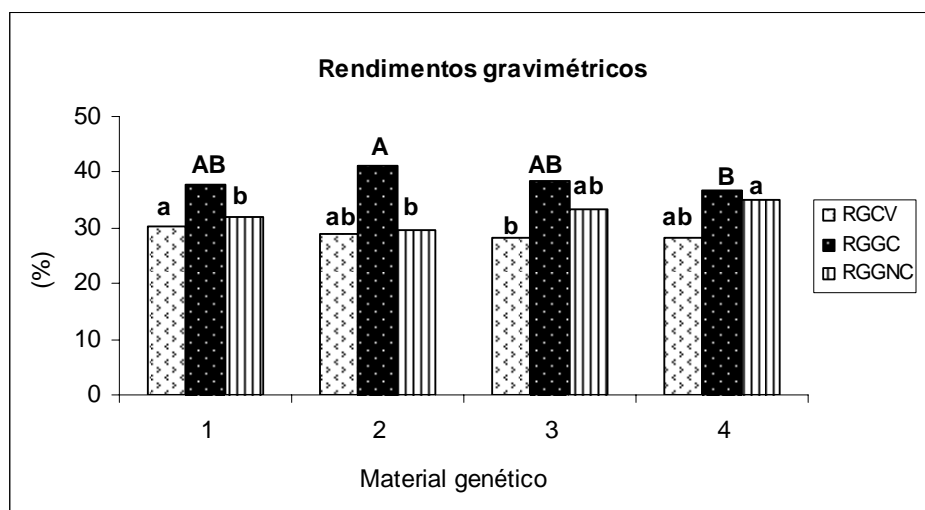
Provavelmente, a ausência de maiores faixas de picos de reação definidas deve-se, especialmente, ao comportamento da lignina que, ao contrário dos carboidratos presentes na madeira, segundo a literatura, apresenta velocidade de degradação térmica quase constante, em uma extensa faixa de temperatura, enquanto a celulose, por exemplo, tem sua maior perda de massa numa faixa

estreita de temperatura (325° a 375°C). Campos (2009), ao estudar o comportamento térmico, por meio de análise térmica diferencial (DTA), observou que a velocidade de perda de massa da lignina foi, em média, 13 vezes inferior àquelas observadas para a celulose e xilana, o que demonstra a grande estabilidade térmica desse composto na faixa de temperatura estudada pela autora (até 650°C).

4.2 Rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, gases condensáveis, gases não-condensáveis e em carbono fixo

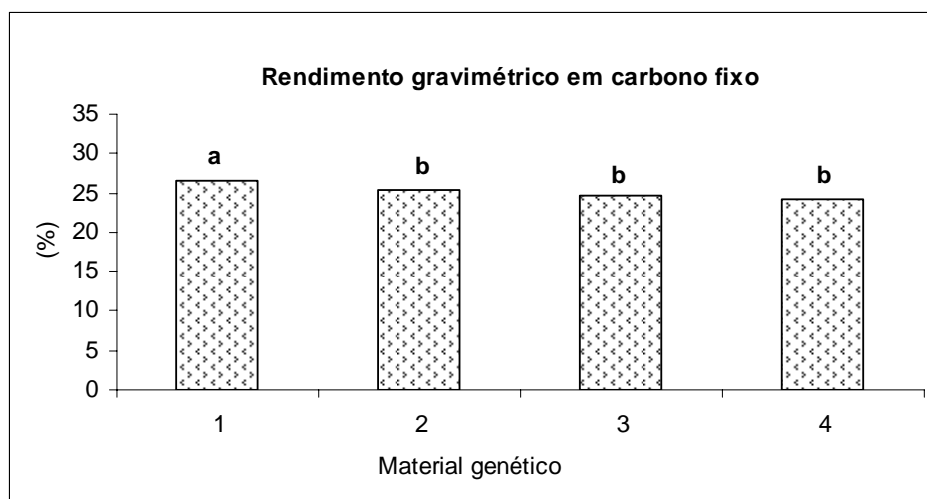
Os valores médios dos rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, gases condensáveis e gases não condensáveis são mostrados na Figura 18 e, na Figura 19, são mostrados os valores para o rendimento gravimétrico em carbono fixo, obtidos a partir das madeiras de diferentes materiais genéticos de eucalipto.

A análise de variância indicou diferenças significativas para as variáveis avaliadas nas madeiras dos diferentes clones.



Médias seguidas da mesma letra e fonte não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Tukey.

FIGURA 18 Rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, gases condensáveis e gases não condensáveis obtidos de diferentes clones de eucalipto.



Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Tukey.

FIGURA 19 Rendimento gravimétrico em carbono fixo do carvão vegetal obtido de diferentes clones de eucalipto.

Maiores valores médios significativos para o rendimento gravimétrico em carvão foram observados nas madeiras dos clones 1, 2 e 4, os quais não diferem estatisticamente entre si.

Os maiores rendimentos em gases condensáveis foram observados para as madeiras dos clones 1, 2 e 3, os quais não apresentaram diferença estatística. Os menores valores foram observados no clone 4.

Os maiores rendimentos em gases não condensáveis foram observados a partir das carbonizações na madeira do clone 4 e não apresenta diferença estatística do clone 3. Menores valores foram observados nos clones 1 e 2, os quais diferem estatisticamente dos demais e não apresentam diferença significativa entre si.

Observa-se que os rendimentos gravimétricos foram afetados pelos diferentes materiais genéticos, apresentando valores médios que variam entre 28,27% e 30,21%, 36,76% e 41,29%, 29,66% e 36,76%, para os rendimentos em

carvão vegetal, gases condensáveis e gases não condensáveis, respectivamente. Frederico (2009), ao estudar o efeito de diferentes regiões nas propriedades da madeira e do carvão a partir de cinco clones de eucalipto aos três anos de idade, encontrou valores variando entre 28,36% e 31,60%, 42,25% e 47,45% e 22,89% e 27,97%, respectivamente, para os rendimentos em carvão vegetal, gases condensáveis e gases não condensáveis. Vale ressaltar que o autor utilizou a mesma temperatura final (450°C) durante a carbonização que foi utilizada no presente trabalho, mas, com duração de quatro horas e meia, contra 7 horas no presente estudo e taxa de aquecimento de 1,67°C contra 1,07°C, utilizada nesse trabalho.

Arantes (2009), ao determinar a variação dos rendimentos gravimétricos da carbonização da madeira de um clone híbrido de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*, aos seis anos de idade, utilizando temperatura máxima de carbonização de 450°C e taxa de aquecimento 1,67°C, durante 4 horas, encontrou valores variando entre 33,68% e 35,07%, 46,69% e 48,32% e 17,33% e 18,24%, respectivamente, para os rendimentos em carvão vegetal, gases condensáveis e gases não condensáveis. Segundo Brito & Barrichelo (1981), o rendimento em carvão vegetal apresenta-se nos limites entre 25% e 35% com base na madeira seca.

Visto que a quantidade de carvão vegetal produzido, assim como sua qualidade, é fator que sofre influência da qualidade da madeira e do processo de produção, acredita-se que esses fatores possam ter contribuído para os menores valores observados de rendimento em carvão neste trabalho, quando comparado aos dados de Arantes (2009). Ressalta-se, principalmente, o tempo de carbonização, pois, de modo geral, quanto maior o tempo de exposição da madeira ao calor, maior será sua degradação térmica e menor o rendimento em carvão vegetal.

De acordo com Brito & Barrichelo (1977), estudos indicam, a partir da carbonização, que o teor de extrativos na madeira tem sensível influência no rendimento gravimétrico em carvão. Di Blasi et al. (1999) relataram maiores rendimentos em madeiras ricas em extrativos, em comparação com espécies com pouco extrativo, ao estudarem espécies nativas da região norte. Frederico (2009) encontrou maiores valores para rendimentos em carvão vegetal a partir da carbonização de clones de eucalipto com os maiores teores de extrativos totais. No entanto, no presente estudo, esse fato não foi observado no clone 4, sendo essa uma exceção à tendência observada nos clones 1 e 2.

Mackay & Roberts (1982), citados por Antal & Mok (1990), ao estudarem espécies com potencial para energia, revelaram um intervalo entre 25,9% e 35,2% para o rendimento em carvão vegetal, sendo possível relacionar essa variação, segundo os autores, com os teores de lignina, holocelulose e extrativos da biomassa.

Os valores observados para os rendimentos em gases condensáveis e não condensáveis observados foram diferentes dos encontrados por Arantes (2009) e Frederico (2009), sendo, de modo geral, inferiores para o RGGC e superiores para o RGGNC. Esse fato pode ser atribuído à influência da taxa de carbonização e dos tamanhos das peças de madeira carbonizadas sobre os parâmetros avaliados, como também à eficiência dos condensadores. Pois, de modo geral, quanto maior a velocidade de carbonização, mais se privilegia a pirólise rápida, a qual tem como objetivo a produção de condensáveis.

De acordo com o gráfico da Figura 19, verifica-se que o material genético um diferiu estatisticamente dos demais clones e apresentou rendimento gravimétrico em carbono fixo superior aos mesmos.

Os valores observados para essa propriedade variaram entre 24,20% e 26,44%. Botrel et al. (2007), estudando a qualidade do carvão de nove clones de híbridos de *Eucalyptus* sp. com 78 meses de idade, encontraram valores médios

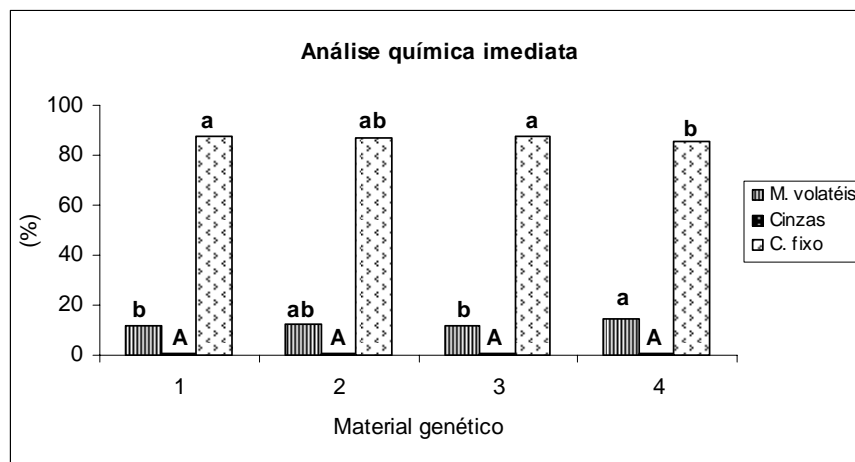
equivalentes a 25,97% para o RCF. Campos (2009), ao estudar a qualidade da madeira e do carvão de eucalipto aos cinco anos de idade, encontrou valor médio de 22,72% para essa propriedade.

Observa-se, desse modo, que os valores encontrados no presente estudo são superiores aos citados. Esse fato é importante quando se pretende indicar um material genético potencial para produção de carvão, pois o rendimento em carbono fixo envolve, simultaneamente, características de produtividade e de qualidade relacionadas ao carvão vegetal (Andrade, 1993).

4.3 Análise química imediata

No gráfico da Figura 20 são mostrados os valores médios da análise química imediata obtida a partir das madeiras dos diferentes materiais genéticos de eucalipto.

A análise de variância indicou que há diferença significativa para as variáveis avaliadas.



Médias seguidas da mesma letra e fonte não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Tukey.

FIGURA 20 Análise química imediata do carvão vegetal obtido de diferentes clones de eucalipto.

Maiores valores médios relacionados à presença de materiais voláteis foram observados no material genético 4, que apresenta diferença estatística dos clones 1 e 3, os quais apresentaram os menores valores médios para essa variável e não diferiram significativamente entre si. O teor de cinzas não foi influenciado pelos diferentes materiais genéticos avaliados. Dessa forma, não foi observada diferença significativa entre os mesmos.

Maiores valores médios significativos foram observados para o teor de carbono fixo nos clones 1, 2 e 3, os quais não apresentam diferença significativa entre si. O carvão do material genético 4 obteve o menor valor para essa variável.

De modo geral, a partir da análise química imediata do carvão oriundo dos diferentes materiais genéticos, os teores de materiais voláteis observados variaram entre 11,74% e 14,27%, os teores de cinzas entre 0,39% e 0,76% e o teor de carbono fixo variou entre 85,33% e 87,52%.

Trugilho et al. (2001) observaram, a partir da madeira de *Eucalyptus grandis* aos sete anos de idade, teores de materiais voláteis variando entre 18,0% e 21,9%. Frederico (2009), ao avaliar as propriedades qualitativas do carvão de cinco clones de eucalipto aos três anos de idade, encontrou valores para essa variável entre 15,01% e 19,15%. Arantes (2009) encontrou porcentagens de materiais voláteis em madeira de eucalipto aos seis anos de idade variando entre 26,72% e 27,30%. Os teores de materiais voláteis encontrados por esses autores foram superiores aos observados para o carvão dos clones analisados neste trabalho. Esse fato pode ajudar a explicar as diferenças encontradas no rendimento gravimétrico em carvão, também observadas entre os trabalhos citados e o presente estudo, pois existe relação inversa entre o rendimento gravimétrico em carvão vegetal e o teor de carbono fixo, ou seja, quanto maior o teor de carbono fixo menor será o rendimento em carvão vegetal e, também, entre o teor de materiais voláteis e carbono fixo.

Santos (2008) relata que o teor de materiais voláteis no carvão situa-se entre 20% e 25% e que porcentagens inferiores a 25% são desejadas para o uso siderúrgico, visto que esse é um parâmetro que apresenta comportamento inversamente proporcional ao teor de carbono fixo no carvão, comprometendo, dessa forma, a eficiência do redutor durante as operações. No entanto, essa característica determina a estabilidade da chama e a velocidade de combustão, pois promove o aumento da permeabilidade da carga no alto-forno e a diminuição da reatividade do carvão vegetal. Sendo assim, torna-se necessária uma fração significativa de materiais voláteis no carvão para uso siderúrgico. Frederico (2009) diz que um alto teor de voláteis ocasiona a produção de muita fumaça, além da menor eficiência energética, o que não seria desejável para o carvão visando o uso doméstico.

Os teores de cinzas observados neste trabalho são inferiores aos encontrados por Frederico (2009), os quais variaram entre 0,59% e 1,26%. Também estão de acordo com o limite citado por Santos (2008), que cita, para uso siderúrgico, teores ideais de cinzas presentes no carvão inferior a 1%. O mesmo autor cita que o teor de cinzas no carvão vegetal varia entre 0,5% e 4%. A alta presença de cinzas no carvão vegetal pode indicar possível contaminação do carvão com resíduos do solo, não sendo desejável, pois, além de reduzir o seu poder calorífico, causa desgaste no alto-forno e pode comprometer a qualidade do ferro-gusa com consequentes formações de trincas e fissuras.

Analisando o teor de carbono fixo no carvão da madeira de eucalipto, Trugilho et al. (2001) encontraram valores variando entre 78,2% e 81,5%. Frederico (2009) encontrou, no carvão dos clones de eucalipto, valores para o teor de carbono fixo entre 80,13% e 83,74%. Arantes (2009) observou, para a mesma variável, valores compreendidos entre 72,54% e 73,07%. As porcentagens de carbono fixo observadas no carvão avaliado neste trabalho foram superiores a todas essas citadas anteriormente. Mesmo em se tratando do

mesmo gênero e de árvores com idades aproximadas, variações comuns à madeira possivelmente explicariam essas diferenças. Pode-se citar, entre elas, a constituição química da madeira. Outro fato a ser ressaltado é a diferença observada entre os trabalhos citados e o presente estudo, no que se refere aos rendimentos gravimétricos em carvão vegetal.

No entanto, muito é atribuído às variáveis do processo de carbonização da madeira, quando se trata do teor de carbono fixo observado no carvão vegetal. Botrel (2006) afirma que os teores de carbono fixo no carvão são sensivelmente influenciados pela temperatura e pela taxa de aquecimento do sistema. A taxa de aquecimento utilizada neste trabalho difere daqueles e também o tempo de carbonização que foi mais longo, quando comparado aos trabalhos citados.

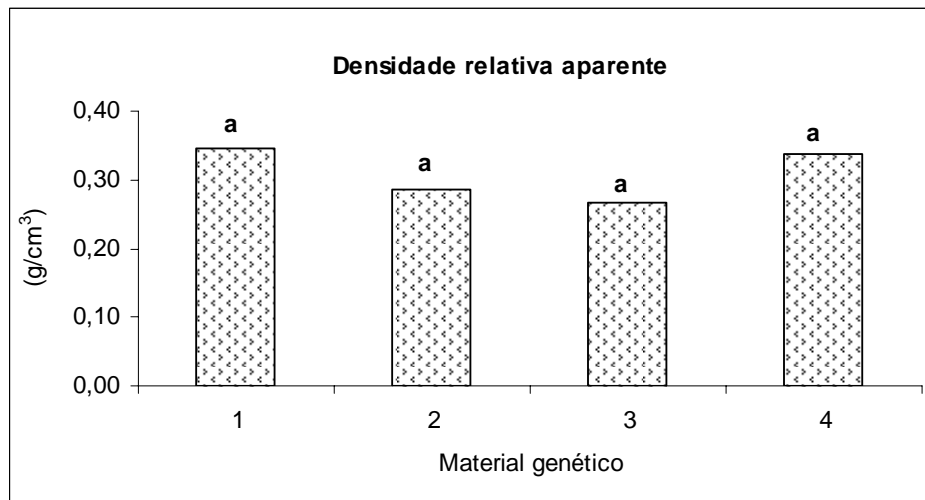
Segundo Santos (2008), a faixa desejada de carbono fixo no carvão para uso siderúrgico está compreendida entre 75% e 80%, no entanto, maiores teores de carbono fixo contribuem para o aumento na produtividade dos altos-fornos para o mesmo consumo redutor. Rocha & Klitzke (1998) ratificam que o efeito da quantidade de carbono fixo num determinado carvão vegetal reflete na utilização do forno por volume e ressaltam que quanto maior for a quantidade de carbono fixo, menor será o volume ocupado no forno pelo carvão.

Observa-se, portanto, que as faixas de valores encontradas para o teor de carbono fixo no carvão oriundo dos diferentes clones atendem às condições citadas como ideais para uso siderúrgico e residencial.

4.4 Densidade relativa aparente

Na Figura 21 são apresentados os valores médios da densidade relativa aparente do carvão vegetal obtida a partir da madeira de diferentes materiais genéticos de eucalipto.

A análise de variância mostrou que o efeito de clone foi não significativo. Portanto, não há diferença estatística entre os clones avaliados.



Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Tukey.

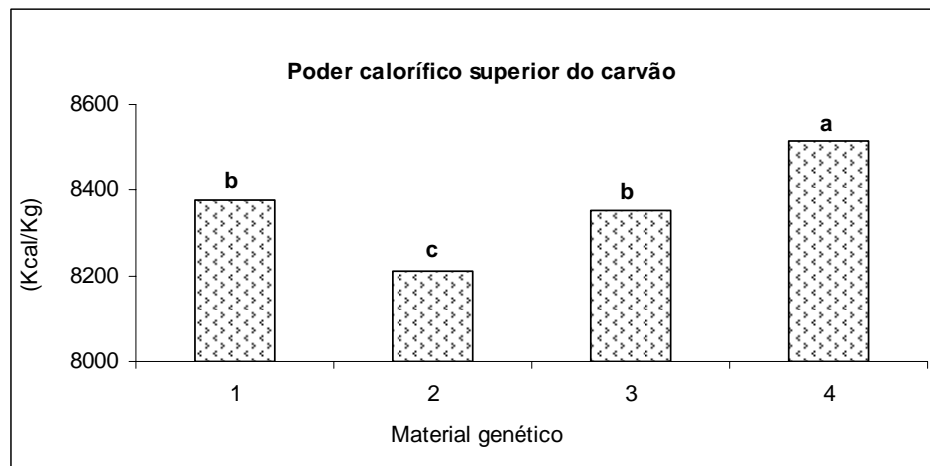
FIGURA 21 Densidade relativa aparente do carvão vegetal obtido de diferentes clones de eucalipto.

Os valores médios encontrados para densidade relativa aparente do carvão variaram entre 0,266 e 0,345g/cm³. Trugilho et al. (2001) observaram valores para essa variável em clones de *Eucalyptus grandis* variando entre 0,399 e 0,486g/cm³. Frederico (2009) encontrou, na madeira de clones de eucalipto, valores entre 0,285 e 0,323g/cm³. Esses últimos estão próximos aos valores observados no presente trabalho, assim como estão próximos os valores das densidades básicas das madeiras estudadas nos dois trabalhos. Dessa forma, provavelmente, diferenças na densidade básica da madeira e na constituição química da madeira pesquisada por Trugilho et al. (2001) podem ajudar a explicar os maiores valores encontrados para densidade aparente do carvão no referido trabalho, quando comparados aos desta pesquisa, uma vez que, de modo

geral, quanto maior a densidade da madeira maior será a densidade aparente do carvão.

4.5 Poder calorífico superior do carvão

No gráfico da Figura 22 são apresentados os valores médios de poder calorífico superior do carvão vegetal, obtido a partir da madeira de diferentes materiais genéticos de eucalipto. A partir da análise de variância observa-se diferença significativa entre os clones, exceto entre os clones 1 e 3.



Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Tukey.

FIGURA 22 Poder calorífico superior do carvão vegetal obtido de diferentes clones de eucalipto.

Os maiores valores significativos para o poder calorífico superior do carvão foram observados para a madeira do clone 4, que diferiu estatisticamente dos demais. Isso se deve, provavelmente, ao menor teor de carbono fixo presente no carvão oriundo desse clone que apresenta também os maiores teores de materiais voláteis, ricos em hidrogênio (H) e que tem poder calorífico superior ao da madeira.

Os menores valores encontrados para essa propriedade foram no clone 2, que difere estatisticamente dos demais, seguido dos clones 1 e 3, os quais não apresentam diferença significativa entre si.

Os valores médios observados variaram entre 8.210 e 8.515 kcal/kg. Pereira et al. (2000), ao estudarem as características da madeira de cinco espécies de eucalipto, com dez anos e meio, encontraram valores para o PCS entre 6.626 e 8.088 kcal/kg. Santos (2008) afirma que o poder calorífico do carvão vegetal encontra-se próximo de 7.500 kcal/kg. Frederico (2009) encontrou valores para essa propriedade entre 8.129 e 8.389 kcal/kg.

Observa-se que os valores encontrados neste estudo são superiores aos citados. Dessa forma, os carvões produzidos a partir dos diferentes materiais genéticos analisados apresentam valores satisfatórios de PCS para o emprego siderúrgico e doméstico. Carvão vegetal com maior poder calorífico proporciona, especialmente para o emprego siderúrgico, menor consumo de insumo redutor, considerando uma mesma produtividade. Provavelmente, o maior poder calorífico superior do carvão observado neste estudo se deve aos altos teores de carbono fixo obtidos para os carvões dos diferentes materiais genéticos, apesar de não terem sido observadas correlações significativas entre eles.

4.6 Correlações entre as propriedades da madeira e as do carvão

Na Tabela 7 são apresentadas as correlações existentes entre as propriedades da madeira do material genético 1 e as do carvão vegetal, bem como seu rendimento gravimétrico.

TABELA 7 Correlações entre as características da madeira e do carvão vegetal do material genético um.

Clone 1	PCS MAD	EXTR	LIG	HOLO	DB	COMP	LARG	LUME	ESPES	MV	CZ	CF	DRAP CV	PCS CV	RGCV	RGGC	RGGNC
PCS MAD	1,00	-0,37	0,14	0,62	0,09	0,65	-0,24	-0,32	0,22	-0,31	0,54	0,04	0,49	-0,73**	0,90*	0,29	-0,58
EXTR		1,00	0,20	-0,19	0,32	-0,15	0,05	-0,24	0,37	0,59	-0,66	-0,23	-0,39	0,54	-0,23	-0,86*	0,80**
LIG			1,00	-0,38	-0,09	-0,48	0,87*	0,47	0,27	0,72***	0,57	-0,91*	-0,73***	-0,49	-0,15	-0,43	0,42
HOLO				1,00	0,52	0,71***	-0,70***	-0,21	-0,39	-0,30	-0,03	0,29	0,55	0,01	0,70***	0,53	-0,70***
DB					1,00	-0,06	-0,31	-0,08	-0,17	0,42	-0,39	-0,20	-0,17	0,46	0,34	0,11	-0,22
COMP						1,00	-0,76**	-0,64	0,08	-0,70***	-0,07	0,67***	0,89*	-0,21	0,70***	0,21	-0,43
LARG							1,00	0,67***	0,11	0,65	0,53	-0,83*	-0,83*	-0,34	-0,54	-0,34	0,48
LUME								1,00	-0,66	0,49	0,47	-0,65	-0,68***	-0,03	-0,60	0,26	0,01
ESPES									1,00	0,03	-0,07	0,01	0,06	-0,32	0,30	-0,67***	0,45
MV										1,00	-0,03	-0,89*	-0,93*	0,21	-0,38	-0,50	0,55
CZ											1,00	-0,43	-0,11	-0,89*	0,18	0,36	-0,36
CF												1,00	0,89*	0,21	0,26	0,28	-0,33
DRAP CV													1,00	-0,16	0,62	0,40	-0,56
PCS CV														1,00	-0,44	-0,15	0,29
RGCV															1,00	0,28	-0,60
RGGC																1,00	-0,94*
RGGNC																	1,00

Correlações significativas, a 5%*, 10%** e 15%*** de probabilidade pelo teste T.

em que (DB) densidade básica em g.cm-3, (PC mad) poder calorífico superior da madeira em kcal.kg-1; (EXTR) teor de extrativos; (LIGN) teor de lignina; (HOLO) teor de holocelulose, (RCV) rendimento em carvão vegetal, em %; (RGC) rendimento em gases condensáveis; (RGNC) rendimento em gases não condensáveis em %; (Ucv) teor de umidade do carvão vegetal; (MV) teor de materiais voláteis; (CZ) teor de cinzas; (CF) teor de carbono fixo; (DRAP CV) densidade relativa aparente do carvão vegetal, em g.cm-3; (PCCV) poder calorífico superior do carvão vegetal, em kcal.kg l.

Observa-se, a partir dos dados da Tabela 7, que o poder calorífico da madeira do clone 1 apresentou correlação positiva com o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (0,90) e negativa com o poder calorífico do mesmo (-0,73). Em relação ao poder calorífico, o resultado difere da maioria dos trabalhos; o mesmo foi observado para a correlação negativa observada entre o teor de lignina e o de carbono fixo (-0,91) na madeira do clone 1, pois essa difere dos resultados encontrados por Brito & Barrichello (1977), Martins (1980) e Oliveira (1988).

O poder calorífico das madeiras dos clones avaliados neste estudo apresentou correlação positiva com a relação siringil/guaiacil (0,61), quando essa foi avaliada independente do clone (Tabela 1A). No entanto, esse fato não foi preponderante para a ocorrência de diferentes correlações com o carvão vegetal, quando as correlações foram observadas para cada clone, individualmente. Ressalta-se que não foi observada, nos trabalhos consultados, a influência do poder calorífico da madeira no rendimento gravimétrico, como ocorreu neste trabalho.

Foi observada alta correlação negativa para o clone 1, entre o rendimento gravimétrico em gases condensáveis (RGGC) e o rendimento gravimétrico em gases não-condensáveis (RGGNC) (-0,94). Vital et al. (1994) relatam que os teores de holocelulose na madeira influenciam diretamente os rendimentos gravimétricos em líquidos e em gases, após a degradação térmica da madeira. No presente trabalho, foi observada, para o clone 1, correlação negativa entre o teor de holocelulose da madeira e o rendimento gravimétrico em gases não-condensáveis RGGNC (-0,70) e correlação positiva com rendimento gravimétrico em carvão vegetal RGCV (0,70).

Foram observadas, ainda, para o clone 1, correlações positivas, a 15% de significância, entre o comprimento da fibra e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (0,70).

Observa-se, pelos dados da Tabela 7, para os carvões provenientes da madeira do clone 1, que o teor de materiais voláteis tem forte correlação negativa com o teor de carbono fixo (-0,89) e densidade aparente (-0,93). Isso se deve ao desprendimento dos gases ricos em hidrogênio e oxigênio, quando da produção do carvão, tendo como consequência a concentração de carbono. Quanto à densidade aparente, essa é afetada pelo teor de materiais voláteis, visto que quanto maior a degradação da madeira, maior a liberação de gases e, conseqüentemente, menor a massa final por unidade de volume, pois a perda volumétrica é menor em relação à massa. Com base nos dados da Tabela 7, também se observa que o teor de carbono fixo apresentou correlação positiva com a densidade aparente (0,89) e negativa com a largura das fibras (-0,83) e teor de materiais voláteis (-0,89). Verifica-se também que o teor de cinzas apresentou correlação negativa com o poder calorífico superior do carvão (-0,89), ou seja, quanto maior o teor de inorgânicos, menor a energia depreendida dos carvões. Frederico (2009) também observou correlação negativa entre os parâmetros citados anteriormente (-0,65).

Brito & Barrichelo (1977), utilizando temperatura final de 500°C, carbonizaram diferentes espécies de *Eucalyptus* e observaram um coeficiente de correlação de 0,78 entre o teor de carbono fixo e o teor de lignina. Martins (1980) e Oliveira (1988) também relatam correlação positiva e significativa entre o teor de carbono fixo e o teor de lignina. Campos (2008) obteve coeficiente de correlação de 0,8 entre o teor de carbono fixo e o teor de lignina. Essa mesma magnitude foi citada por Vital et al. (1987) para a correlação entre os parâmetros citados. Porém, essa relação não foi observada no presente trabalho para o clone 1, para o qual foi encontrada correlação inversa entre o carbono fixo e teor de lignina (-0,91), o que não era esperado, e isso pode ser devido à grande variabilidade encontrada entre os diferentes materiais genéticos.

Santos (2008) obteve relação direta entre a densidade relativa aparente do carvão vegetal e a densidade básica da madeira, resultados semelhantes aos encontrados por Brito & Barrichelo (1977), Pastore et al. (1982) e Frederico (2009) que também observou correlação positiva entre esses parâmetros (0,69). Ao serem estudadas as correlações, independente do material utilizado, foi observada, neste trabalho, correlação positiva entre a densidade básica da madeira e a densidade relativa aparente do carvão, a 5% de significância (0,54), conforme dados da Tabela 1A.

Para o clone 1 foi observada uma correlação negativa entre a densidade relativa aparente do carvão vegetal e o teor de lignina (-0,73). Esse resultado apresenta-se oposto ao observado por Santos (2008), que encontrou um coeficiente de determinação de 0,56, mostrando que 56% da variação da densidade aparente do carvão vegetal pode ser explicada pela variação no teor de lignina presente na madeira.

Na Tabela 8 são apresentadas correlações existentes entre as propriedades da madeira do material genético 2 e as do carvão vegetal, bem como seu rendimento gravimétrico.

TABELA 8 Correlações entre as características da madeira e do carvão vegetal.

Clone 2	PCS MAD	EXTR	LIG	HOLO	DB	COMP	LARG	LUME	ESPES	MV	CZ	CF	DRAP CV	PCS CV	RGCV	RGGC	RGGNC
PCS MAD	1,00	-0,14	0,32	-0,14	-0,18	0,27	-0,66	-0,08	-0,62	-0,75**	-0,45	0,78**	-0,14	-0,10	-0,47	0,95*	-0,85*
EXTR		1,00	0,11	-0,87*	0,36	-0,31	-0,35	-0,70***	0,47	-0,47	-0,03	0,43	-0,10	0,60	-0,19	-0,21	0,37
LIG			1,00	-0,24	-0,55	0,66	-0,26	-0,35	0,14	-0,63	0,03	0,55	0,06	0,30	0,06	0,12	-0,19
HOLO				1,00	-0,36	-0,07	0,72***	0,76**	-0,14	0,64	-0,04	-0,56	-0,17	-0,27	-0,00	-0,06	0,08
DB					1,00	-0,23	-0,50	0,25	-0,36	0,11	0,54	-0,24	0,54	-0,37	0,30	-0,23	0,09
COMP						1,00	-0,34	0,03	-0,40	-0,25	0,45	0,11	0,65	-0,49	0,62	0,13	-0,55
LARG							1,00	0,62	0,33	0,74**	0,27	-0,73***	-0,10	0,09	0,14	-0,66	0,71
LUME								1,00	-0,53	0,53	0,43	-0,59	0,33	-0,58	0,28	-0,12	-0,03
ESPES									1,00	0,15	-0,23	-0,08	-0,51	0,80**	-0,18	-0,57	0,80**
MV										1,00	0,31	-0,97*	0,12	-0,34	0,40	-0,60	0,47
CZ											1,00	-0,54	0,90*	-0,53	0,90*	-0,62	0,17
CF												1,00	-0,34	0,44	-0,59	0,70***	-0,46
DRAP CV													1,00	-0,74**	0,90*	-0,28	-0,23
PCS CV														1,00	-0,64	-0,12	0,55
RGCV															1,00	-0,56	0,03
RGGC																1,00	-0,85*
RGGNC																	1,00

Correlações significativas, a 5%*, a 10%** e a 15%*** de probabilidade, pelo teste T.

em que (DB) densidade básica em g.cm-3; (PC mad) poder calorífico superior da madeira em kcal.kg-1; (EXTR) teor de extrativos; (LIGN) teor de lignina; (HOLO) teor de holocelulose; (RCV) rendimento em carvão vegetal, em %; (RGC) rendimento em gases condensáveis; (RGNC) rendimento em gases não condensáveis em %; (Ucv) teor de umidade do carvão vegetal; (MV) teor de materiais voláteis; (CZ) teor de cinzas; (CF) teor de carbono fixo; (DRAP CV) densidade relativa aparente do carvão vegetal, em g.cm-3; (PCCV) poder calorífico superior do carvão vegetal, em kcal.kg l.

Observa-se, na Tabela 8, que o teor de holocelulose da madeira do clone 2 apresentou correlação negativa com o teor de extrativo (-0,87) e positiva com a largura (0,72) e diâmetro do lume da fibra (0,76).

No presente trabalho, ao se avaliarem as correlações, independente do material genético, foi observada correlação negativa (-0,52) entre o teor de extrativos e o poder calorífico superior do carvão. Dessa forma, provavelmente, esse fato deve-se à natureza química dos compostos. Vital et al. (1987) carbonizaram cavacos de *Eucalyptus camaldulensis* aos 33 meses de idade e não encontraram correlação entre o teor de extrativos e as propriedades do carvão produzido.

O rendimento gravimétrico em gases condensáveis, obtido a partir da carbonização do clone 2, apresentou alta correlação com o poder calorífico superior da madeira (0,95) e média com o teor de carbono fixo (0,70). Quanto ao rendimento em gases não condensáveis, ele apresentou correlações negativas com o poder calorífico da madeira (-0,85) e com o rendimento em gases condensáveis (-0,85), conforme se verificou na Tabela 8. A correlação negativa do poder calorífico da madeira com o rendimento gravimétrico em gases não-condensáveis (RGNC) se deve, provavelmente, à perda dos gases combustíveis emanados pela madeira.

Verifica-se, pelos dados das Tabelas 8 e 9, para os carvões provenientes das madeiras dos clones 2 e 3, que o teor de materiais voláteis tem uma forte correlação negativa com o teor de carbono fixo. Observa-se também que o teor de cinzas presente no carvão oriundo da madeira do clone dois tem relação direta com o rendimento em carvão (0,90) e com a densidade relativa aparente (0,90) e apenas com a densidade aparente para o clone 3. Isto se deve, provavelmente, à maior densidade dos inorgânicos presentes nas cinzas, contribuindo para uma maior massa por unidade de volume.

De modo geral, pode-se observar que os clones 1, 2, 3 e 4 apresentam altas correlações entre o teor de materiais voláteis (MV) e o teor de carbono fixo (CF) no carvão na ordem de (-0,89), (-0,97), (-0,91) e (-1,00), respectivamente. Essa relação inversa é desejada visando melhor qualidade do carvão vegetal que exerce influência significativa na produtividade final do alto-forno e, por sua vez, está relacionada com suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, especialmente com o teor de carbono. Vale ressaltar que, por sua vez, o teor de carbono fixo (CF) no carvão está relacionado ao rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGCV), como foi observado nesse trabalho a partir da análise das correlações entre os referidos parâmetros na madeira do clone três (-0,69) (Tabela 9). Esses resultados estão de acordo com os de Campos (2009), que encontrou correlação negativa entre o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGCV) e o carbono fixo CF (-0,67). Essa relação também foi observada por Trugilho et al. (2001) que encontraram correlação entre o rendimento gravimétrico em carvão e os teores de carbono fixo de -0,75.

Na Tabela 9 são apresentadas correlações existentes entre as propriedades da madeira do material genético 3 e as do carvão vegetal, bem como seu rendimento gravimétrico.

TABELA 9 Correlações entre as características da madeira e do carvão vegetal.

Clone 3	PCS MAD	EXTR	LIG	HOLO	DB	COMP	LARG	LUME	ESPES	MV	CZ	CF	DRAP CV	PCS CV	RGCV	RGGC	RGNC
PCS MAD	1,00	0,48	0,40	-0,58	-0,11	0,18	0,57	-0,30	0,65	0,24	-0,47	-0,04	-0,09	0,31	0,49	0,39	-0,49
EXTR		1,00	-0,25	-0,65	-0,54	0,03	0,81*	0,06	0,53	0,17	0,44	-0,36	0,48	-0,24	0,78**	0,28	-0,62
LIG			1,00	-0,39	0,38	0,83*	-0,37	-0,84*	0,43	-0,41	-0,52	0,63	-0,13	0,15	-0,54	-0,24	0,45
HOLO				1,00	0,53	-0,64	-0,42	0,68***	-0,87*	-0,21	0,09	0,17	-0,12	-0,22	-0,40	-0,27	0,38
DB					1,00	0,15	-0,68***	0,15	-0,61	-0,44	0,00	0,44	0,30	-0,11	-0,69***	-0,79**	0,80**
COMP						1,00	-0,36	-0,86*	0,46	-0,33	-0,10	0,37	0,22	0,06	-0,43	-0,39	0,45
LARG							1,00	0,18	0,57	0,30	0,05	-0,33	-0,04	-0,12	0,91*	0,73**	-0,91*
LUME								1,00	-0,71***	0,21	0,48	-0,41	0,27	-0,22	0,31	-0,08	-0,15
ESPES									1,00	0,04	-0,36	0,11	-0,26	0,09	0,39	0,59	-0,52
MV										1,00	-0,22	-0,91*	-0,21	0,80**	0,64	0,43	-0,60
CZ											1,00	-0,20	0,84*	-0,62	0,11	-0,47	0,16
CF												1,00	-0,14	-0,54	-0,69***	-0,23	0,54
DRAP													1,00	-0,43	0,04	-0,69***	0,31
PCS CV														1,00	0,16	0,23	-0,21
RGCV															1,00	0,64	-0,93*
RGGC																1,00	-0,88*
RGNC																	1,00

Correlações significativas, a 5%*, 10%** e 15%*** de probabilidade, pelo teste T.

em que (DB) densidade básica em g.cm-3, (PC mad) Poder calorífico superior da madeira em kcal.kg-1; (EXTR) teor de extrativos; (LIGN) teor de lignina; (HOLO) teor de holocelulose; (Rcv) rendimento em carvão vegetal, em %; (RGC) rendimento em gases condensáveis; (RGNC) rendimento em gases não condensáveis em %; (Ucv) teor de umidade do carvão vegetal; (MV) teor de materiais voláteis; (CZ) teor de cinzas; (CF) teor de carbono fixo; (DRAP CV) densidade relativa aparente do carvão vegetal, em g.cm-3; (PCCV) poder calorífico superior do carvão vegetal, em kcal.kg l.

Nas Tabelas 9 e 10 são mostradas as correlações negativas (-0,68 e -0,89) entre a largura das fibras e a densidade básica das madeiras dos clones 3 e 4, respectivamente. A variação nos valores da densidade básica da madeira pode sofrer influência de alguns fatores, como aqueles relacionados à composição anatômica e também química. Santos (2008) afirma que uma madeira tem maior ou menor densidade, fundamentalmente, devido a quatro fatores: tamanho da fibra, espessura da parede celular, interação entre estes dois fatores e a presença de extrativos. No entanto, foram observadas, como citado acima, correlações negativas entre a largura da fibra e a densidade básica da madeira dos referidos clones. Isso evidencia que outros fatores influenciaram os valores de densidade, sendo necessário um estudo principalmente do tamanho e da frequência dos vasos, visto que o teor de extrativos também não apresentou correlação positiva com essa variável.

Os dados da Tabela 9 mostram as correlações positivas observadas entre o teor de lignina da madeira e o comprimento das fibras (0,83) e entre o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGCV) e a largura das fibras (0,91) para o clone 3, como também as correlações negativas entre o teor de lignina e o diâmetro do lume (-0,84) e entre a espessura da parede e o diâmetro de lume das fibras (-0,71).

Foi observada também, para esse clone, correlação negativa entre o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGCV) e o teor de carbono fixo (CF) (-0,69), como se observa na Tabela 9. Esse resultado está de acordo com o de Campos (2009), que encontrou correlação de (-0,67) e com o de Trugilho et al. (2001), que observaram correlação entre o rendimento gravimétrico em carvão e o teor de carbono fixo de -0,75. A correlação negativa entre esses parâmetros se deve à maior degradação da madeira que, durante o processo de pirólise, tem grande perda de massa e eliminação de compostos voláteis ricos em

oxigênio e hidrogênio e, com isso, concentra-se carbono, derivado principalmente da lignina.

Observa-se, ainda na Tabela 9, para o clone 3, que o rendimento em gases condensáveis, de modo geral, tem relação inversamente proporcional com a densidade básica da madeira (-0,79), o rendimento em gases não condensáveis (-0,88) e com a densidade relativa aparente do carvão vegetal (-0,69). Já para o rendimento em gases não condensáveis, verificam-se altas correlações negativas entre esse e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGCV) (-0,93), rendimento gravimétrico em gases condensáveis (RGGC) (-0,88) e largura das fibras (-0,91).

Na Tabela 10 são apresentadas correlações existentes entre as propriedades da madeira do material genético 4 e as do carvão vegetal, bem como seu rendimento gravimétrico.

TABELA 10 Correlações entre as características da madeira e do carvão vegetal.

Clone 4	PCS MAD	EXTR	LIG	HOLO	DB	COMP	LARG	LUME	ESPES	MV	CZ	CF	DRAP CV	PCS CV	RGCV	RGGC	RGGNC
PCS MAD	1,00	-0,40	-0,59	0,43	0,09	0,48	0,24	0,29	-0,23	-0,45	-0,59	0,47	0,01	-0,26	-0,82*	-0,49	0,66
EXTR		1,00	0,48	-0,79**	-0,05	-0,56	0,14	0,53	-0,57	0,09	-0,41	-0,07	0,38	0,66	0,51	0,15	-0,30
LIG			1,00	-0,60	-0,04	-0,10	-0,24	0,07	-0,21	0,24	0,10	-0,25	-0,18	0,66	0,18	0,32	-0,31
HOLO				1,00	-0,43	0,37	0,37	-0,36	0,64	0,36	0,08	-0,36	0,26	-0,93*	-0,53	-0,55	0,60
DB					1,00	-0,27	-0,89*	-0,33	-0,07	-0,86*	0,33	0,85*	-0,79**	0,57	0,08	0,20	-0,18
COMP						1,00	0,29	0,33	-0,25	-0,09	-0,19	0,10	-0,22	-0,35	-0,57	0,23	0,04
LARG							1,00	0,61	-0,21	0,59	-0,65	-0,55	0,86*	-0,54	-0,16	-0,26	0,25
LUME								1,00	-0,90*	-0,08	-0,84*	0,12	0,38	0,22	-0,07	0,20	-0,13
ESPES									1,00	0,42	0,68***	-0,45	0,00	-0,55	-0,01	-0,39	0,30
MV										1,00	0,04	-1,00*	0,69***	-0,46	0,14	-0,24	0,13
CZ											1,00	-0,09	-0,55	-0,09	0,43	0,36	-0,42
CF												1,00	-0,66	0,46	-0,16	0,22	-0,11
DRAP CV													1,00	-0,40	0,05	-0,47	0,33
PCS CV														1,00	0,24	0,33	-0,33
RGCV															1,00	0,59	-0,80**
RGGC																1,00	-0,96*
RGGNC																	1,00

Correlações significativas, a 5%*, 10%** e 15%*** de probabilidade, pelo teste T.

em que (DB) densidade básica em g.cm-3, (PC mad) poder calorífico superior da madeira em kcal.kg-1; (EXTR) teor de extrativos; (LIGN) teor de lignina; (HOLO) teor de holocelulose, (RCV) rendimento em carvão vegetal, em %; (RGC) rendimento em gases condensáveis; (RGNC) rendimento em gases não condensáveis em %; (Ucv) teor de umidade do carvão vegetal; (MV) teor de materiais voláteis; (CZ) teor de cinzas; (CF) teor de carbono fixo; (DRAP CV) densidade aparente do carvão vegetal, em g.cm-3; (PCCV) poder calorífico superior do carvão vegetal, em kcal.kg l.

Destaca-se, para o clone 4, a ausência de correlações entre o teor de lignina na madeira e as propriedades do carvão. Martins (1980) e Oliveira (1988) relatam correlação positiva e significativa entre o teor de lignina e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Neste estudo, resultado oposto foi observado, ou seja, correlação negativa, ao se avaliar as correlações entre o teor de lignina e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGCV) (-0,44), independente do material genético avaliado, conforme se observado na Tabela 1A. Na mesma tabela é possível observar também correlação positiva entre o teor de lignina e o poder calorífico superior do carvão (0,59). Esse resultado está de acordo com a maioria dos resultados encontrados na literatura. O poder calorífico superior do carvão vegetal apresentou correlação negativa com o teor de holocelulose da madeira do clone quatro (-0,93), como se observa na Tabela 10.

O rendimento em gases não condensáveis apresentou correlação negativa com o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RGCV) (-0,80) e com o rendimento gravimétrico em gases condensáveis (RGGC) (-0,96), conforme Tabela 10. Isso se deve, provavelmente, à redução no rendimento em carvão que resulta em elevação dos rendimentos de líquido e gás, devido à maior degradação da madeira e isso acontece porque ocorre perda dos voláteis, os quais irão enriquecer as fases líquidas e gasosas. Essa expulsão dos voláteis do carvão provoca, de modo geral, aumento do teor de carbono fixo e perda de densidade aparente do carvão.

Esse fato foi constatado por meio das fortes correlações negativas observadas entre o teor de carbono fixo e a porcentagem de voláteis nos clones 1, 2, 3 e 4, conforme apresentado nas Tabelas 7, 8, 9 e 10, respectivamente. Ainda foi observado, para o clone 1, alta correlação negativa (-0,93) entre materiais voláteis e a densidade aparente do carvão, como se observa na Tabela 7.

Em suma, observou-se que, independente do clone estudado, os rendimentos em gases condensáveis e não condensáveis têm relação inversamente proporcional, ou seja, quando se aumenta o rendimento em gases condensáveis, o de não condensáveis diminui. Não foi observada nenhuma correlação entre eles e o rendimento em carvão vegetal para os clones 1 e 2, Tabelas 7 e 8, respectivamente. Observou-se, nos clones 3 e 4, correlação negativa do rendimento em carvão com o de gases não condensáveis, como pode ser observado nas Tabelas 9 e 10, respectivamente.

Correlação positiva de 0,86 entre a densidade aparente do carvão e a largura das fibras da madeira do clone 4 foi obtida, a 5% de significância. Para os demais materiais genéticos, não foi observada nenhuma relação entre as dimensões das fibras e a densidade aparente. No entanto, avaliando as correlações, independente do material genético, observa-se correlação positiva entre a densidade aparente do carvão e o comprimento das fibras (0,45) (Tabela 1A).

Para o clone 4, o teor de materiais voláteis e o teor de carbono fixo apresentaram alta relação inversamente proporcional entre si (-1,00) e a densidade da madeira apresentou correlação positiva com o carbono fixo (0,85) e negativa com o teor de materiais voláteis (-0,86). O teor de cinzas apresentou correlação negativa com o lume das fibras (-0,84) (Tabela 10).

4.7 Estimativas da massa seca, massa de lignina total, produção de carvão vegetal e energia por hectare

Na Tabela 11 são apresentados os valores médios das estimativas da massa seca, de lignina total, de carvão vegetal e de carbono na madeira, a energia por hectare em relação ao incremento médio anual e o teste de comparação múltipla realizado.

TABELA 11 Valores do incremento médio anual, massa seca, massa de lignina, energia disponível e massa de carvão vegetal referentes aos diferentes materiais genéticos.

Material genético	IMA (m ³ /ha)	Massa seca (ton/ha.ano)	Massa de lignina (t/ha.ano)	Energia (kW.h)/ha.ano	Massa de carvão vegetal (t/ha.ano)	Massa de carbono (t/ha.ano)
1	49,1 a	26,9 a	8,1 a	143.678,9 a	8,1 a	13,1 a
2	43,9 bc	22,3 c	6,7 c	111.388,4 c	6,4 bc	10,7 c
3	47,0 b	23,4 b	7,5 b	121.310,8 b	6,7 b	11,1 b
4	40,0 c	21,9 c	7,0 c	112.726,4 c	6,2 c	10,3 d

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Tukey.

Observa-se que o incremento médio anual do clone 1 foi estatisticamente superior aos demais, valendo ressaltar que o mesmo também apresentou maior densidade básica, o que acarretou maior quantidade de massa seca de madeira por hectare/ano.

Quanto à massa de carvão vegetal estimada por hectare/ano observa-se que, novamente, o clone 1 apresentou, de forma significativa, a maior massa. Isso se deve à maior massa seca de madeira e também ao maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal obtido por esse material.

As menores massas de lignina total por hectare/ano foram obtidas para os clones 2 e 4. Infere-se, em relação ao clone 4 que, apesar de o mesmo ter apresentado o maior percentual de lignina klason, o valor acrescido desse componente na madeira não foi suficiente para superar o clone 1, que obteve a maior massa de lignina total, devido à sua maior massa seca por hectare/ano.

A maior massa de carbono foi observada para o clone 1 que diferiu estatisticamente dos demais. Os menores valores significativos e diferentes entre si foram observados para o clone 3, seguido dos clones 2 e 4.

Esses valores foram determinados considerando os valores médios de porcentagem de carbono na madeira e os valores médios das estimativas de massa seca e incremento em massa seca do clone.

Avaliando a estimativa de energia estocada por hectare/ano, verifica-se que o clone 1, em função da sua alta massa seca, apresentou maior quantidade de energia. Essa energia foi ainda maior em relação aos demais clones, visto que o poder calorífico desse material foi significativamente maior. Considerando que toda essa massa de madeira para os diferentes materiais genéticos será utilizada com um teor de umidade de $\pm 30\%$, a quantidade de energia útil que será despreendida pelos materiais 1, 2, 3 e 4 será de 86.936, 66.878, 73.431 e 67.961 kW.h, respectivamente, tendo perda média de 40% da energia total disponível.

Os resultados das massas estimadas deixaram evidente a importância da produtividade volumétrica e da densidade básica da madeira na seleção de um material genético, porém, resultados maiores sempre serão alcançados em materiais com altos teores de lignina, altos rendimento em carvão e alto poder calorífico.

5 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados, conclui-se que existe variabilidade da madeira entre os quatro materiais genéticos avaliados, tendo os mesmos correlações distintas tanto no rendimento quanto na qualidade do carvão vegetal.

Todos os materiais genéticos apresentaram, de modo satisfatório, rendimento gravimétrico em carvão vegetal e qualidade dos mesmos.

O material genético 1 se destacou entre os demais por apresentar maior resistência à degradação térmica e, conseqüentemente, maior rendimento em carvão vegetal.

Os comportamentos dos diferentes clones apresentaram-se bem semelhantes quanto ao registro dos maiores picos de perdas de massa, numa mesma estreita faixa de temperatura.

Conclui-se também que madeiras com baixas relações siringil/guaiacil acarretam aumento no rendimento em carvão vegetal.

As dimensões das fibras não apresentaram correlação com as propriedades e com o rendimento em carvão vegetal, exceto para o material genético três quanto ao rendimento em carvão e em gases não condensáveis.

A composição química da madeira, de modo geral, não apresentou correlações significativas, a 5% de significância, no rendimento e qualidade do carvão vegetal.

O material genético 1 se destacou entre os demais por apresentar estimativas de massa seca da madeira sem casca, massa de lignina, massa de carbono, massa de carvão e energia por hectare, em relação ao incremento médio anual.

A produtividade volumétrica e a densidade básica dos clones são variáveis imprescindíveis na seleção de um material genético para a produção de carvão vegetal.

De modo geral, algumas correlações já bem estabelecidas nas literaturas não foram observadas neste trabalho para os diferentes clones.

Por fim, concluiu-se que mais importante na escolha do material genético para a produção de carvão, é antever a qualidade da sua madeira mediante a avaliação das suas propriedades para a obtenção de maiores rendimentos em carvão, maiores rendimentos em carbono fixo e maiores densidades aparentes. Assim, recomenda-se atentar para a seleção de materiais genéticos com maior densidade básica, com elevados teores de lignina e com maiores concentrações de carbono e com baixa relação S/G, além do fator produtividade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, J. M. de. **Efeito da temperatura sobre rendimento e propriedades dos produtos da carbonização de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden**. 1983. 40 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard method for chemical analysis of charcoal**. Philadelphia, 1982. 1042 p.
- ANDRADE, A. M. **Efeitos da fertilização mineral e da calagem na produção e na qualidade da madeira e do carvão de eucalipto**. 1993. 105 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- ANDRADE, A. M.; PASSOS, P. R.; MARQUES, L. G. C.; OLIVEIRA, L. B.; VIDAURRE, G. B.; ROCHA, J. D. Pirólise de resíduos do coco-da-baía (*Cocos nucifera* Linn) e análise do carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 28, n. 5, p. 707-714, set./out. 2004.
- ANTAL, M. J.; GRØNLI, M. The art, science, and technology of charcoal production. **Indian Engineering Chemistry Research**, New Delhi, v. 42, n. 27, p. 1619-1640, Mar. 2003.
- ANTAL, M. J.; MOK, W. S. L. Review of methods for improving the yield of charcoal from biomass. **Energy & Fuels**, Washington, v. 4, n. 3, p. 221-225, June 1990.
- ANTAL, M. J.; VÁRHEGYI, G. Cellulose pyrolysis kinetics: the current state of knowledge. **Indian Engineering Chemistry Research**, New Delhi, v. 34, n. 4, p. 703-717, 1995.
- ARANTES, M. D. C. **Variação nas características da madeira e do carvão vegetal de um híbrido de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake**. 2009. 158 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- ASSIS, J. B. A política florestal em Minas Gerais. In: BIOMASSA: ENERGIA NOS TRÓPICOS EM MINAS GERAIS, 1., 2001, Viçosa, MG. **Anais...** Viçosa, MG: SIF, 2001. p. 115-131.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112**: carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**: carvão vegetal: determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico**: ano base 2008. Brasília, 2009. 129 p. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/estatisticas>>. Acesso em: 31 dez. 2009.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA. **Estatísticas**. Disponível em: <<http://www.silviminas.com.br>>. Acesso em: 8 maio 2010.

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.

BOTREL, M. C. G.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; SILVA, J. R. M. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 391-398, maio/jun. 2007.

BOWYER, J. L.; SHMULSKY, R.; HAYGREEN, J. G. **Forest products and wood science**: an introduction. New York: Blackwell, 2003. 112 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Diretrizes de política de agroenergia**: 2006-2011. Brasília, 2006. 33 p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional - BEN**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2009. Disponível em: <https://www.ben.epe.gov.br/downloads/BEN2007_Versao_Completa.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2010.

BRITO, J. O. **Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico**. Piracicaba: IPEF, 1993. 6 p. (Circular Técnica, 181).

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Aspectos técnicos da utilização da madeira e carvão vegetal como combustíveis. In: SEMINÁRIO DE ABASTECIMENTO ENERGÉTICO INDUSTRIAL COM RECURSOS FLORESTAIS, 2., 1982, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ, 1982. p. 101-137.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Comportamento isolados da lignina e da celulose da madeira frente à carbonização**. Piracicaba: ESALQ, 2006. 4 p. (Circular Técnica, 28).

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I., densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 14, p. 9-20, 1977.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I., densidade da madeira x densidade do carvão. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 20, p. 101-113, 1980.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G.; FONSECA, S. M. Bracatinga: características químicas do carvão vegetal. **Brasil Madeira**, Curitiba, v. 3, n. 33, p. 6-7, set. 1979.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154 p.

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

CAMPOS, A. C. M. **Carvão de *Eucalyptus***: efeito dos parâmetros da pirólise sobre a madeira e seus componentes químicos e predição da qualidade pela espectroscopia NIR. 2009. 118 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

CARNEIRO, R. S. **Influência de defeitos de crescimento e das dimensões de traqueídeos nas propriedades de densidade e flexão estática da madeira de *Pinus caribea***. 2006. 171 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília.

CARVALHO, A. G. M. **Relação siringila/guaiacila na lignina e suas implicações**. 2002. 40 p. Monografia (Pós-Graduação em Tecnologia de Celulose e Papel) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

CARVÃO. In: ENCICLOPÉDIA Britânica do Brasil. Rio de Janeiro: Encyclopaedia Britannica do Brasil, 1998. 2 CD-ROM.

- COLLET, F. Estudos comparativos em escala de laboratório, de diversas madeiras utilizadas na fabricação de carvão vegetal. **Boletim da Associação Brasileira de Metais**, São Paulo, v. 42, n. 12, p. 5-14, dez. 1985.
- COLLINS, D. J.; PILOTTI, C. A.; WALLIS, A. F. A. Correlation of chemical composition and kraft pulping properties of some Papua New Guinea reforestation woods. **Appita**, Victoria, v. 43, n. 3, p. 193-198, 1990.
- CONESA, J. A. Analysis of different kinetic models in the dynamic pyrolysis of cellulose. **Thermochimica Acta**, Amsterdam, v. 254, n. 8, p. 175-192, Mar. 1995.
- COTTA, A. M. G. **Qualidade do carvão vegetal para siderurgia**. 1996. 58 p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- COUTO, L.; MULLER, M. D.; DIAS, A. N.; TSUKAMOTO, A. de A.; FONSECA, E. M. B. **Espécies cultivada para produção de biomassa para geração de energia**. Belo Horizonte: CEMIG, 2003. 35 p.
- DADSWELL, H. E. The anatomy of eucalypt wood. **Forest Products Laboratory CSIRO**, Washington, n. 66, p. 1-28, 1972.
- DI BLASI, C.; SIGNORELLI, G.; DI RUSSO, C.; REA, G. Product distribution from pyrolysis of wood and agricultural residues: Indian engineering. **Chemistry Research**, New Delhi, v. 38, n. 12, p. 2216-2224, Dec. 1999.
- DOAT, J.; PETROFF, G. La carbonization des bois tropicaux. **Bois et Forêts des Tropiques**, Nogent-sur-Marne, v. 159, p. 55-72, jan./fév. 1975.
- DOSSA, D.; SILVA, H. D.; BELLOTE, A. F. J.; RODIGHIERI, H. R. **Produção e rentabilidade do eucalipto em empresas florestais**. Colombo: EMBRAPA, 2002. 4 p.
- EVANGELISTA, W. V. **Caracterização da madeira de clones de *Eucalyptus camaldulensis* dehnh. e *Eucalyptus urophylla* s.t. blake, oriunda de consórcio agrossilvipastoril**. 2007. 120 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **El eucalipto en la repoblación forestal**. Rome, 2003. 747 p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Global forest resources assessment 2005**. Rome, 2006. 24 p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Statistical databases**: FAOSTAT-Forestry. Rome, 2004. Disponível em: <<http://www.faostat.fao.org/faostat>>. Acesso em: 21 jan. 2010.

FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. 86 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Experiências em escala de laboratório para determinar a influência da idade, umidade e temperatura de carbonização sobre propriedades do carvão**. Belo Horizonte, 1979. 143 p.

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

GOMES, A. F. **Avaliação das características da madeira e da polpa de Eucalyptus mediante a aplicação de métodos não destrutivos na árvore viva**. 2007. 124 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

GÓMEZ, E. O.; SEYE, O.; CORTEZ, L. A. B. Estudo cinético da biomassa a partir de resultados termogravimétricos. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2000, Campinas. **Anais...** Campinas: BICCA Produções, 2000. 1 CD-ROM.

GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C.; SILVA, C. M. Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de *Eucalyptus* do Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 1, p. 129-137, jan./fev. 2005.

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.

GONÇALVES, C. A. Celulose e carvão vegetal de Mimosa Caesalpinifolia Benthana (Sabiá). **Revista Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 6, n. 1, p. 51-58, 1999.

GONZÁLEZ-VILA, F. J.; ALMENDROS, G.; RÍO, J. C. del; MARTIN, F.; GUTIÉRREZ, A.; ROMERO, J. Ease of delignification assessment of wood from different *Eucalyptus* species by pyrolysis (TMAG)-GC/MS and CP/MAS ¹³C-NMR spectrometry. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, New York, v. 49, n. 8, p. 295-305, Feb. 1999.

GUTIÉRREZ, A.; RODRÍGUEZ, I. M.; RÍO, J. C. del. Chemical characterization of lignin fractions in industrial hemp bast fibers used for manufacturing high-quality paper pulps. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 54, n. 12, p. 2138-2144, Mar. 2006.

HOWARD, E. T. Heat of combustion of various southern pine materials. **Wood Science**, London, v. 5, n. 3, p. 194-197, 1973.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **A siderurgia em números**. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <<http://www.ibs.org.br>>. Acesso em: 27 jan. 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Tabela 289**: quantidade produzida na extração vegetal por tipo de produto extrativo. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?z=t&c=289>>. Acesso em: 4 ago. 2006a.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Tabela 291**: quantidade produzida na silvicultura por tipo de produto da silvicultura. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?z=t&c=291>>. Acesso em: 2 ago. 2006b.

KIFANI-SAHBAN, F.; BELKBIR, L.; ZOULALIAN, A. Étude de la pirólise lente de l'Eucalyptus marocain par analyse thermique. **Thermochemica Acta**, Amsterdam, v. 284, n. 2, p. 341-349, Mar. 1996.

KLOCK, U.; MUNIZ, G. I. B.; HERNANDEZ, J. A.; ANDRADE, A. S. **Química da madeira**. 3. ed. Curitiba: UFPR, 2005. 86 p.

LATORRE, F. L.; HENRIQUES, E. P. Melhoramento genético do eucalipto visando a produção de carvão vegetal para siderurgia. In: FÓRUM NACIONAL DE CARVÃO VEGETAL, 1., 2008, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Painel Floresta, 2008. Disponível em: <<http://www.painelflorestal.com.br/exibeNews.php?id=1784>>. Acesso em: 31 jan. 2010.

LELLES, J. G.; SILVA, J. C. Problemas e soluções sobre rachaduras de topo de madeiras de Eucalyptus sp. nas fases de desdobro e de secagem. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 18, n. 186, p. 62-69, 1997.

LIN, S. Y.; DENCE, C. W. **Methods in lignin chemistry**. Berlin: Springer Verlag, 1992. 578 p.

LORA, E. E. da S. Perspectivas da utilização da biomassa com fins energéticos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26., 1997, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: UFPB, 1997. p. 176.

MAGALHÃES, J. R. A energia que vem da floresta. In: _____. **Biomassa: energia que vem dos trópicos em Minas Gerais**. Belo Horizonte: UFMG, 2001. p. 133-144.

MALAN, F. A. Eucalyptus improvement for lumber production. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, 1., 1995, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IPEF/IPT, 1995. p. 1-19.

MARCELO, C. R. **Determinação da relação siringila/guaiacila em ligninas de eucalyptus spp. por pirólise associada à cromatografia gasosa e à espectrometria de massas**. 2007. 63 p. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

MARTINS, H. Madeira como fonte de energia. In: PENEDO, W. R. (Ed.). **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC, 1980. v. 1, p. 9-26.

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: UFMG, 2001. p. 145-161.

MONTEIRO, M. de A. **Siderurgia na Amazônia oriental brasileira e a pressão sobre a floresta primária**. Belém: UFPA, 2005. 19 p.

MOREIRA, W. S. **Relações entre propriedades físico-mecânicas e características anatômicas e químicas da madeira**. 1999. 107 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 140 p.

OLIVEIRA, E. **Características anatômicas, químicas e térmicas da madeira de três espécies de maior ocorrência no semi-árido nordestino**. 2003. 122 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

OLIVEIRA, E. **Correlações entre parâmetros de qualidade da madeira e do carvão de *Eucalyptus grandis* (W. Hill ex Maiden)**. 1988. 47 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

OLIVEIRA, E. Efeito da qualidade da madeira sobre o rendimento e qualidade do carvão de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 13, n. 1, p. 85-97, 1989.

OLIVEIRA, J. B. de; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R. Propriedades do carvão vegetal. In: FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Carvão vegetal: destilação, carvoejamento, controle de qualidade**. Belo Horizonte, 1982. p. 112-136, 173 p.

OLIVEIRA, J. B. de; MENDES, M. G.; GOMES, P. A. Carbonização da madeira, modelo físico e influência das variáveis de processo. **Boletim da Associação Brasileira de Metais**, São Paulo, v. 40, n. 319, p. 315-319, jun. 1984.

OLIVEIRA, J. T. S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. 1997. 429 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. C. R. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira *Eucalyptus saligna* Smith. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, p. 381-385, maio/jun. 2003.

ODIA, A.; MÉSZÁROS, E.; SIMÕES, R.; QUEIROZ, J.; JAKAB, E. Pyrolysis-GC/MS and TG/MS study of mediated laccase biodelignification of *Eucalyptus globulus* kraft pulp. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, New York, v. 78, n. 2, p. 233-242, Mar. 2007.

PÁDUA, F. A. de. **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.

PALUDZYSYN FILHO, E. Melhoria do eucalipto para a produção de energia. **Revista Opiniões**, Ribeirão Preto, n. 15, jun./ago. 2008. Disponível em: <http://www.revistaopinioes.com.br/cp/edicao_materias.php?id=15>. Acesso em: 31 jan. 2010.

PASTORE, T. C. M.; OKINO, E. Y. A.; PASTORE JUNIOR, F. P. **Carbonização de madeiras da Amazônia**: parte I, floresta nacional Tapajós. Brasília: IBAMA, 1982. 12 p. (Série Técnica, 12).

PAULA, J. E. Caracterização anatômica da madeira de espécies nativas do cerrado, visando sua utilização na produção de energia. **Revista Cerne**, Lavras, v. 11, n. 1, p. 90-100, jan./mar. 2005.

PENEDO, W. R. **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC, 1980. 49 p.

PEREIRA, B. C. S. P.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. L.; ANDRADE, B. G.; CESAR, B. P. Effects of spacing in the properties of the wood and charcoal of eucalyptus clones from energetic forests. In: CONGRESSO MUNDIAL FLORESTAL, 1., 2009, Buenos Aires. **Anais...** Buenos Aires: Forests in Development a Vital Balance, 2009. p. 126-135.

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

PILÓ-VELOSO, D.; NASCIMENTO, E. A.; MORAIS, S. A. L. Isolamento e análise estrutural de ligninas. **Química Nova**, São Paulo, v. 16, n. 5, p. 435-448, set./out. 1993.

RAAD, T. J. **Drying process simulation and Eucalyptus ssp carbonization**. 2004. 114 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

RAVEENDRAN, K.; GANESH, A.; KHILAR, K. C. Pyrolysis characteristics of biomass and biomass components. **Fuel**, London, v. 75, n. 8, p. 987-998, 1996.

RESENDE, D. J. **Análise da combustão e carbonização do Eucalyptus spp por termogravimetria**. 1995. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

RÍO, J. C. del; GUTIÉRREZ, A.; MARTÍNEZ, M. J.; MARTÍNEZ, A. T. Py-GC/MS study of *Eucalyptus globulus* wood treated with different fungi. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, New York, v. 58/59, n. 1, p. 441-452, Apr. 2001.

ROCHA, M. P.; KLITZKE, R. J. **Energia da madeira**. Curitiba: FUPEF, 1998. 86 p. (Série Didática).

ROWELL, R. M. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC, 2005. 487 p.

RUY, O. F.; TOMAZELLO FILHO, M.; FERREIRA, M. Qualidade da madeira de grupos fenotípicos de clones de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 60, p. 21-27, mar. 2001.

SALO, S.; NIEMELÄ, S.; ELOMAA, M.; LINDBERG, J. J. Identification of lignins by pyrolysis methods. **Holzforschung**, Berlin, v. 43, n. 4, p. 257-260, 1989.

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

SCHUMACHER, M. V.; POGGIANI, F. Produção de biomassa e remoção de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus camaldulensis* DEHNH, *Eucalyptus grandis* HILL ex MAIDEN e *Eucalyptus torelliana* f. MUELL, plantados em Anhembi, SP. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 3, n. 1, p. 9-18, jan./abr. 1993.

SÈYE, O. **Influência da temperatura de carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus***. 1998. 79 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SILOCHI, P. S. A crise era passageira. **Revista Opiniões**, Ribeirão Preto, v. 17, n. 5, set./nov. 2009. Disponível em: <<http://www.revistaopinioes.com.br/cp/materia.php?id=586>>. Acesso em: 28 dez. 2009.

SILVA, J. C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* HILL ex MAIDEN, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira**. 2001. 160 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SILVA, L. B. X.; REICHMANN NETO, F.; TOMASELLI, I. Estudo comparativo da produção de biomassa para energia entre 23 espécies florestais. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 4., 1982, Belo Horizonte. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 1983. p. 872-878.

SILVEIRA, R. L. V. A. Evaluation of the nutritional status of Eucalypts: visual and foliar diagnosis and their interpretation. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Forest nutrition and fertilization**. Piracicaba: IPEF, 2004. p. 85-111.

SINDICATO NACIONAL DOS PRODUTORES DE FERRO-GUSA. **Produtores de ferro-gusa no Brasil**. Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <http://www.sindifer.com.br/Anuario_2007.html>. Acesso em: 5 jan. 2010.

SINDICATO NACIONAL DOS PRODUTORES DE FERRO-GUSA. **Dados históricos e estatísticos**. Belo Horizonte, 2008. 12 p.

SYRED, C.; GRIFFITHS, A. J.; SYRED, N.; BEEDIE, D.; JAMES, D. A. Clean, efficient system for producing charcoal, heat and power (CHaP). **Fuel**, London, v. 85, n. 10, p. 1566-1578, July 2006.

TAPPI TECHNICAL DIVISIONS AND COMMITTEES. **TAPPI test methods**. Atlanta, 1998. 46 p.

TOMAZELLO FILHO, M. **Estrutura anatômica de oito espécies de eucalipto cultivadas no Brasil**. Piracicaba: IPEF, 1985. 31 p.

TRUGILHO, P. F. **Aplicação de algumas técnicas multivariadas na avaliação da qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus***. 1995. 160 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Revista Cerne**, Lavras, v. 2, n. 1, p. 1-15, jan./jun. 1996.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; LINO, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Revista Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 114-201, jul./dez. 2001.

TSOUMIS, G. **Science and technology of wood**: atruture, proprieties, utilization. New York: V.N. Reinold, 1991. 494 p.

UCEDA, C. M. Determinación del poder calorífico de 20 especies forestales de La Amazonia Peruana. **Revista Forestal del Perú**, Lima, v. 12, n. 1/2, p. 98-112, 1984.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. Departamento de Engenharia Mecânica. **Combustíveis sólidos: madeira**. Belo Horizonte, 2010. Disponível em:
<<http://www.demec.ufmg.br/disciplinas/ema003/solidos/madeira/madeira.htm>>. Acesso em: 9 fev. 2010.

VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; LEÃO, A. L. **Caracterização da madeira e da casca de *Sclerolobium paniculata*, *Dalbergia miscolobium* e *Pterodon pubescens* para uso energético**. Botucatu: UNESP, 2000. 26 p.

VALE, A. T.; COSTA, A. F.; GONÇALVES, J. C.; NOGUEIRA, M. Relação entre a densidade básica da madeira, o rendimento e a qualidade do carvão vegetal de espécies do cerrado. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 25, n. 1, p. 89-95, jan./fev. 2001.

VALENTE, O. F. Carbonização de madeira de eucalipto. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 141, n. 2, p. 74-79, mar. 1986.

VÁRHEGYI, G. Aims and methods in non-isothermal reaction kinetics. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, New York, v. 79, n. 2, p. 278-288, Apr. 2007.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação de densidade da madeira**. Viçosa, MG: SIF, 1984. 21 p. (Boletim Técnico, 1).

VITAL, B. R.; JESUS, R. M. de; VALENTE, O. F. Características de crescimento de árvores e de qualidade da madeira de *Eucalyptus camaldulensis* para a produção de carvão. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, n. 47, p. 22-28, set. 1994.

VITAL, B. R.; JESUS, R. M. de; VALENTE, O. F. Efeito da constituição química e da densidade da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* na produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 10, n. 2, p. 151-160, 1987.

WALLIS, A. F. A.; WEARNE, R. H.; WRIGHT, P. J. Chemical analysis of polysaccharides in plantation eucalypt woods and pulps. **Appita Journal**, Victoria, v. 49, n. 4, p. 258-262, 1996.

ZANETTI, E. **Certificação e manejo de florestas nativas brasileiras**. Curitiba: Juruá, 2007. 376 p.

ZOBEL, B. Silvicultural effects on wood properties. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, Piracicaba, v. 2, n. 6, p. 31-38, jul. 1992.

ANEXOS

ANEXO A	Página
TABELA 1A Correlações entre as propriedades da madeira e a do carvão, independente do material genético avaliado.	124
FIGURA 1A Ajustes de regressões equivalentes às correlações significativas entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão avaliados para o clone um (1).	125
FIGURA 2B Ajustes de regressões equivalentes às correlações significativas entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão avaliados para o clone dois (2).	132
FIGURA 3B Ajustes de regressões equivalentes às correlações significativas entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão avaliados para o clone três (3).	137
FIGURA 4B Ajustes de regressões equivalentes às correlações significativas entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão avaliados para o clone quatro (4).	143
FIGURA 5B Ajustes de regressões equivalentes às correlações significativas entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão avaliados, independente do material genético.	147

TABELA 1A Correlações entre as propriedades da madeira e a do carvão, independente do material genético avaliado.

Todos os clones	PCS MAD	EXTR	LIG	HOLO	DB	COMP	LARG	LUME	ESPES	MV	CZ	CF	DAP	PCS CV	RGCV	RGGC	RGGNC	S/G
PCS MAD	1,00	-0,26	-0,02	0,27	0,45*	0,62*	-0,24	-0,03	-0,22	-0,25	-0,13	0,28	0,48*	0,45*	0,43*	0,13	-0,32***	0,61*
EXTR		1,00	0,57*	0,05	-0,14	-0,20	0,54*	0,15	0,45*	-0,13	0,07	0,12	0,20	-0,52*	0,37**	-0,57*	0,39**	-0,42
LIG			1,00	-0,73*	-0,10	0,00	-0,44*	-0,18	-0,33	0,26	-0,09	-0,25	-0,50*	0,59*	-0,44*	0,60*	-0,39**	0,43
HOLO				1,00	0,31***	0,19	0,18	0,11	0,11	0,02	0,01	-0,02	0,51*	-0,32***	0,25	-0,43*	0,30***	-0,30
DB					1,00	-0,02	-0,63*	-0,09	-0,59*	0,16	-0,49*	-0,10	0,54*	0,59*	0,14	0,36**	-0,40**	-0,40
COMP						1,00	-0,07	-0,22	0,11	0,42*	0,21	0,40**	0,45*	-0,01	0,30	-0,11	-0,03	0,69*
LARG							1,00	0,45*	0,70*	-0,22	0,55*	0,15	-0,18	-0,79*	0,21	-0,74*	0,63*	-0,01
LUME								1,00	-0,32**	-0,01	0,26	-0,03	-0,03	-0,22	0,05	-0,11	0,09	-0,47***
ESPES									1,00	-0,23	0,38**	0,18	-0,16	-0,67*	0,19	-0,70*	0,59*	0,26
MV										1,00	-0,28	-0,99*	-0,07	0,28	-0,14	0,27	-0,20	-0,57**
CZ											1,00	0,13	0,09	-0,53*	0,29	-0,42*	0,28	0,07
CF												1,00	0,05	-0,20	0,10	-0,21	0,16	0,53**
DAP													1,00	-0,00	0,62*	-0,16	-0,11	-0,20
PCS CV														1,00	-0,10	0,76	-0,69*	0,17
RGCV															1,00	-0,15	-0,29	0,19
RGGC																1,00	-0,90*	0,21
RGGNC																	1,00	-0,28
S/G																		1,00

Correlações significativas, a 5%*, 10%** e 15%*** de probabilidade, pelo teste T.

em que (DB) densidade básica em g.cm-3, (PC mad) Poder calorífico superior da madeira em kcal.kg-1; (EXTR) teor de extrativos; (LIGN) teor de lignina; (HOLO) teor de holocelulose; (RVC) rendimento em carvão vegetal, em %; (RGC) rendimento em gases condensáveis; (RGNC) rendimento em gases não condensáveis em %; (Ucv) teor de umidade do carvão vegetal; (MV) teor de materiais voláteis; (CZ) teor de cinzas; (CF) teor de carbono fixo; (DA) densidade aparente do carvão, em g.cm-3; (PCCV) poder calorífico superior do carvão vegetal, em kcal.kg l.

Material genético 1

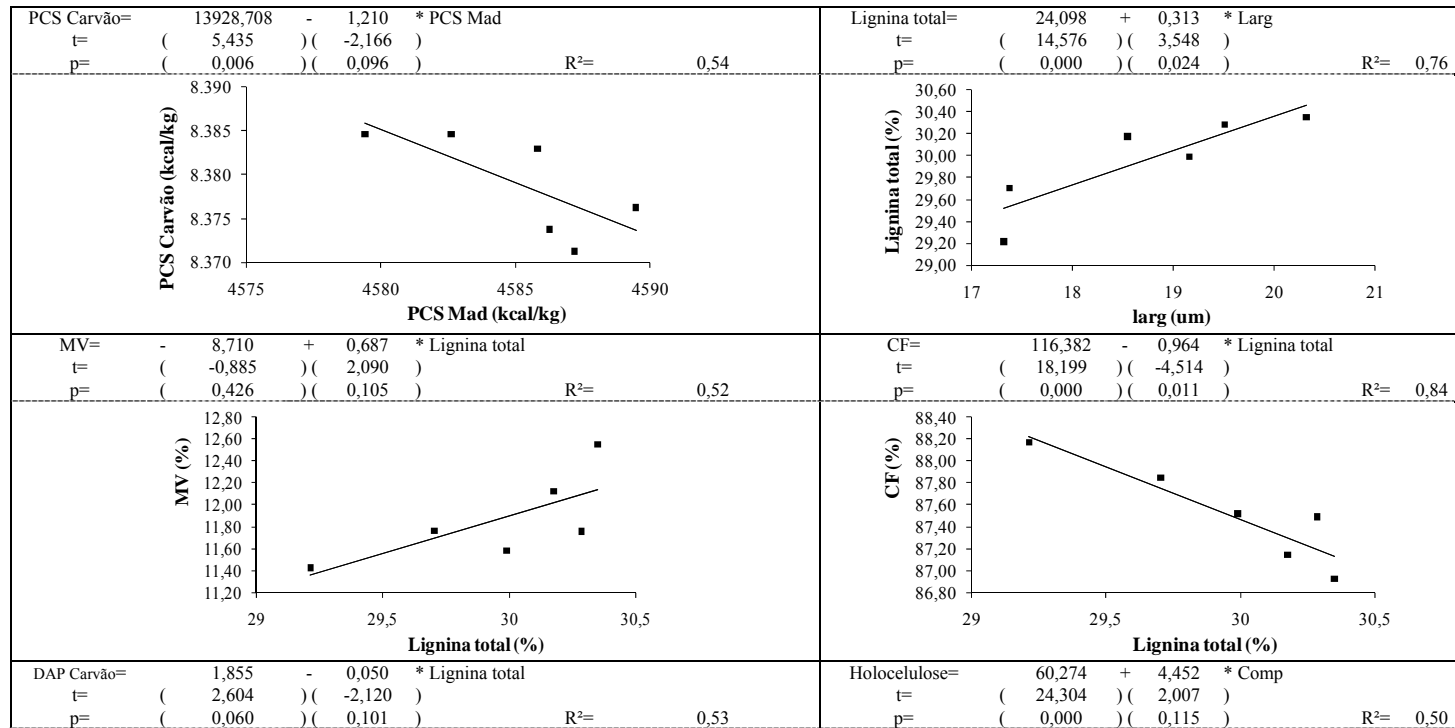


FIGURA 1A Ajustes de regressões equivalentes às correlações significativas entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão avaliados para o clone 1 (1).

(...continua...)

FIGURA 1A, Cont.

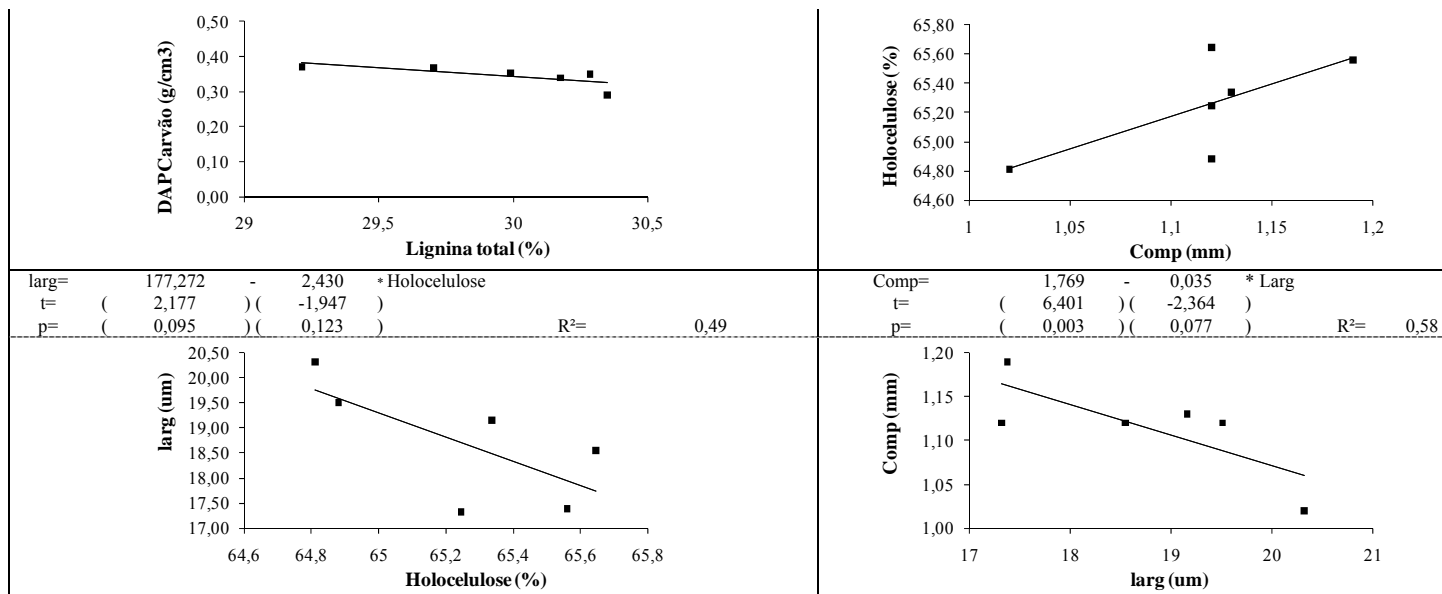


FIGURA 1A, Cont.

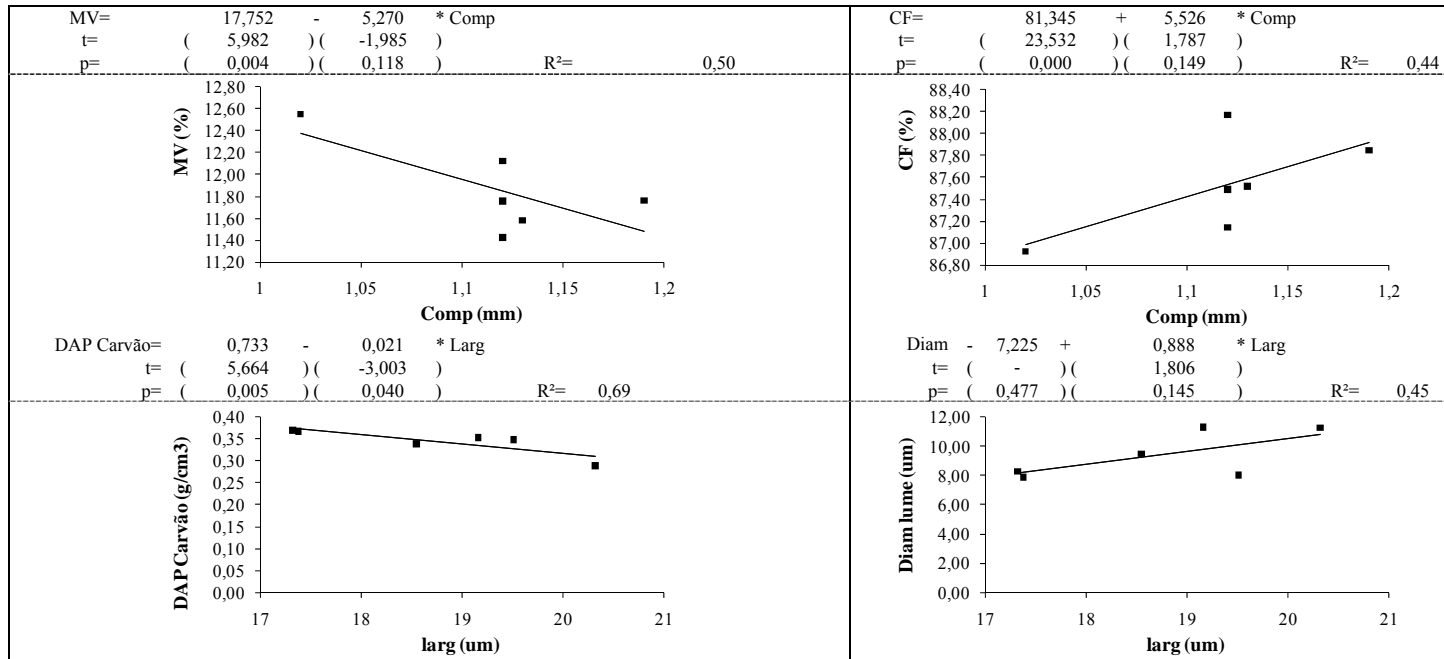


FIGURA 1A, Cont.

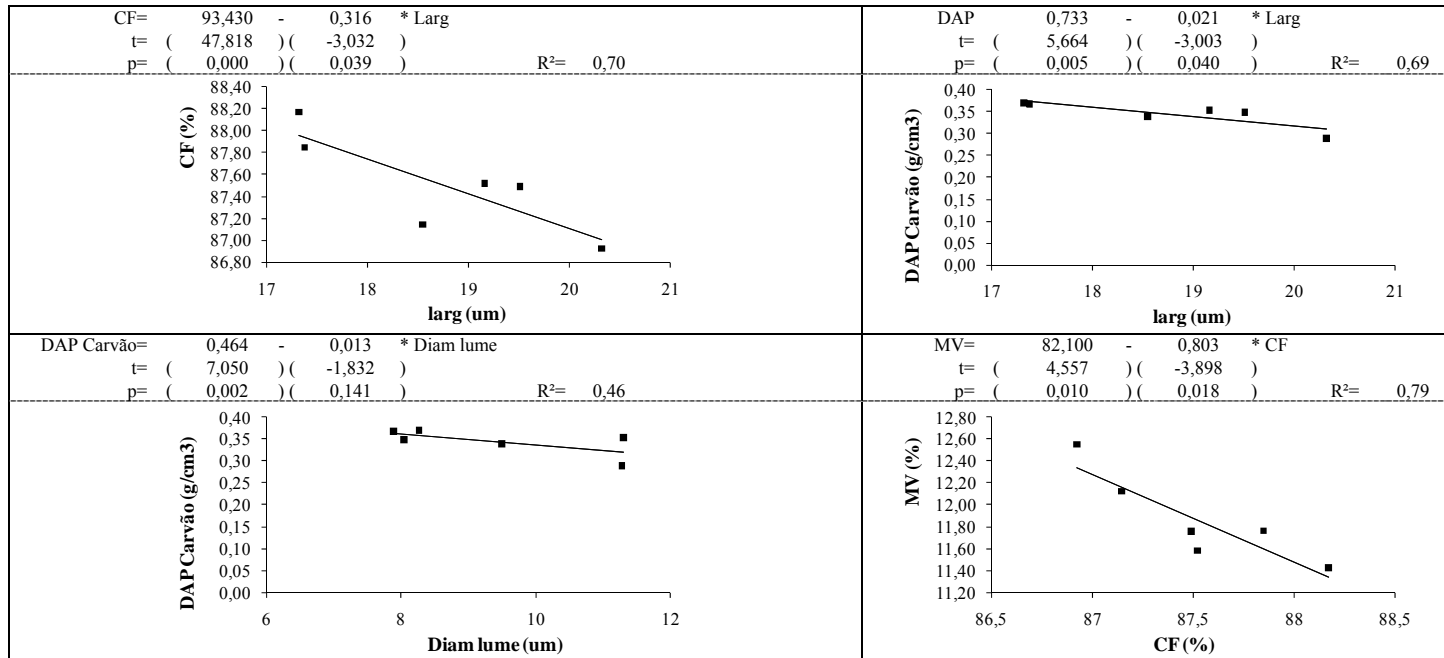


FIGURA 1A, Cont.

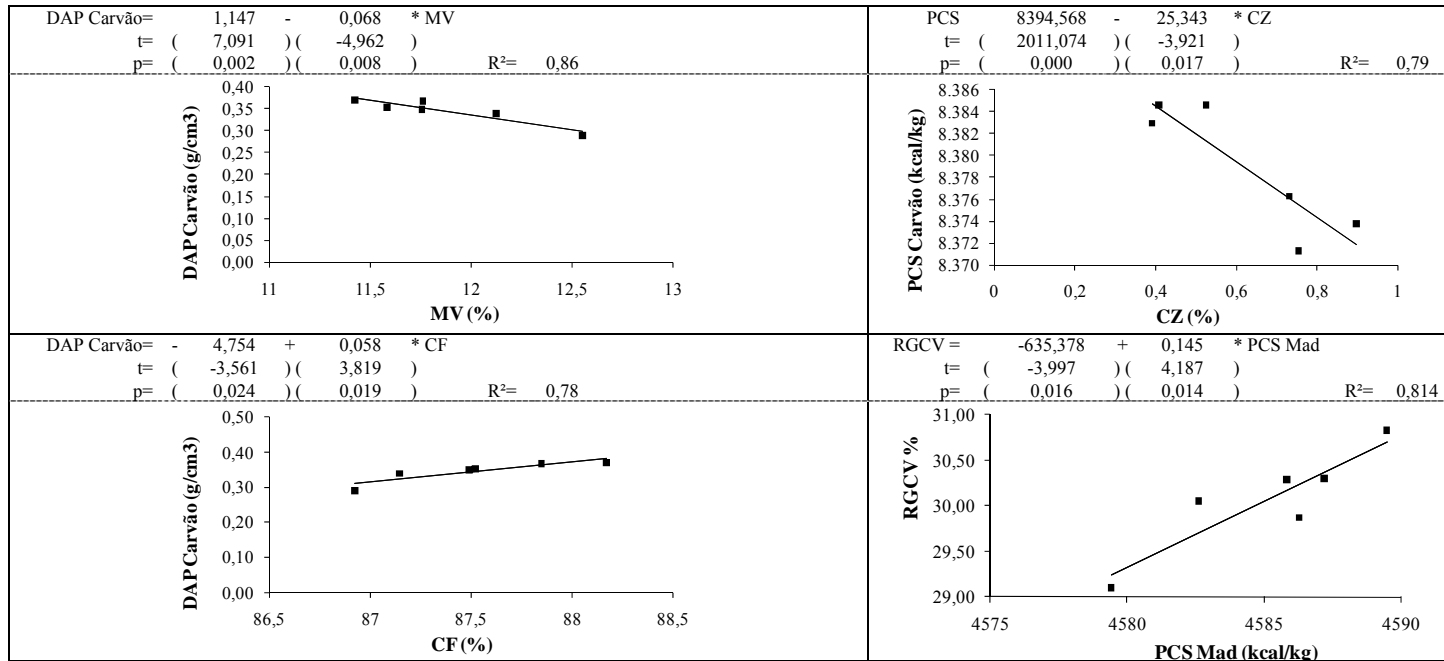


FIGURA 1A, Cont.

130

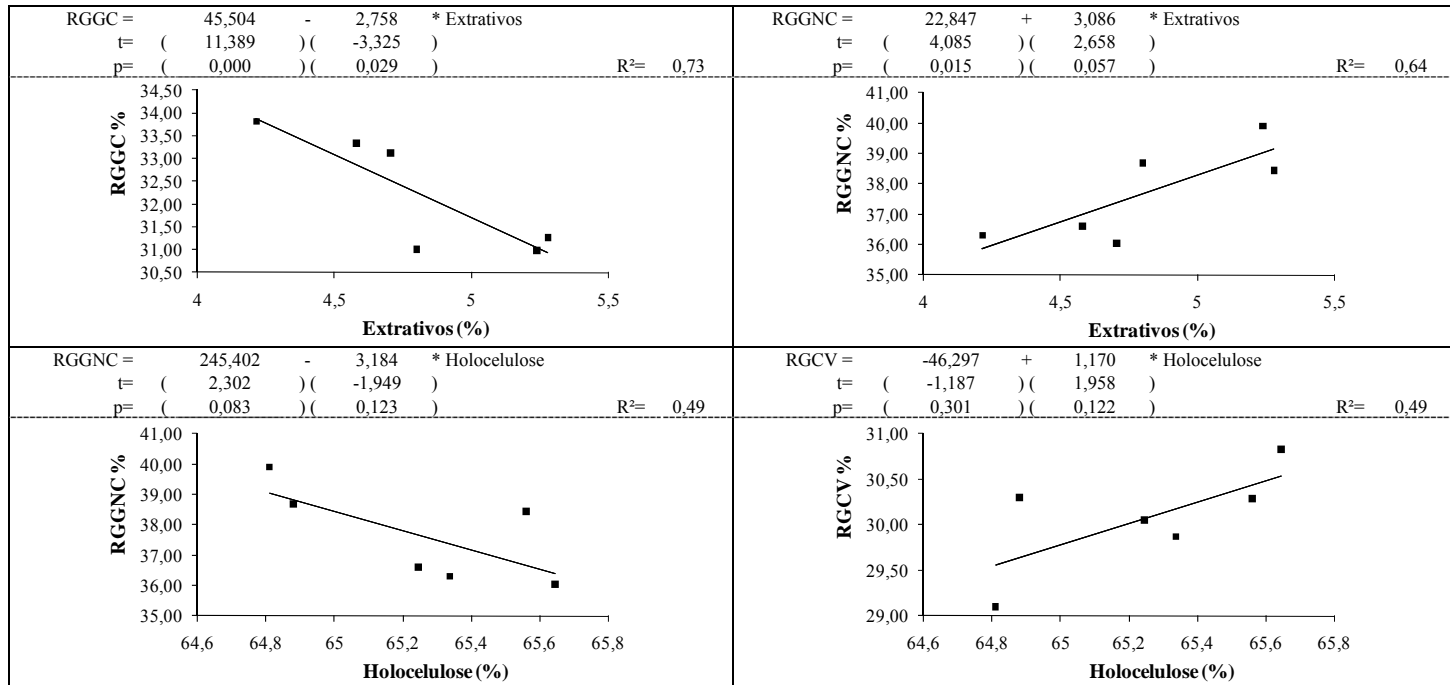
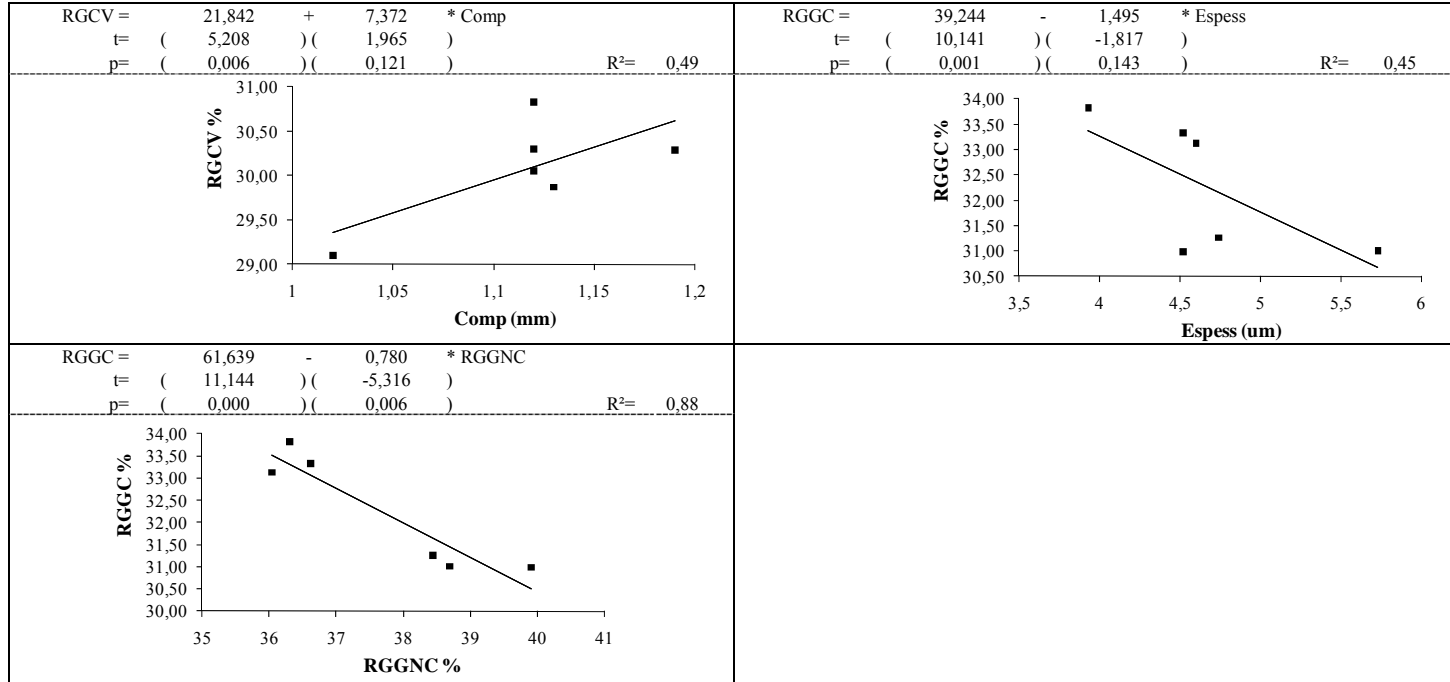


FIGURA 1A, Cont.



Material genético 2

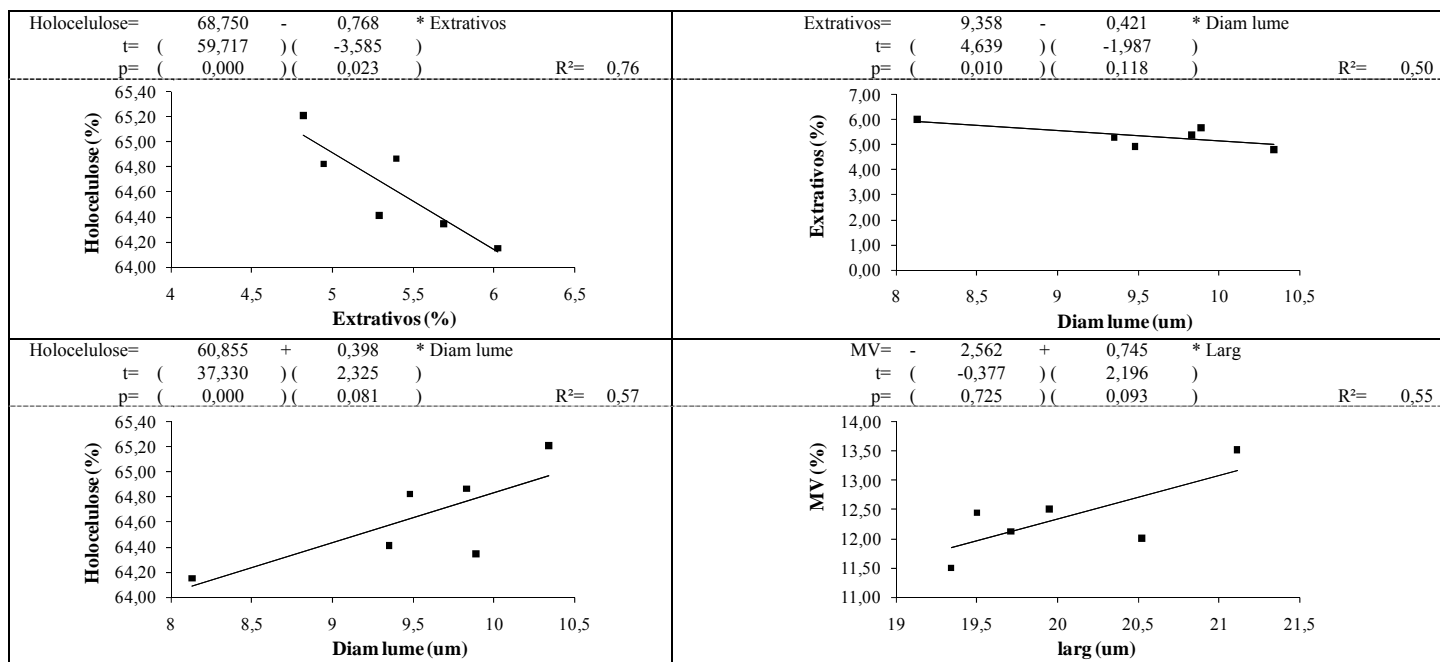


FIGURA 2B Ajustes de regressões equivalentes às correlações significativas entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão avaliados para o clone 2 (2).

(...continua...)

FIGURA 2B, Cont.

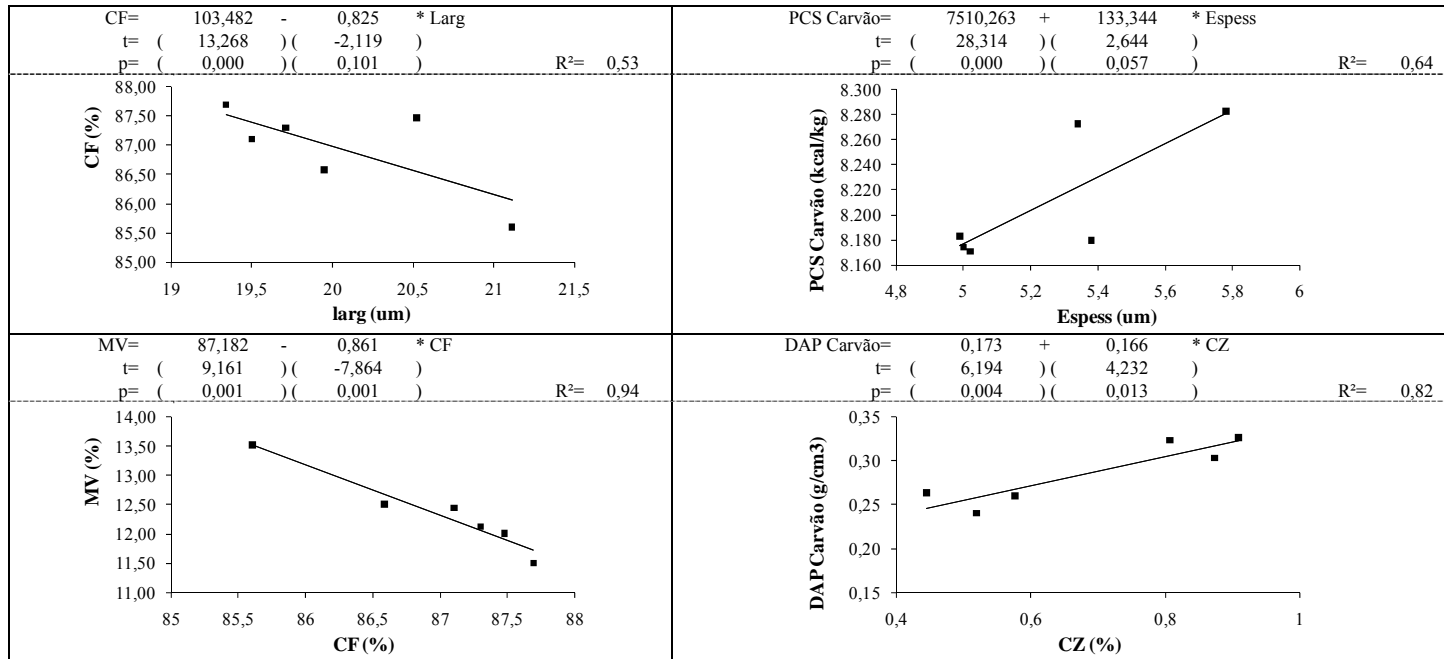


FIGURA 2B, Cont.

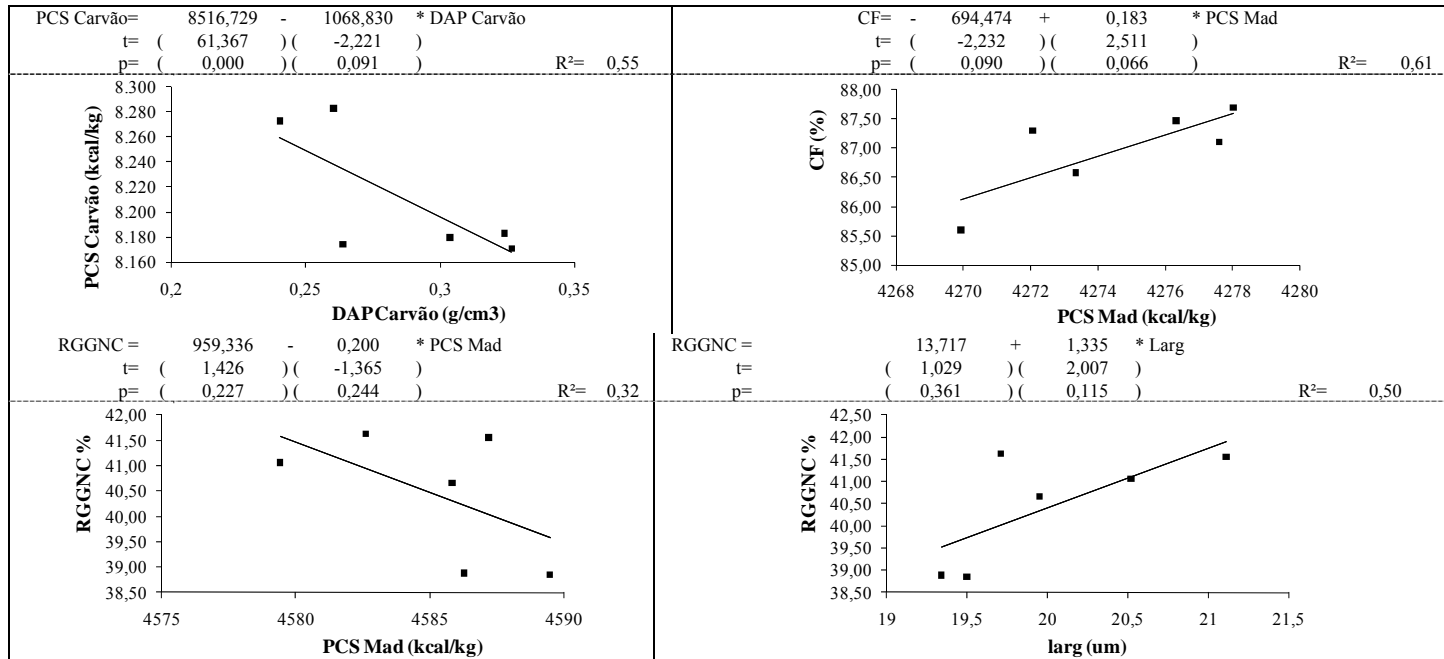


FIGURA 2B, Cont.

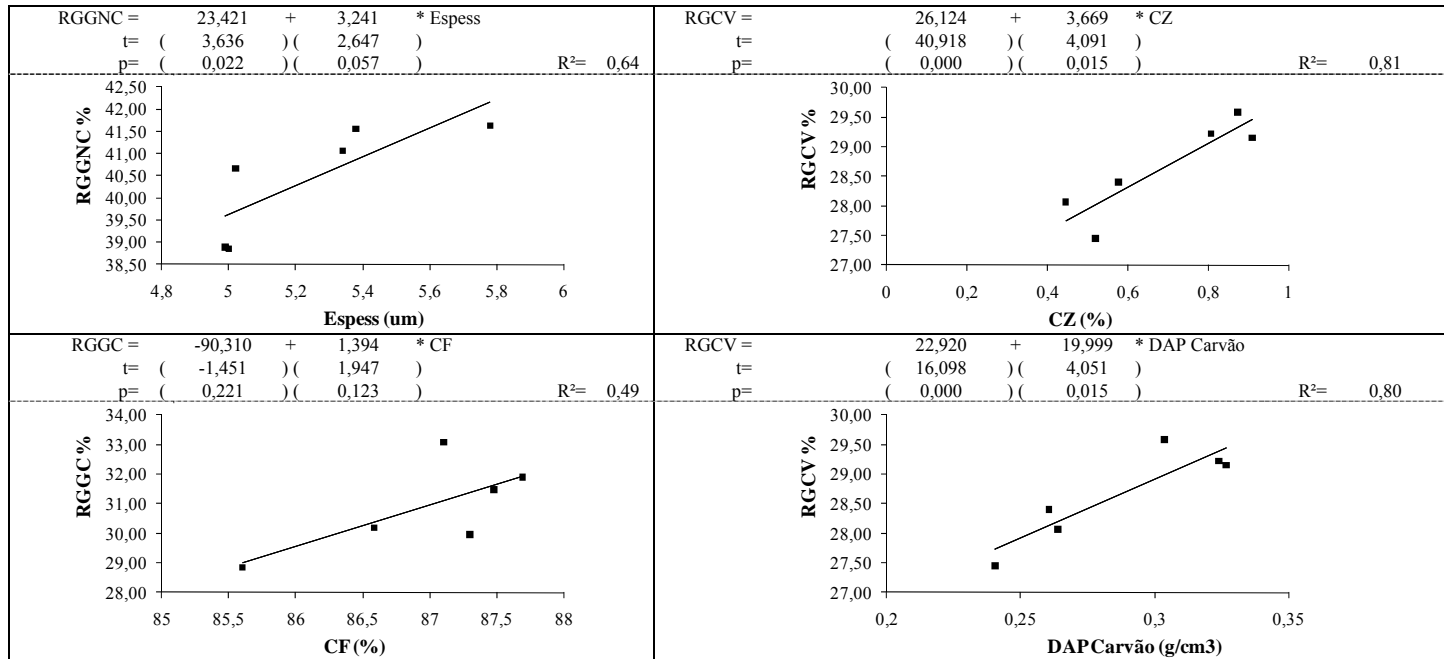
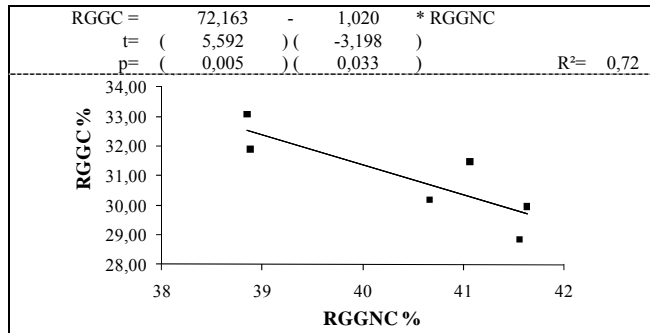


FIGURA 2B, Cont.



Material genético 3

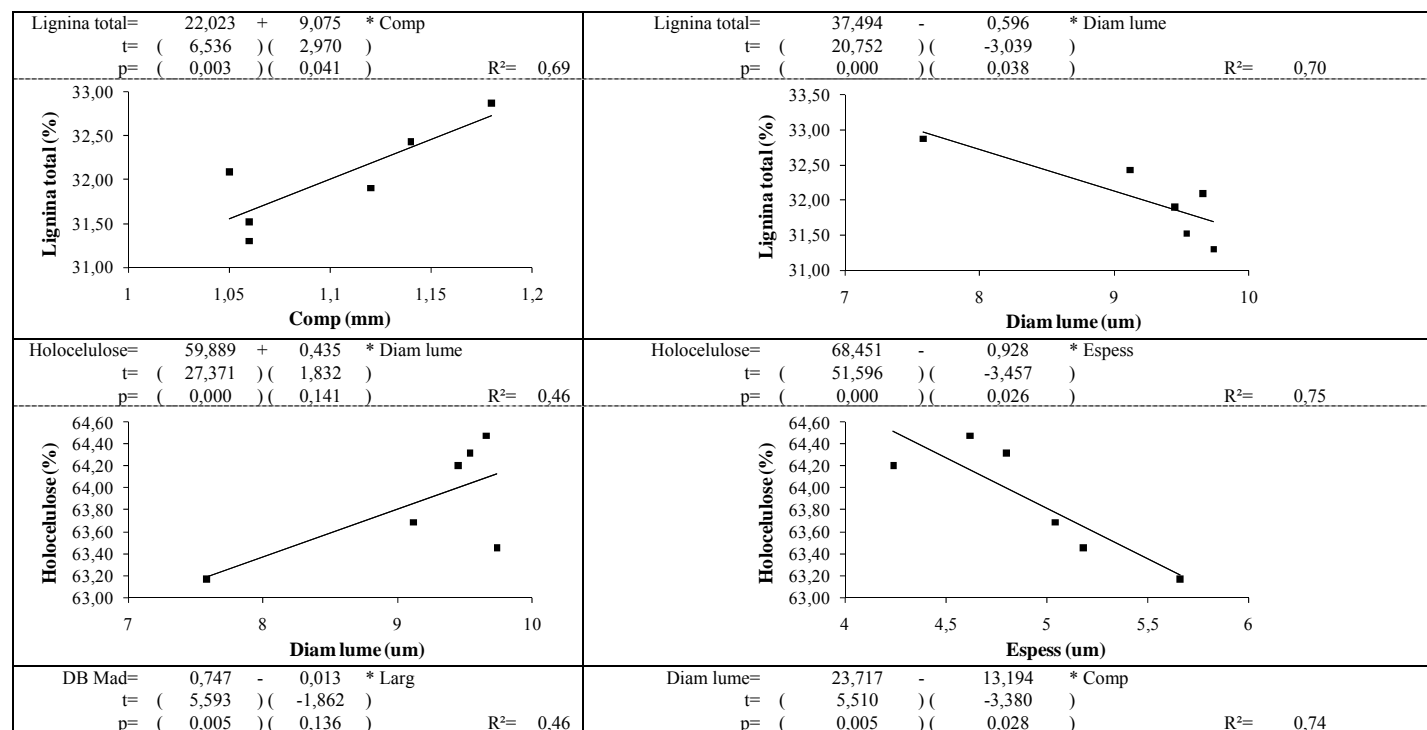


FIGURA 3B Ajustes de regressões equivalentes às correlações significativas entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão avaliados para o clone 3 (3).

(...continua...)

FIGURA 3B, Cont.

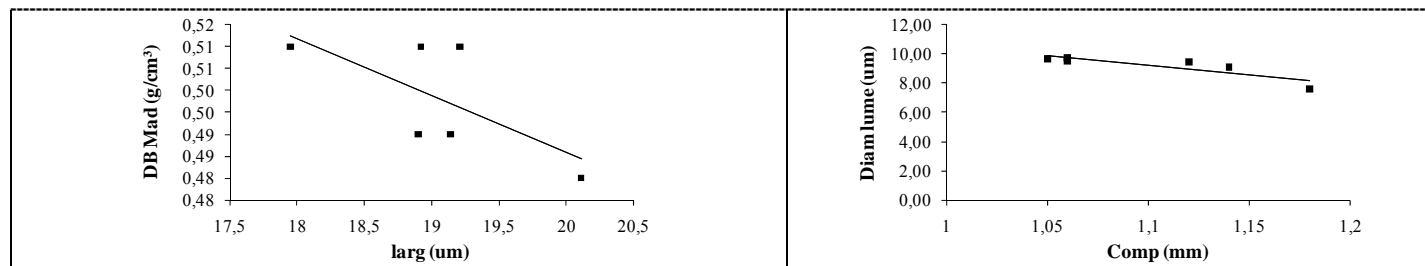


FIGURA 3B, Cont.

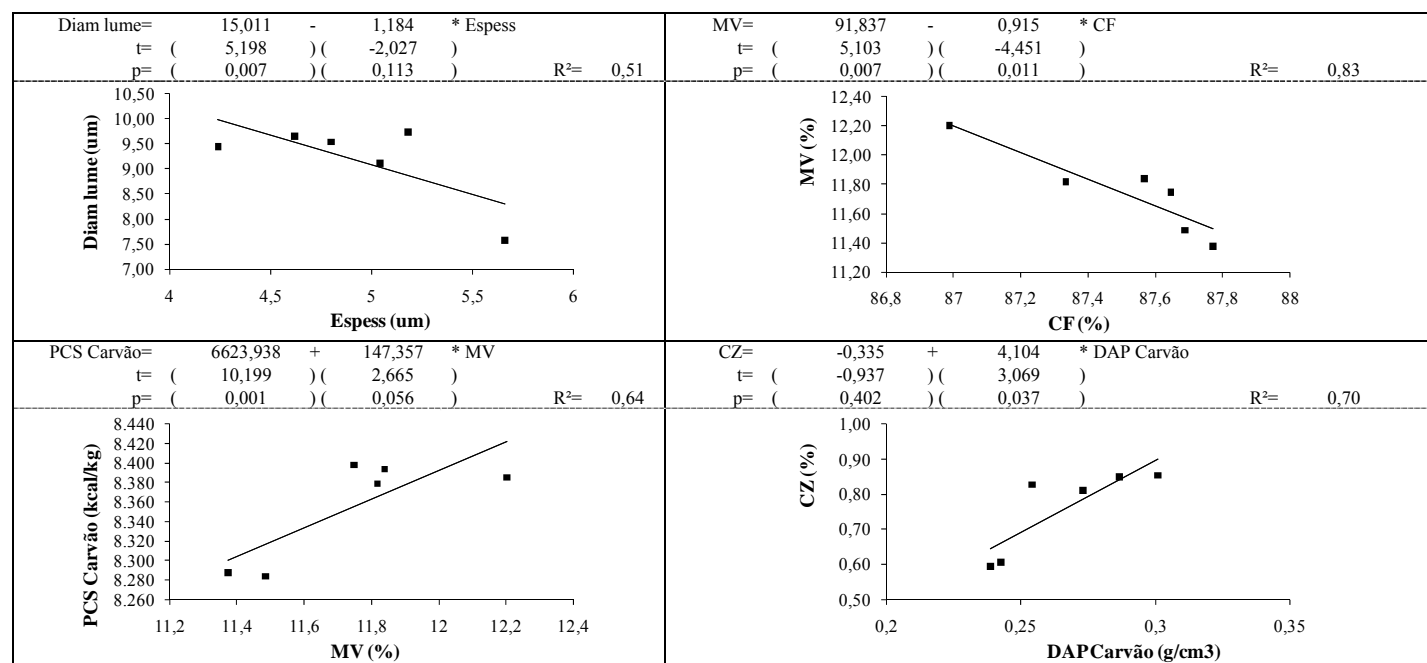


FIGURA 3B, Cont.

140

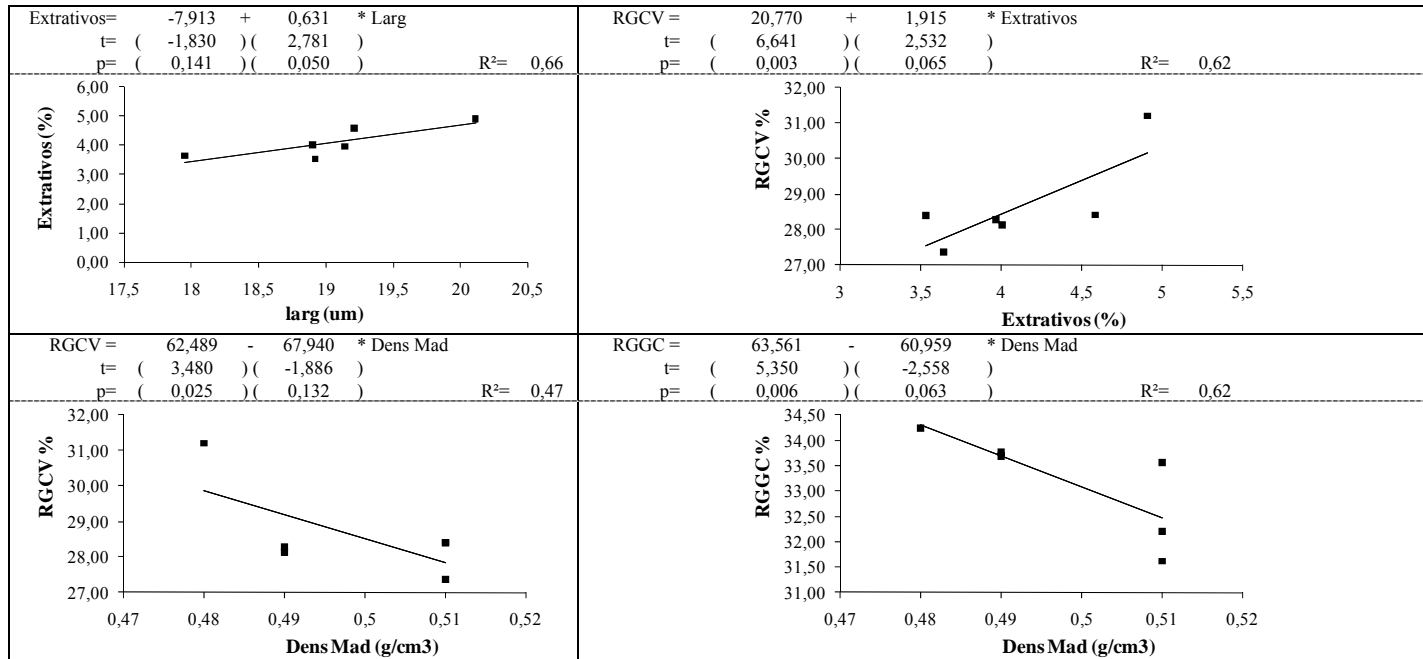


FIGURA 3B, Cont.

141

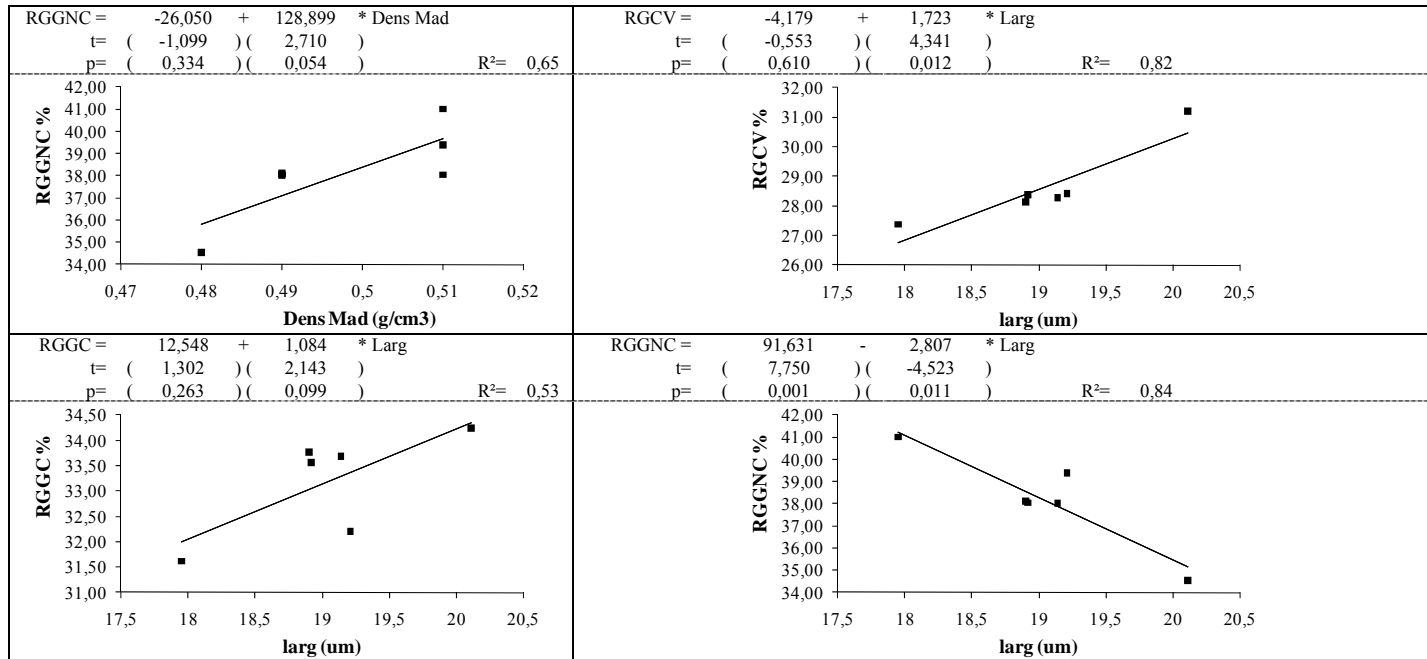
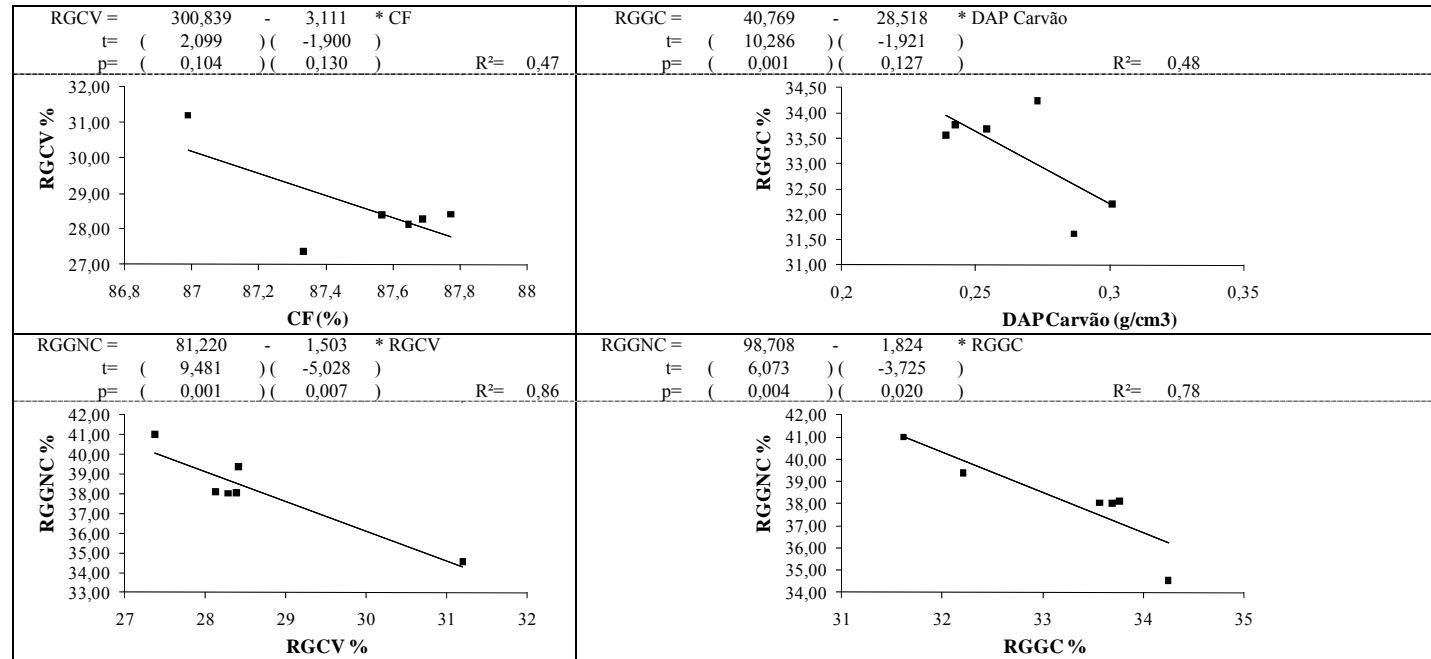
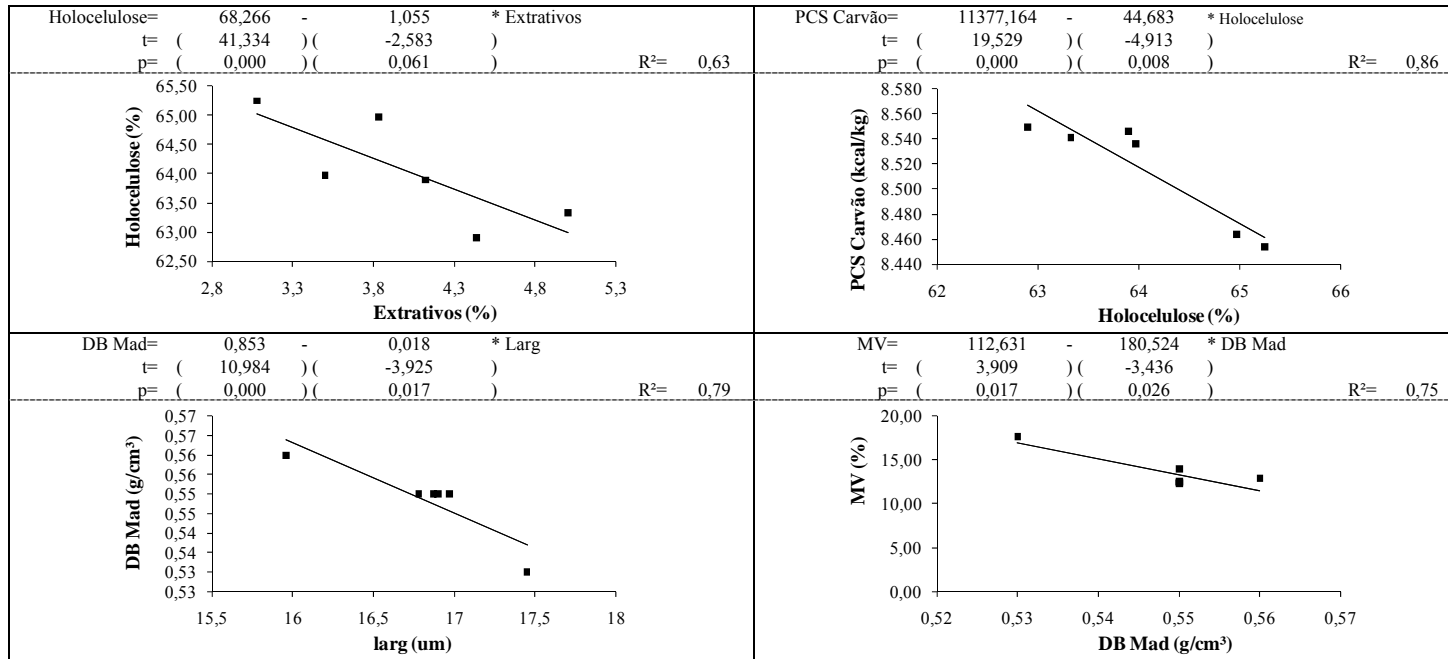


FIGURA 3B, Cont.



Material genético 4



143

FIGURA 4B Ajustes de regressões equivalentes às correlações significativas entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão avaliados para o clone 4 (4).

(...continua...)

FIGURA 4B, Cont.

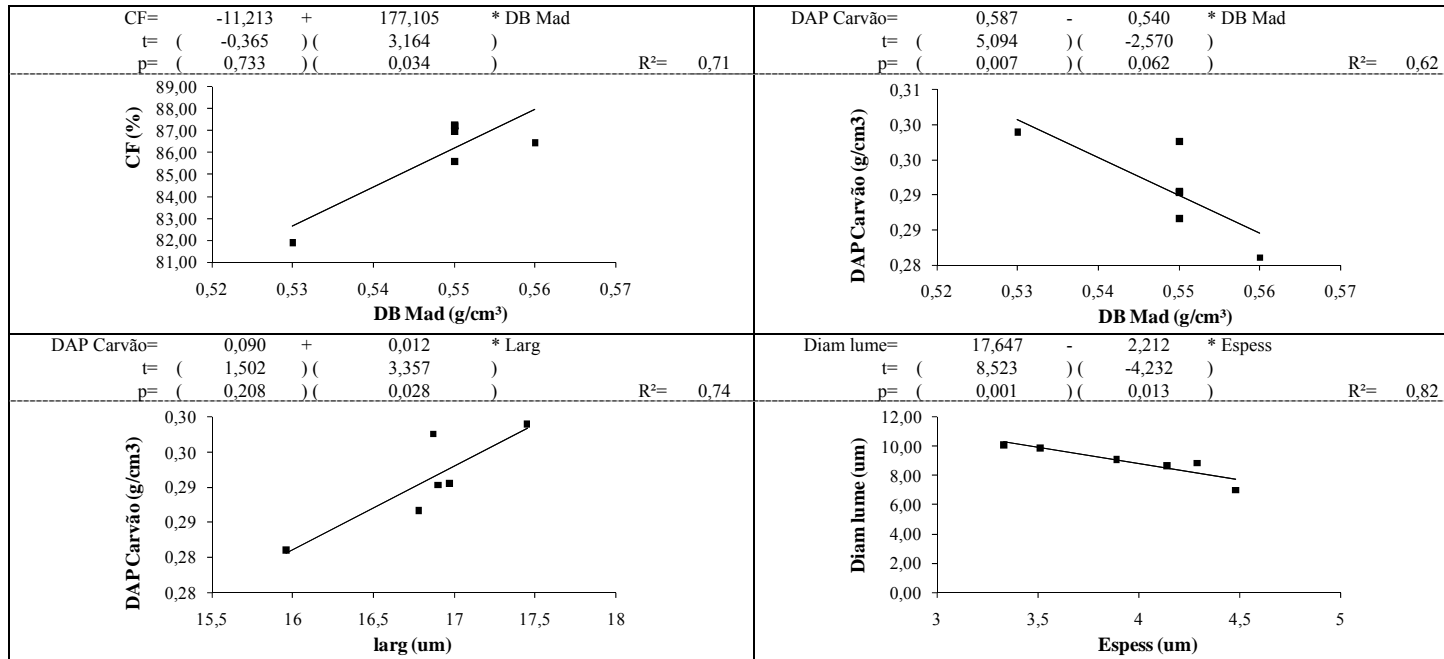


FIGURA 4B, Cont.

145

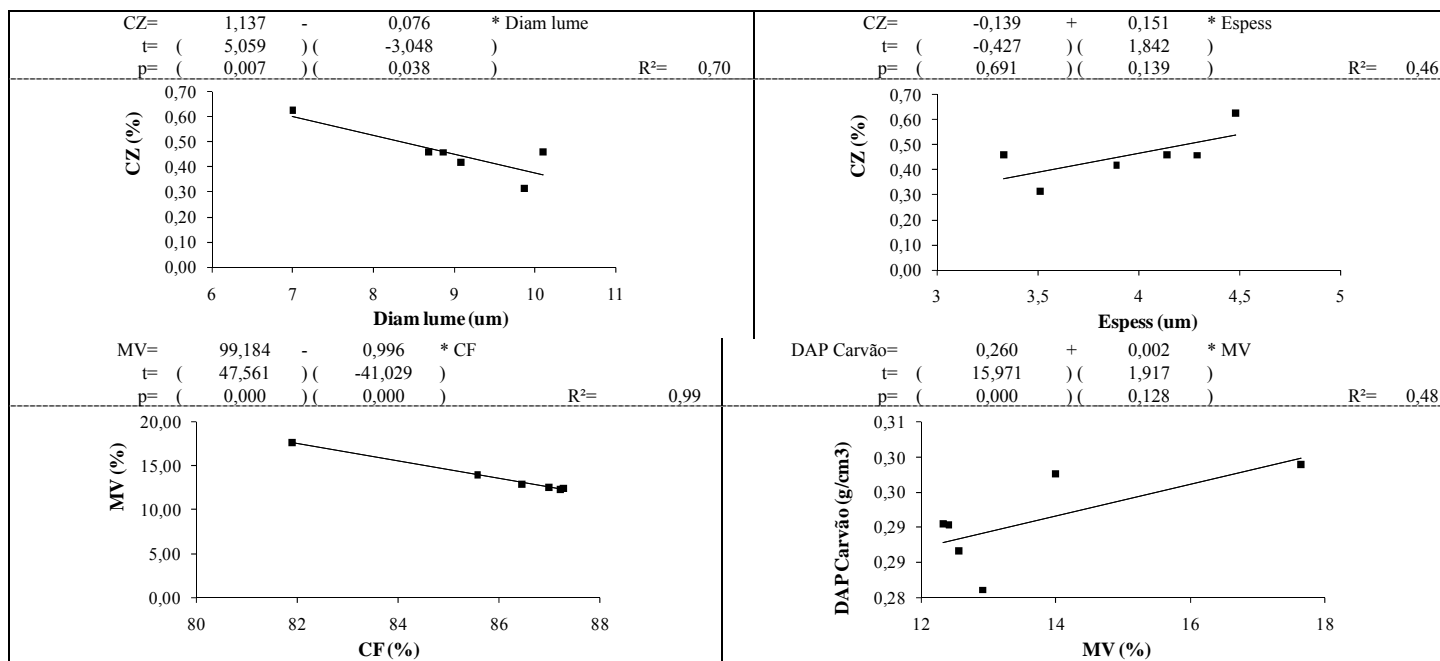
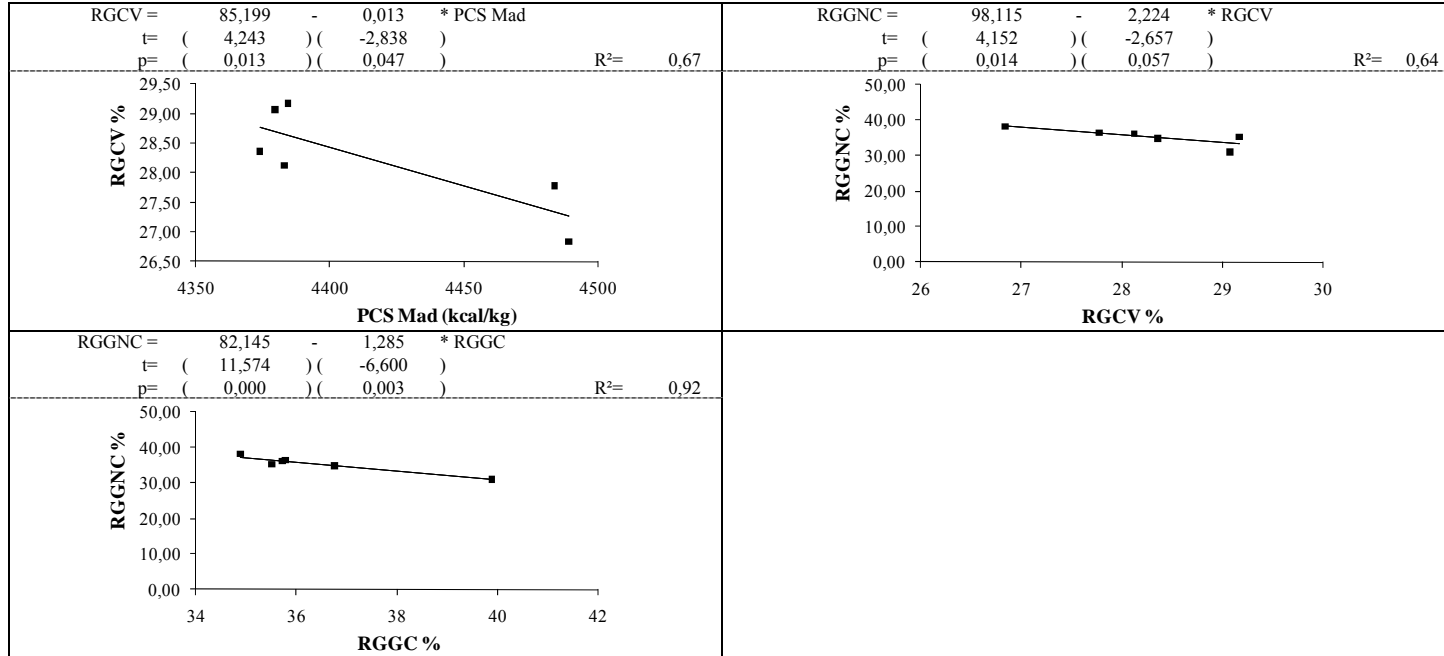
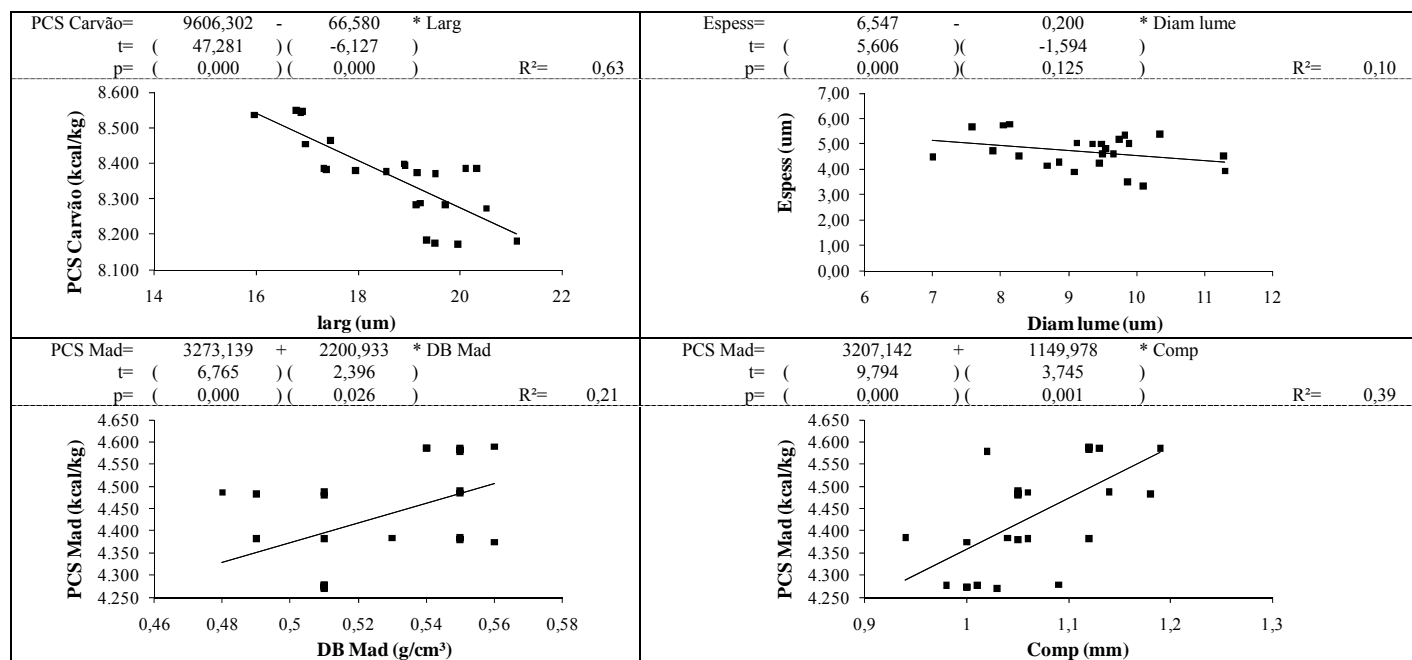


FIGURA 4B, Cont.



Correlação entre todos os clones



147

FIGURA 5B Ajustes de regressões equivalentes às correlações significativas entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão avaliados, independente do material genético.

(...continua...)

FIGURA 5B, Cont.

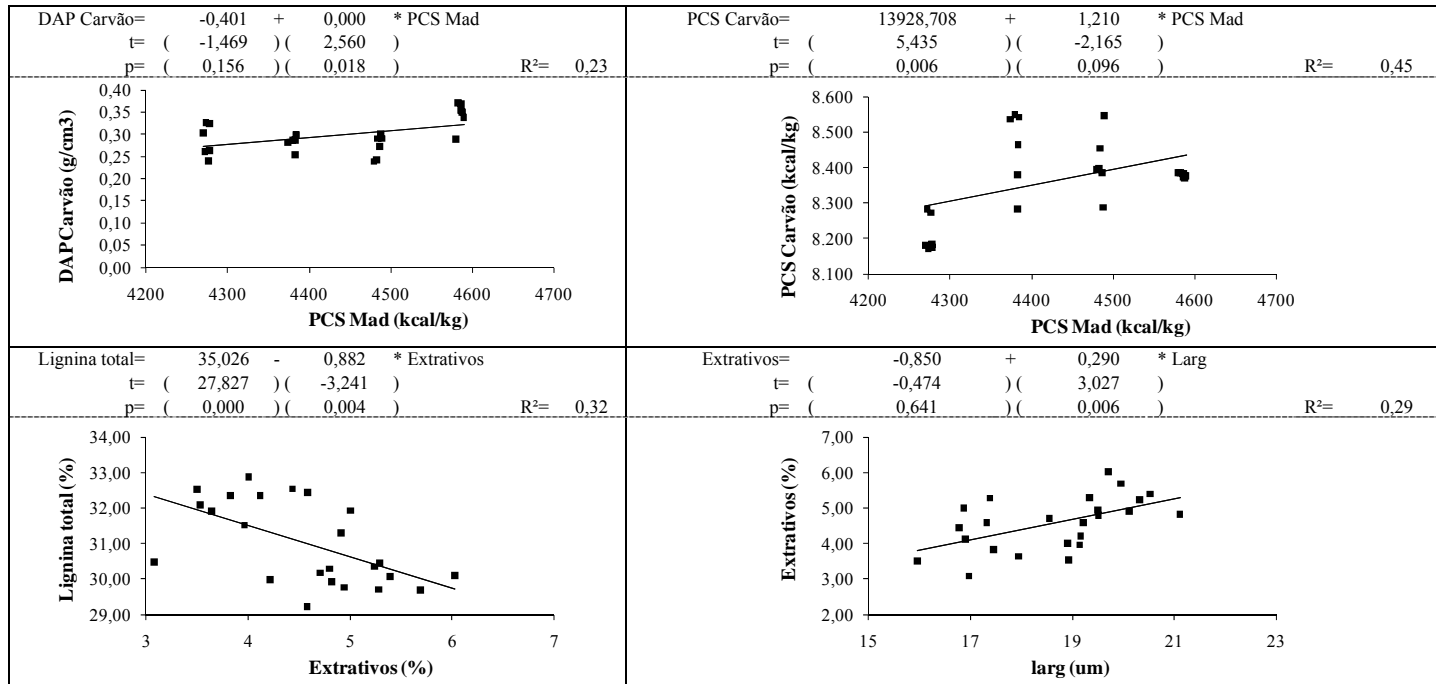


FIGURA 5B, Cont.

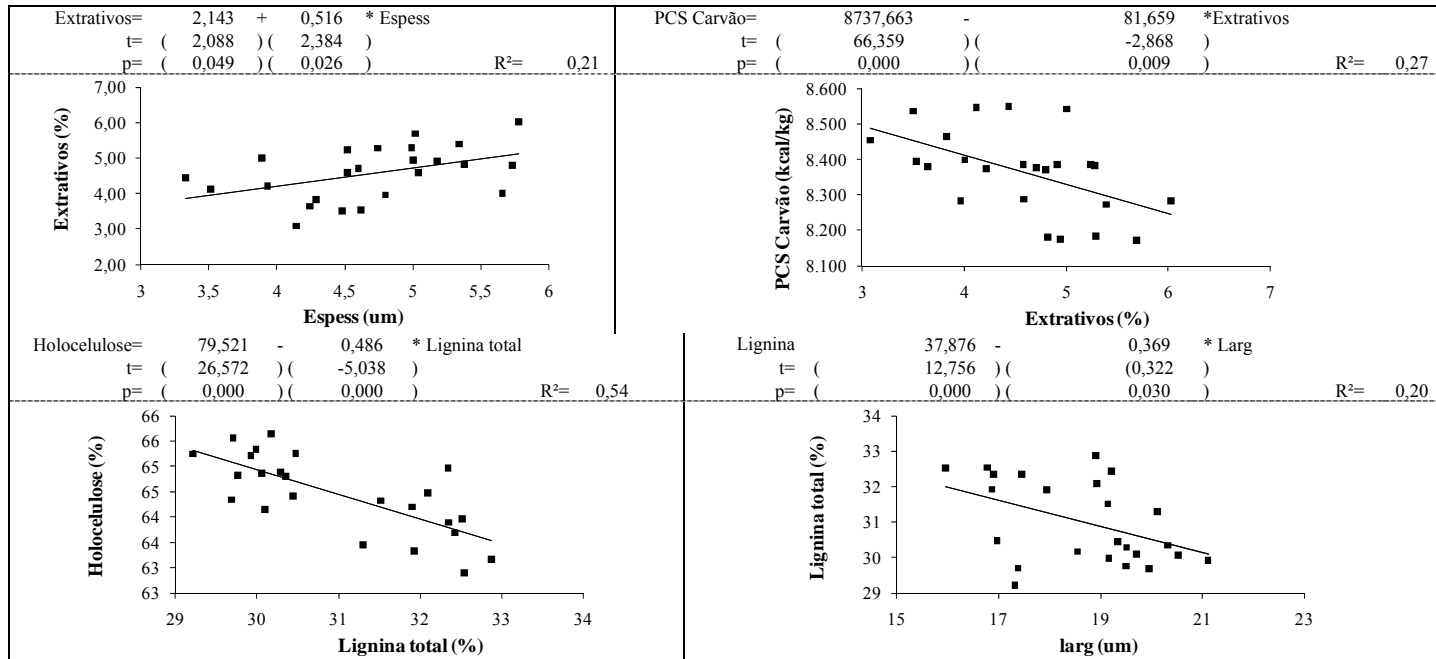


FIGURA 5B, Cont.

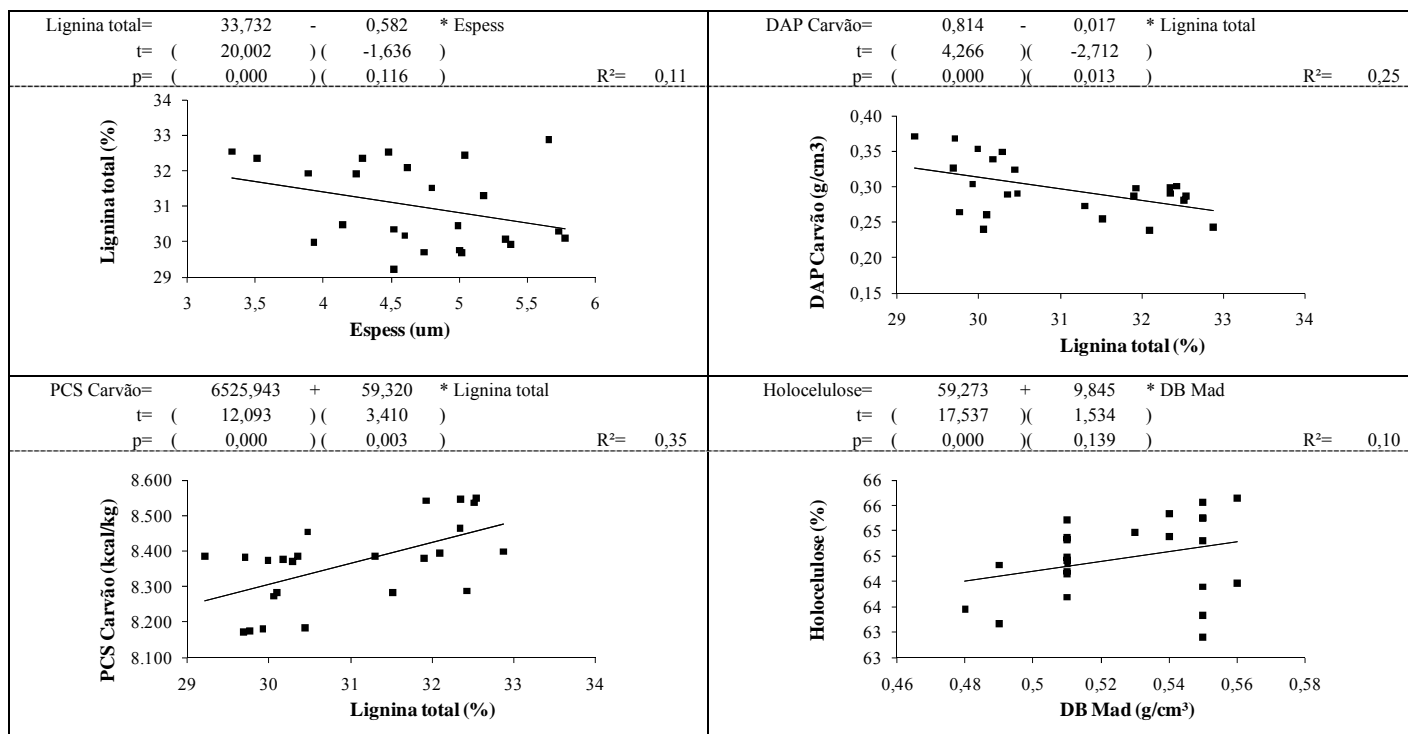


FIGURA 5B, Cont.

151

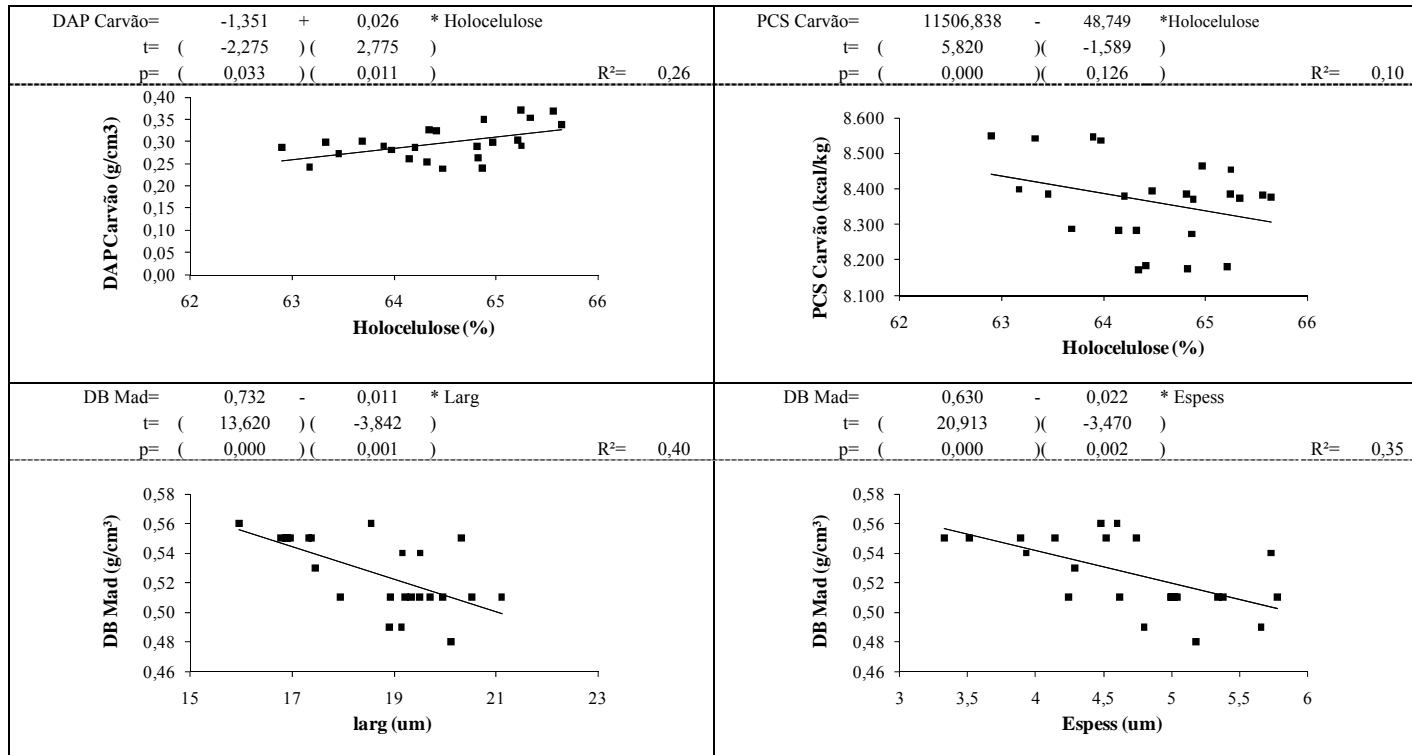


FIGURA 5B, Cont.

152

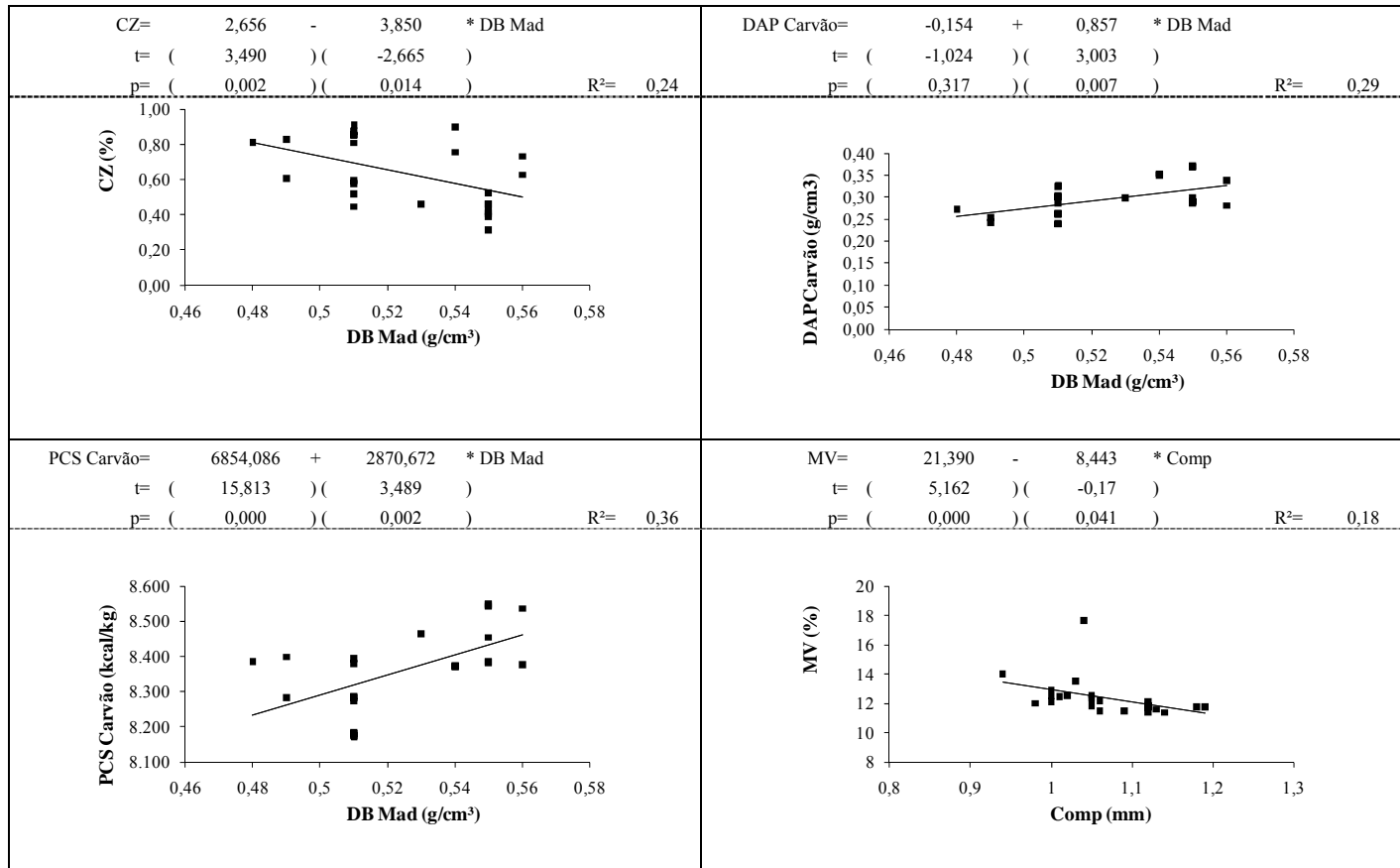


FIGURA 5B, Cont.

153

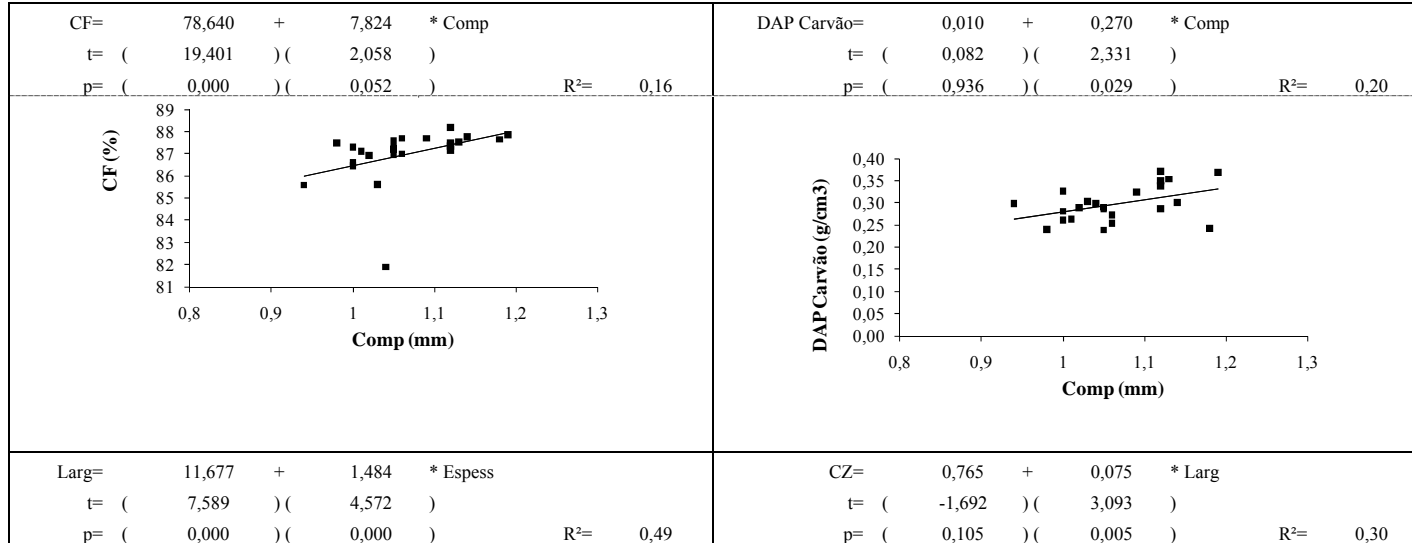


FIGURA 5B, Cont.

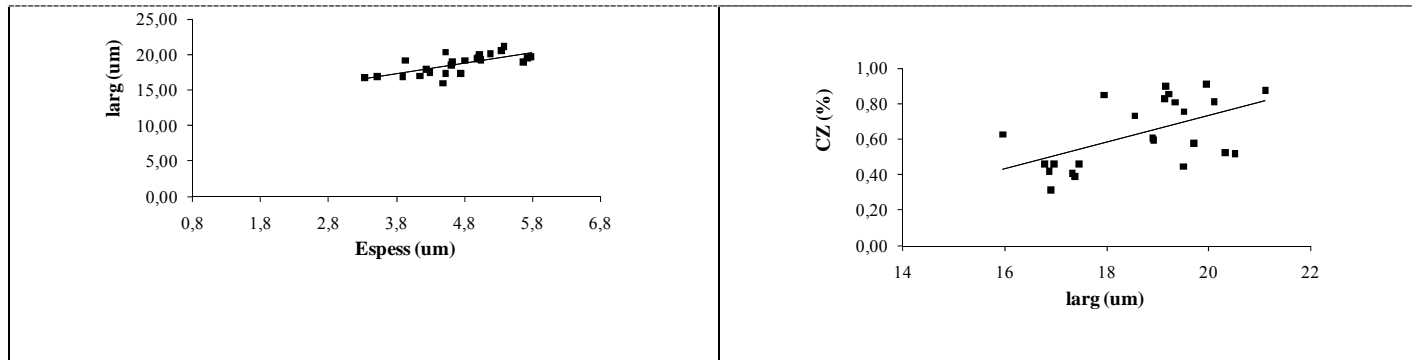


FIGURA 5B, Cont.

155

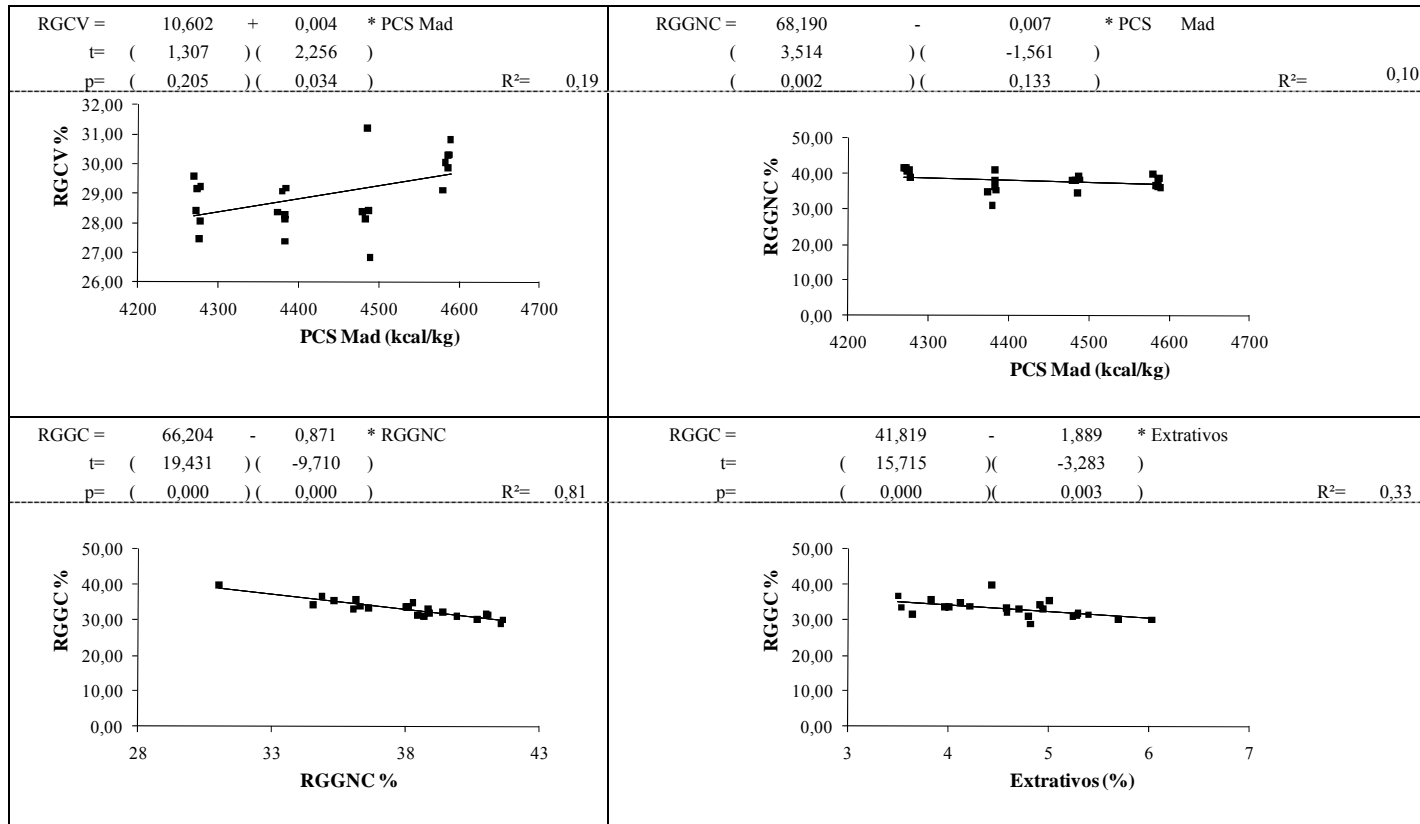


FIGURA 5B, Cont.

156

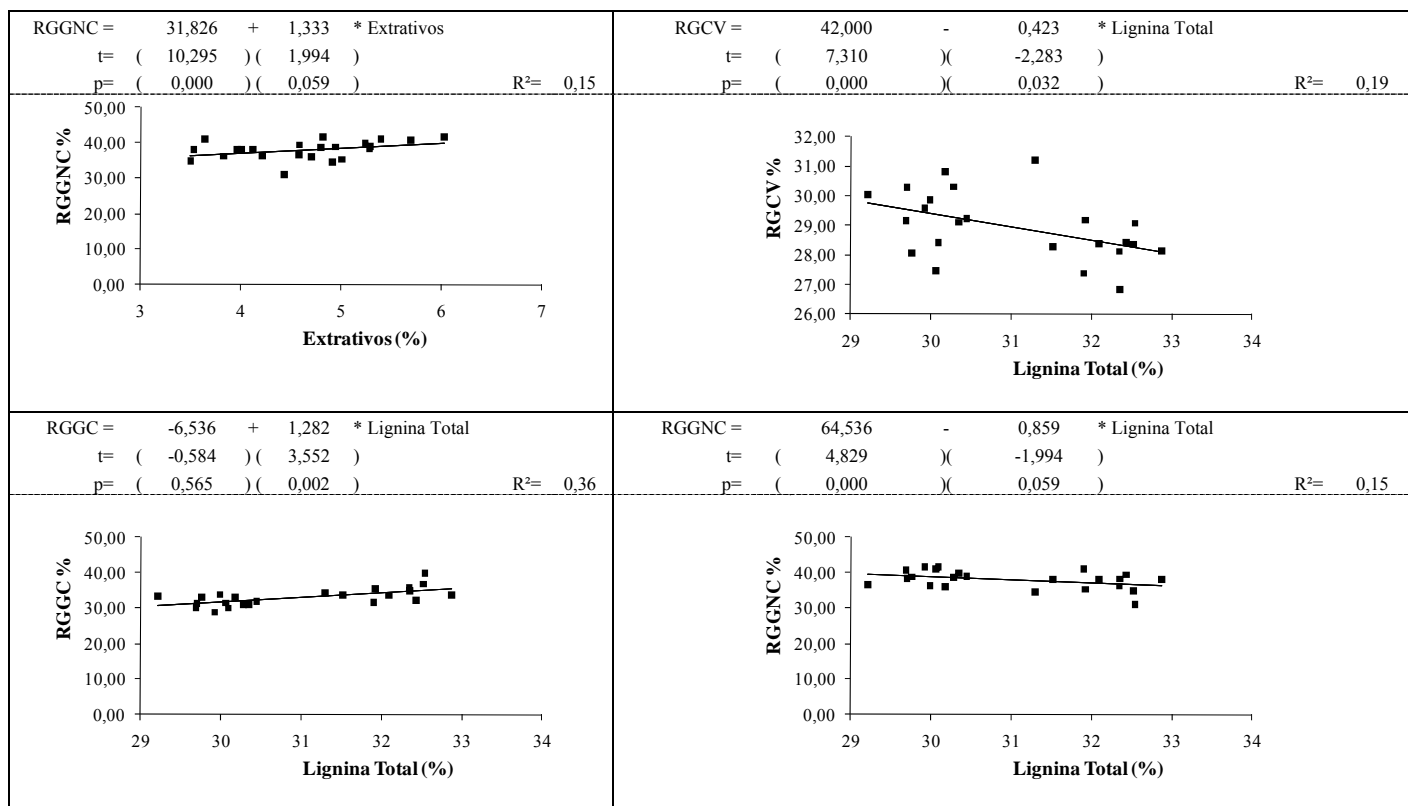


FIGURA 5B, Cont.

157

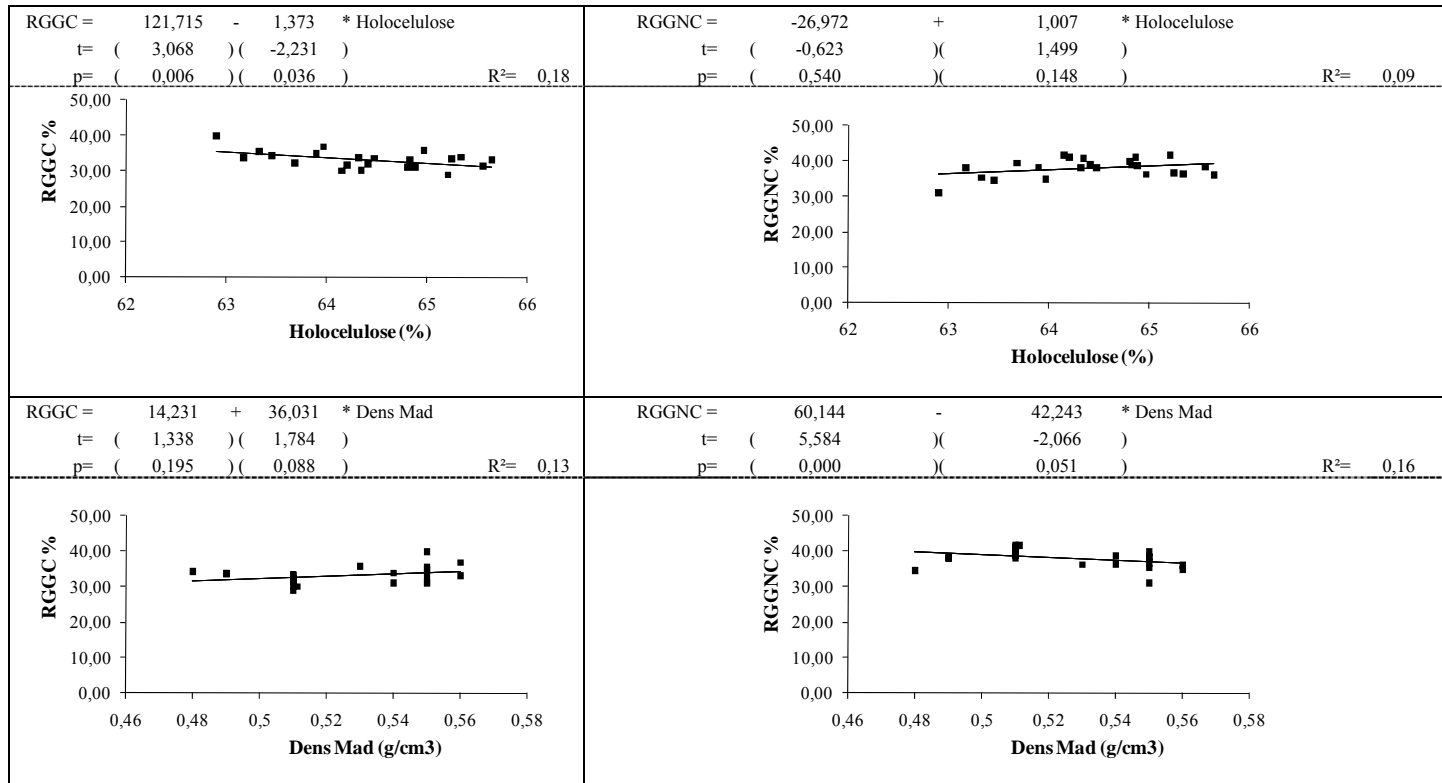


FIGURA 5B, Cont.

158

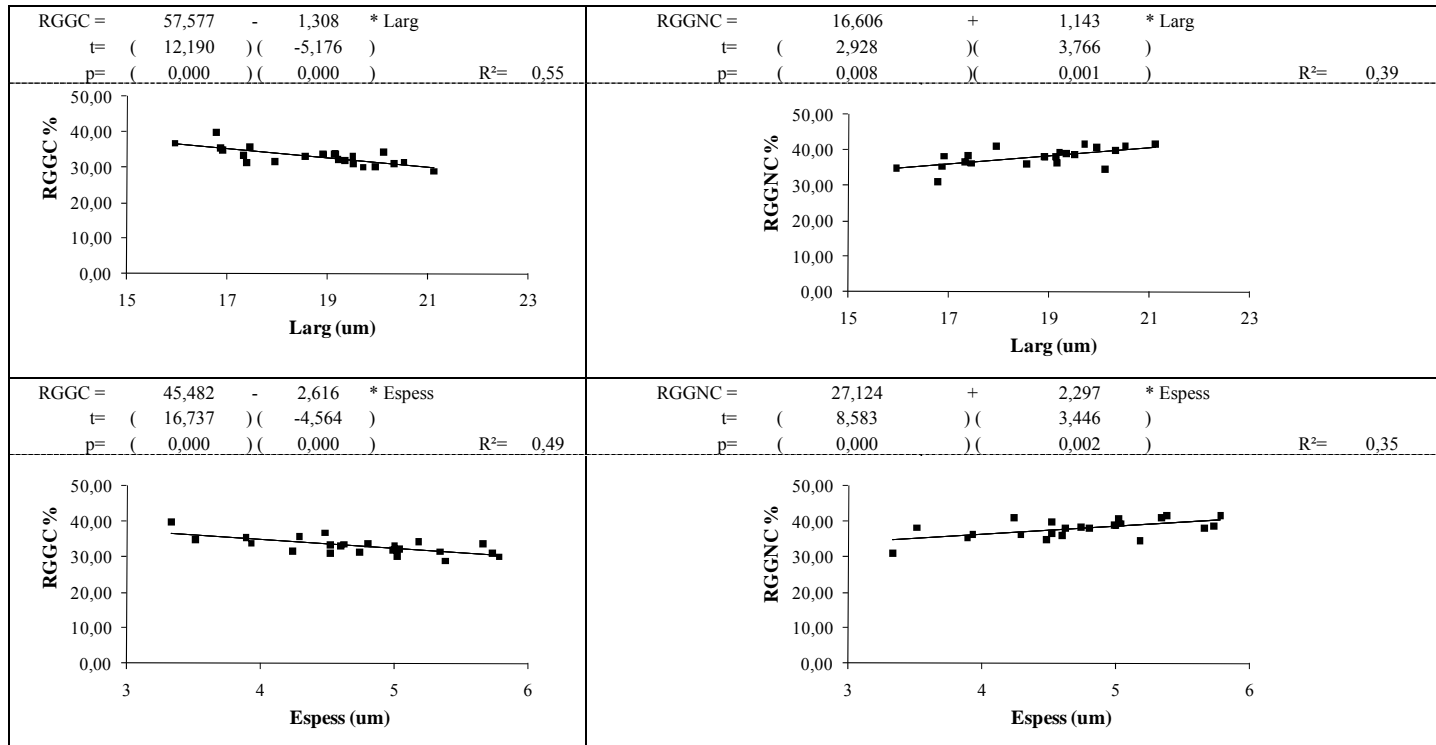


FIGURA 5B, Cont.

159

