

ANA FLÁVIA NEVES MENDES CASTRO

**EFEITO DA IDADE E DE MATERIAIS GENÉTICOS DE *Eucalyptus* sp. NA
MADEIRA E CARVÃO VEGETAL**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Ciência Florestal, para obtenção do
título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2011

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

C355e
2011

Castro, Ana Flávia Neves Mendes, 1986-
Efeito da idade e de materiais genéticos de *Eucalyptus* sp.
na madeira e carvão vegetal / Ana Flávia Neves Mendes
Castro. – Viçosa, MG, 2011.
x, 86f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 77-86

1. Madeira - Qualidade. 2. Carvão vegetal. 3. Eucalipto.
4. Reflorestamento. I. Universidade Federal de Viçosa.
II. Título.

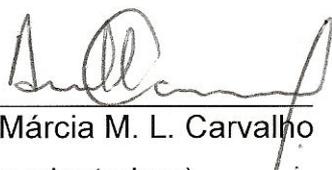
CDO adapt. CDD 634.98675

ANA FLÁVIA NEVES MENDES CASTRO

**EFEITO DA IDADE E DE MATERIAIS GENÉTICOS DE *Eucalyptus* sp. NA
MADEIRA E CARVÃO VEGETAL**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Ciência Florestal, para obtenção do
título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 25 de julho de 2011



Prof.^a. Ana Márcia M. L. Carvalho
(Coorientadora)



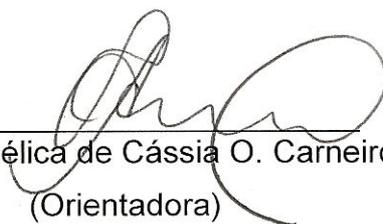
Prof. Benedito Rocha Vital
(Coorientador)



Dr.^a. Solange de Oliveira Araújo



Prof. Paulo Fernando Trugilho



Prof.^a. Angélica de Cássia O. Carneiro
(Orientadora)

*“Seremos nós sempre o orgulho de uma nação nas pequenas realizações.
Seremos nós sempre o orgulho de um dever cumprido.
Seremos nós sempre a gratidão à natureza pela nossa existência.
Seremos nós sempre a esperança em vencer uma luta e que essa luta seja
parte do ontem, do hoje e se existir o amanhã valeu mesmo caminhar até aqui.”*

Chiquinho da Floresta

AGRADECIMENTOS

À Deus que sempre esteve comigo, iluminando meus passos e minhas decisões.

Aos meus pais, José Maria Mendes e Maria Aparecida Neves e aos meus irmãos André e José Victor por todo amor, carinho, compreensão e incentivo.

Ao Renato, por estar sempre ao meu lado e pelo amor, carinho, paciência e dedicação e à minha filha Ana Clara, que encheu de luz a minha vida.

Às famílias, Oliveira Castro e Neves Mendes e às minhas irmãs que mesmo de longe sempre estão presentes. Aos amigos de Viçosa que fizeram essa trajetória muito mais agradável.

À professora Angélica de Cássia Oliveira Carneiro pela valiosa orientação, pelos permanentes incentivos e confiança depositada antes e durante o desenvolvimento do trabalho. Agradeço pela dedicação e exemplo de profissional.

À professora Ana Márcia que despertou em mim o interesse pela “Tecnologia da Madeira”, e me incentivou a continuar na busca pelo conhecimento. Pela confiança, amizade, e apoio em todos os momentos.

Ao professor Benedito Rocha Vital, ao professor Paulo Fernando Trugilho e à Solange de Oliveira Araújo pelas importantes sugestões para esse trabalho.

Aos funcionários dos Laboratórios de Painéis de Energia, Laboratório de Propriedades da Madeira e Laboratório de Celulose e Papel, que me ajudaram em todas as etapas do desenvolvimento desse trabalho, e além de

tudo me proporcionaram ótimos momentos! À Isabel, da UFLA, pelas carbonizações e análises do carvão.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Departamento de Engenharia Florestal pela oportunidade de desenvolver esta dissertação.

Aos professores e funcionários da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), pelos ensinamentos, convivência e companhia durante minha graduação.

À FAPEMIG pelo apoio financeiro.

Agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

BIOGRAFIA

ANA FLÁVIA NEVES MENDES CASTRO, filha de José Maria Mendes e Maria Aparecida Neves, nasceu em Belo Horizonte, Minas Gerais, aos 25 de julho de 1986.

Residiu em Sete Lagoas, onde cursou o ensino fundamental na Escola Estadual Dr. Ulisses de Vasconcelos e o ensino médio no Colégio Impulso.

Ingressou no curso de Engenharia Florestal na Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Diamantina, em fevereiro de 2005. Obteve o título de Engenheira Florestal em julho de 2009.

Em agosto de 2009 ingressou no programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Viçosa (UFV), onde obteve o título de Mestre em Ciência Florestal em 25 de julho de 2011.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Contexto energético	4
3.1.1. Energia da madeira	4
3.1.2. Carvão vegetal	5
3.1.3. Qualidade do carvão vegetal	6
3.2. <i>Eucalyptus</i>	7
3.3. Densidade básica	9
3.4. Composição química da madeira	10
3.4.1. Celulose	10
3.4.2. Hemiceluloses	11
3.4.3. Lignina	12
3.4.4. Extrativos	16
3.4.5. Inorgânicos	17
3.5. Análises termogravimétricas	18
3.6. Idade	19
4. MATERIAL E MÉTODOS	22
4.1. Preparo das amostras	23
4.2. Relação cerne/alburno	23

4.3.	Determinação da densidade básica da madeira.....	24
4.4.	Determinação do poder calorífico superior.....	24
4.5.	Análise química da madeira.....	25
4.5.1.	Composição elementar.....	25
4.5.2.	Composição química.....	25
4.5.3.	Relação Siringil/Guaiacil.....	26
4.6.	Análise termogravimétrica da madeira.....	27
4.7.	Carbonização e rendimentos gravimétricos.....	27
4.8.	Propriedades do carvão.....	27
4.8.1.	Análise química.....	27
4.8.2.	Densidade relativa aparente.....	28
4.8.3.	Determinação do poder calorífico superior.....	28
4.9.	Estimativa de energia.....	29
4.10.	Delineamento experimental.....	29
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
5.1.	Relação cerne/alburno.....	31
5.2.	Densidade básica da madeira.....	33
5.3.	Poder calorífico superior da madeira.....	35
5.4.	Energia da madeira.....	37
5.5.	Composição química elementar.....	38
5.6.	Análise química.....	44
5.7.	Correlações entre idade e relação S/G; idade e energia/m ³ , e relação S/G e energia/m ³	52
5.8.	Análises termogravimétricas da madeira.....	54
5.9.	Análises do carvão vegetal.....	57
5.9.1.	Densidade aparente do carvão.....	57
5.9.2.	Poder calorífico superior do carvão.....	59
5.9.3.	Teor de voláteis.....	61
5.9.4.	Teor de cinzas.....	62

5.9.5. Teor de carbono fixo.....	64
5.9.6. Rendimentos gravimétricos	66
5.10. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal.....	68
6. CONCLUSÕES	76
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77

RESUMO

CASTRO, Ana Flávia Neves Mendes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2011. **Efeito da idade e de materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. na madeira e carvão vegetal.** Orientadora: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro. Coorientadores: Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho e Benedito Rocha Vital.

No mercado cada vez mais competitivo é necessário que as empresas florestais realizem uma busca permanente por materiais genéticos que forneçam madeira com as propriedades adequadas para uma determinada finalidade, aliada a uma elevada produtividade, em um menor tempo possível. É nesse contexto que essa pesquisa se enquadra, uma vez que se propôs a verificar as propriedades da madeira de diferentes materiais genéticos, para a produção de carvão vegetal, em diferentes idades. Neste trabalho foram avaliados três clones de eucalipto, sendo um híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, e dois clones de *Eucalyptus urophylla*, nas idades de três, quatro, cinco e sete anos, com espaçamento de 3,5 x 2,5m. Os clones são provenientes da Gerdau S/A. Verifica-se que houve efeito da idade nas propriedades da madeira, dos três clones avaliados, proporcionando ganhos na qualidade do carvão e aumento na produção de energia por m³, mas não houve influência no rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Avaliando somente as propriedades da madeira para a seleção do melhor material genético, o clone GG 680 apresentou o maior potencial para a produção de carvão vegetal. Deve-se ressaltar que os três clones atendem as especificações para uso siderúrgico, com rendimento gravimétrico satisfatório.

ABSTRACT

CASTRO, Ana Flávia Neves Mendes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July 2011. **Effect of age and *Eucalyptus* sp. genetic material at wood and charcoal.** Adviser: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro. Co-advisers: Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho and Benedito Rocha Vital.

In an increasingly competitive market it is necessary that the forestry companies conducting permanent search for genetic materials that provide wood with appropriate properties for a particular purpose, combined with high productivity in the shortest possible time. In this context, this research fits, since it is proposed to verify the wood properties of different genetic materials for the charcoal production, at different ages. This study evaluated three eucalyptus clones, being a *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* hybrid and *Eucalyptus urophylla* clones at two, three, four, five and seven years old, with a 3.5 x 2.5 m spacing. The clones are from Gerdau S/A. There was effect of the age on wood properties, the three evaluated clones, providing gains in charcoal quality and increased energy production per m³, but there was no influence on the yield gravimetric charcoal. Evaluating only the wood propertie for the best genetic material selection, the GG 680 clone had the highest potential for the charcoal production. It should be noted that the three clones meet the specifications for use steel making, with satisfactory gravimetric yield.

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um material amplamente utilizado e a sua aplicação vai desde a cocção de alimentos em fogão à lenha até usos mais nobres em serraria, produção de celulose, produção de carvão em substituição aos combustíveis fósseis, dentro outros.

O Brasil é o maior produtor mundial de carvão vegetal, sendo que no ano de 2009 a quantidade produzida foi de aproximadamente 5,06 milhões de toneladas, sendo este valor o menor apresentado desde o ano de 1994 (FAO, 2010). Os principais consumidores do carvão vegetal são os setores de ferro-gusa, aço e ferros-liga e, em menor escala, o comércio e o consumidor residencial. O carvão vegetal apresenta inúmeras vantagens em relação ao carvão mineral, uma vez que é renovável, menos poluente (tem baixo teor de cinzas), praticamente isento de enxofre/fósforo e a tecnologia para sua fabricação já está amplamente consolidada no Brasil (ABRAF, 2011).

Minas Gerais se destaca nos plantios florestais e na utilização do carvão vegetal, sendo responsável pelo consumo de 2/3 do carvão vegetal utilizado no país, em especial na indústria siderúrgica (ABRAF, 2011), sendo que as plantações florestais para produção de carvão e outros fins industriais estão presentes em cerca de 350 municípios mineiros e ocupam 2,0% da área total do estado (REZENDE e SANTOS, 2010).

Atualmente, devido à maior competitividade do mercado é importante que as empresas florestais realizem uma busca permanente por materiais genéticos que forneçam madeira com as propriedades adequadas para uma determinada finalidade, aliada a uma elevada produtividade, em um menor tempo possível. Existem, hoje, vários materiais genéticos que já foram melhorados buscando aprimorar as propriedades da madeira que resultem na

produção de carvão vegetal de melhor qualidade, mas ainda é preciso investir em novas pesquisas para obter clones cada vez mais adequados à produção de carvão.

Quanto ao ciclo de corte das florestas, as empresas estipulam uma idade de corte para toda a sua área plantada, baseando-se na produtividade do povoamento. Entretanto, essa recomendação desconsidera a rotação, o crescimento da espécie em questão, o aumento em valor devido ao ganho em qualidade da madeira (RODRIGUEZ et al., 1997). O ciclo de exploração deve ser cuidadosamente avaliado, uma vez que se sabe que a idade influencia as características da madeira. De acordo com a literatura, observa-se uma melhoria nas propriedades da madeira com o envelhecimento das árvores.

Observa-se que existe uma escassez de trabalhos que abordem a influência da idade nas propriedades da madeira e, conseqüentemente, do carvão vegetal.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar o efeito da idade e diferentes materiais genéticos de *Eucalyptus* na produção de carvão vegetal.

Os objetivos específicos foram:

- Determinar as propriedades químicas e densidade básica da madeira;
- Estimar a produção de energia/m³;
- Determinar o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, gases condensáveis e não condensáveis;
- Determinar as propriedades físicas e químicas do carvão vegetal;
- Avaliar o efeito da relação S/G no rendimento gravimétrico em carvão vegetal;
- Avaliar através da análise termogravimétrica a perda de massa da madeira em função da temperatura de degradação;
- Determinar as correlações existentes entre as propriedades da madeira e idade para os três materiais genéticos, e as correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Contexto energético

3.1.1. Energia da madeira

A madeira é largamente utilizada pelo homem para diversas finalidades, dentre elas, o uso para fins energéticos. Com o aumento da utilização de combustíveis fósseis, o uso da madeira para produção de energia, diminuiu. Entretanto, atualmente, devido à pressão de órgãos ambientais e de organizações não governamentais para que ocorra uma diminuição na emissão de poluentes, existe uma maior busca por combustíveis provenientes de fontes renováveis, que poluam menos, e a utilização da biomassa tem ganhado forças nesse cenário.

Do ponto de vista energético, biomassa é todo recurso renovável, oriundo de material orgânico, seja vegetal ou animal, que pode ser utilizado para a produção de energia (ANEEL, 2011).

A biomassa, no Brasil, é constituída em grande parte pela madeira, e quando se avalia a produção de energia, pode-se dizer que o uso se divide em produção de carvão vegetal (carbonização) e consumo direto da lenha (combustão) (VALE et al., 2002).

A madeira para a produção de carvão vegetal apresenta características diferentes daquelas necessárias para a geração de energia através da queima direta. Para queima direta é melhor utilizar madeiras com maior poder calorífico, pois essa propriedade está relacionada com o rendimento energético, que por sua vez está relacionado com a sua constituição química,

onde os teores de celulose, hemiceluloses, lignina, extrativos e substâncias minerais variam de uma espécie para outra (QUIRINO et al., 2005).

A título de comparação, para a produção de carvão vegetal a madeira deve possuir um maior teor de lignina associado a um menor teor de holocelulose e maior densidade. O incremento da densidade é importante para a qualidade final do carvão, mas devem-se observar também as alterações nos aspectos anatômicos da madeira, que são importantes para a sua secagem no campo e durante o processo de carbonização (FREDERICO, 2009).

Portanto, é necessário conhecer as propriedades da madeira para destiná-la a um determinado uso, para promover seu melhor aproveitamento.

3.1.2. Carvão vegetal

Desde o século XIX o Brasil é o maior produtor mundial de carvão vegetal, que é utilizado principalmente na indústria siderúrgica para a produção de ferro-gusa, ferroligas e aço (REZENDE e SANTOS, 2010). Minas Gerais se destaca como o estado brasileiro com a maior produção de carvão vegetal, sendo que o setor siderúrgico apresenta grande importância para esse estado.

Depois da crise econômica mundial que ocorreu no ano de 2008 houve uma queda nas exportações do carvão vegetal e uma desvalorização desse produto no mercado interno. No ano de 2010, aconteceu a recuperação da economia nacional, entretanto, alguns setores como o guseiro, que é o maior consumidor de carvão vegetal no país, continuou em crise (ABRAF, 2011).

Até o final do ano de 2010, ainda existia um elevado índice de ociosidade na produção guseira a carvão vegetal, sendo que a produção anual foi de apenas 1/3 da capacidade instalada e somente 56,0% dos fornos funcionaram (ABRAF, 2011).

De acordo com os dados fornecidos pela FAO (2010) a quantidade de carvão vegetal produzida no Brasil, no ano de 2009, foi de aproximadamente 5,06 milhões de toneladas, sendo este valor o menor apresentado desde o ano de 1994 (FIGURA 1).

E com a queda da produção de ferro gusa devido à baixa demanda externa, o preço do carvão vegetal está desvalorizado no mercado, sendo comercializado a R\$123,00/mdc na usina.

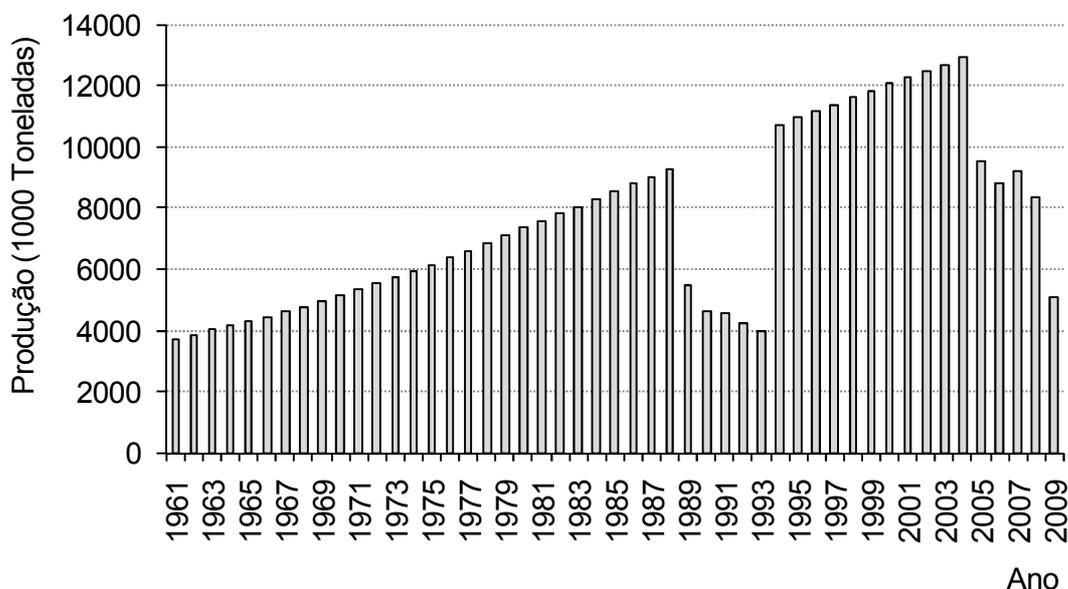


Figura 1 – Produção de carvão vegetal do Brasil no período de 1961 a 2009.

Fonte: FAO (2010)

Entretanto, espera-se que ocorra uma recuperação desse setor uma vez que o cenário se mostra positivo a médio e longo prazo para o setor florestal, devido principalmente às vantagens ambientais.

3.1.3. Qualidade do carvão vegetal

O carvão vegetal é utilizado principalmente como combustível, pois possui propriedades superiores às da madeira, na produção de energia, uma vez que apresenta maiores valores para o poder calorífico. Entretanto, o rendimento do processo de carbonização é baixo. No setor siderúrgico o carvão vegetal também é largamente empregado, e é utilizado como redutor do minério de ferro, para a produção de ferro gusa e de outras ligas metálicas. Apresenta menos impurezas do que o coque (enxofre e cinzas), o que resulta num ferro gusa menos quebradiço, mais resistente e maleável para o forjamento (FREDERICO, 2009).

Para avaliar a qualidade do carvão vegetal deve-se levar em consideração a granulometria, a densidade, a resistência mecânica, o teor de umidade, a composição química e a reatividade (BRITO, 1993).

De acordo com Santos (2008a) o carvão vegetal para uso siderúrgico deve apresentar teor de carbono fixo entre 70% e 80%; teor de materiais voláteis variando de 25% a 35%; umidade máxima de 6%; teor de enxofre entre 0,03% a 0,10%; resistência à compressão de 10 Kg/cm² a 80 Kg/cm², a granulometria de 9 mm a 100 mm e densidade aparente acima de 0,25 g/cm³.

No entanto, ressalta-se que as propriedades do carvão vegetal são bastante variáveis, pois sofrem influência da matéria prima que lhe deu origem e do processo de carbonização, variáveis essas de difícil controle. De maneira geral, madeiras com maior densidade básica originam carvão mais denso. Quando se utiliza uma marcha de carbonização mais longa e com temperaturas mais elevadas, ocorre maior degradação da madeira, e conseqüentemente, obtêm-se menor rendimento gravimétrico, menor densidade aparente do carvão e menor resistência, e maior teor de carbono fixo.

Vale salientar que essas características são importantes para o uso siderúrgico, pois quanto maior a densidade do carvão maior a quantidade de carbono fixo por unidade de volume e maior a resistência do carvão (menor friabilidade) ocasionando maior produtividade dos altos fornos e menor risco de ocorrência de impermeabilidade de carga no mesmo.

3.2. *Eucalyptus*

O gênero *Eucalyptus* pertence à família Mirtaceae e conta com cerca de 600 espécies e grande número de variedades e híbridos (TRUGILHO et al., 1996). Esse gênero foi introduzido no Brasil no início do século XIX, com evidências de que as primeiras árvores teriam sido plantadas em 1825, no Jardim Botânico do Rio de Janeiro, com a finalidade de ornamentação. Porém, foi somente no início do século XX, que foi plantado com o objetivo comercial (PEREIRA et al., 2000).

No Brasil, o gênero *Eucalyptus* é o mais estudado e implantado comercialmente, sendo que no ano de 2010 o total de áreas plantadas foi de 4.754.334 ha (ABRAF, 2011). Ressalta-se que a área plantada desse gênero continua em processo de expansão, todavia, em um ritmo menos acelerado. Minas Gerais aparece como o principal estado produtor de eucalipto, com 23,6% da área plantada no país (ABRAF, 2011). Seu rápido crescimento, alta produtividade, ampla diversidade de espécies e clones, adaptabilidade e diversificação quanto aos usos da madeira, contribuem para a expansão contínua da área plantada.

De acordo com a literatura, as espécies de eucalipto mais utilizadas em pesquisas, e conseqüentemente nos plantios, para fins energéticos, são: *Eucalyptus grandis* (FREDERICO, 2009), *Eucalyptus urophylla* (ANDRADE, 2009), *Eucalyptus camaldulensis* (PINHEIRO et al., 2005), *Eucalyptus cloeziana* (PINHEIRO et al., 2005); *Eucalyptus pellita* (OLIVEIRA et al., 2010); *Eucalyptus saligna* (TRUGILHO et al., 2001); híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (TRUGILHO et al., 2005; CAMPOS, 2008; FREDERICO, 2009; ARANTES, 2009, SANTOS, 2010), híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* (TRUGILHO et al., 2005; SANTOS, 2010; ROCHA, 2011).

O *Eucalyptus urophylla* é uma espécie nativa da Indonésia e de Timor que ocorre naturalmente a partir de 500 m de altitude até cerca de 3000 m (MOURA, 2004). Em relação à maioria das espécies de eucaliptos introduzidas no Brasil, o *Eucalyptus urophylla* é a espécie que apresenta a maior estabilidade genética em todas as áreas onde foi testada (MOURA, 2004).

As espécies *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis* e o híbrido resultante de seu cruzamento adquiriram grande importância na indústria nacional de celulose e papel (CARVALHO, 2000) e conseqüentemente, nas empresas produtoras de carvão vegetal, que utilizam essas espécies, mesmo estas sendo melhoradas para a produção de celulose e papel, devido a existência de poucos estudos que buscassem um clone com as melhores características para a produção de carvão vegetal. Essa preocupação é mais recente, e atualmente, as empresas florestais que visam a produção de carvão

vegetal, vem trabalhando em conjunto para tentar encontrar materiais genéticos que atendam as necessidades específicas para essa finalidade.

3.3. Densidade básica

A densidade básica é um dos índices de qualidade da madeira mais importantes. Essa propriedade é a mais utilizada para a avaliação da qualidade da madeira, uma vez que está correlacionada diretamente com a produção de massa seca, com as propriedades físico-mecânicas e pode ser facilmente determinada (PALERMO et al., 2004), além de se relacionar com a qualidade dos produtos (SANTOS, 2010). A densidade da madeira, bem como as demais propriedades, varia de uma espécie para outra, dentro da mesma espécie e na direção radial e axial de uma mesma árvore (OLIVEIRA, 2003) e pode ser considerada como um parâmetro referencial para a seleção de espécies florestais para produção de energia (SANTOS, 2010).

A densidade básica da madeira é o resultado de uma complexa combinação dos seus constituintes anatômicos. Essa propriedade fornece várias informações sobre as características da madeira, devido a sua relação com várias outras propriedades, tornando-se um parâmetro muito utilizado para qualificar a madeira, nos diversos segmentos da atividade industrial (SILVA et al., 2004). Madeiras mais leves possuem aproximadamente o mesmo poder calorífico por unidade de massa, mas possuem menor poder calorífico por unidade de volume.

Na utilização da madeira na forma de lenha, através da queima direta, maior densidade resulta em combustível de maior energia concentrada, devido à maior massa de combustível contida na mesma unidade de volume (FREDERICO, 2009).

A utilização de madeiras com maior densidade ocasiona a produção de carvão vegetal com maior densidade (BRITO e BARRICHELLO, 1980; STURION et al., 1988). Sendo assim, a operação com carvão mais denso implica em maiores tempos de residência da carga metálica no interior da zona de reserva térmica do alto-forno (BRITO, 1993).

No trabalho desenvolvido por Trugilho et al. (2001), observou-se que os clones que apresentaram maior densidade básica da madeira também apresentaram maior densidade aparente do carvão, sendo que os maiores valores de densidade básica da madeira e do carvão vegetal foram, respectivamente, 0,597 g/cm³ e 0,486 g/cm³ para os clones de *Eucalyptus grandis*, e 0,603 g/cm³ e 0,491 g/cm³ para os clones de *Eucalyptus saligna*.

Essa mesma tendência foi observada por Frederico (2009) e Santos (2010) que encontraram maiores valores de densidade aparente do carvão para os clones que apresentaram maior densidade básica da madeira.

De maneira geral, a madeira dos eucaliptos apresenta densidade classificada como média, conforme descrito na literatura. Gomide et al. (2005) encontraram um valor médio, para os dez clones de *Eucalyptus* sp., de 0,49 g/cm³. Oliveira et al. (2010), encontraram, para *Eucalyptus pellita* aos 5 anos uma densidade básica de 0,55 g/cm³.

3.4. Composição química da madeira

A madeira é um material orgânico que apresenta composição química complexa, dependente de alguns fatores relacionados ao crescimento da árvore, como, por exemplo, a idade e a posição no tronco (GONÇALVES, 2010). É constituída de celulose, hemiceluloses, lignina, extrativos e de uma pequena fração de inorgânicos. Esses constituintes encontram-se distribuídos nas diversas camadas que compõem o elemento anatômico principal, a fibra ou o traqueíde (MOKFIENSKI, 2004).

3.4.1. Celulose

A celulose é o principal constituinte da madeira, contribuindo com cerca de 40 a 45% da matéria seca na maioria das espécies (GOLDENSTEIN, 1991; SJÖSTRÖM, 1992; SJÖSTRÖM e WESTERMARK, 1999). Nos vegetais superiores aparece, principalmente, sob a forma de fibras, ao lado de outros componentes fundamentais e acidentais (TRUGILHO et al., 1996), e está localizada principalmente na parede celular secundária (SJÖSTRÖM, 1992).

As cadeias de celulose são agregadas na forma de microfibrilas, em regiões altamente ordenadas, denominadas de regiões cristalinas, alternadas com regiões menos ordenadas, denominadas regiões amorfas. As microfibrilas são a base para a formação das fibras de celulose, que são altamente resistentes a tração e insolúvel na maioria dos solventes (GOLDENSTEIN, 1991; SJÖSTRÖM, 1992; SJÖSTRÖM e WESTERMARK, 1999).

É um polissacarídeo composto por unidade de β -D-glicopiranosose, conectadas por ligações do tipo $\beta(1-4)$. É um polímero linear e apresenta uma grande tendência de formar ligações de hidrogênio intra e intermolecular (GOLDENSTEIN, 1991; SJÖSTRÖM, 1992; SJÖSTRÖM e WESTERMARK, 1999).

Gomide et al. (2005) estudando dez clones de *Eucalyptus* sp. encontraram valores para o teor de celulose que variaram de 43,9% a 49,7%, sendo o valor médio para esse componente de 45,97%.

Para a queima direta da madeira a celulose contribui bastante para a geração de energia, uma vez que é o seu componente mais abundante. Entretanto, para a produção de carvão vegetal, a celulose apresenta baixo rendimento, pois é pouco estável termicamente, e se degrada a baixas temperaturas.

3.4.2. Hemiceluloses

As hemiceluloses juntamente com a celulose formam a fração da madeira denominada holocelulose. São consideradas o principal polissacarídeo não celulósico da madeira (TRUGILHO et al., 1996). De maneira geral, a quantidade de hemiceluloses presente na matéria seca varia de 20% a 30% (WHISTLER e CHEN, 1991; SJÖSTRÖM, 1992; SJÖSTRÖM e WESTERMARK, 1999). São polissacarídeos amorfos (SJÖSTRÖM e WESTERMARK, 1999; TELMO e LOUSADA, 2011), formados por vários tipos de açúcares, que apresentam estrutura ramificada e baixo grau de polimerização envolvendo as fibras de celulose (SJÖSTRÖM, 1992; SANTOS, 2008b). As hemiceluloses são compostas por diferentes monossacarídeos, como D-glicose, D-manose, D-galactose, D-xilose, L-arabinose, e menores

quantidades de L-raminose, ácido D-glucurônico e ácido D-galacturônico (WHISTLER e CHEN, 1991; SJÖSTRÖM, 1992; SJÖSTRÖM e WESTERMARK, 1999).

As principais hemiceluloses presentes na madeira são as xilanas, galactoglucomanas, arabinogalactanas, glucanas e galactanas (TELMO e LOUSADA, 2011). A estrutura, a porcentagem e a composição individual e total das hemiceluloses das madeiras de coníferas e de folhosas são diferentes (SJÖSTRÖM, 1992; TELMO e LOUSADA, 2011). As coníferas apresentam maior proporção de unidades de manoses e galactose do que as folhosas, que por sua vez apresentam maior proporção de xiloses e mais grupos acetil (WHISTLER e CHEN, 1991; TELMO e LOUSADA, 2011).

Gomide et al. (2005) obtiveram, para os dez clones de *Eucalyptus* sp. avaliados, valores de hemiceluloses que variaram de 18,6% a 23,2%, sendo que o valor médio foi de 21,22%.

A maioria dos trabalhos apresenta o teor de holocelulose da madeira, conforme observado na pesquisa desenvolvida por Trugilho et al. (1996) que obteve, para madeira de *Eucalyptus saligna*, valores de holocelulose que variaram de 68,52% (aos 12 meses) a 72,48% (aos 48 meses). Esses valores estão de acordo com o encontrado por Oliveira et al. (2010), que observaram 65,97% de holocelulose na madeira de *Eucalyptus pelita* aos cinco anos.

Assim como a celulose, as hemiceluloses contribuem diretamente para a queima direta da madeira, pois durante a sua degradação térmica, liberam materiais voláteis que formam a chama do processo. Entretanto, para a produção de carvão vegetal, as hemiceluloses apresentam baixo rendimento, uma vez que são menos estáveis termicamente, do que a celulose, e se degradam a temperaturas, ainda mais baixas.

3.4.3. Lignina

Outro componente estrutural da madeira é a lignina sendo essa um dos principais componentes das plantas vasculares. Essa macromolécula está presente em cerca de um quarto dos tecidos vasculares e em combinação com a celulose e hemiceluloses constitui o material orgânico mais abundante na

superfície da terra (CHEN, 1991; SEDEROFF e CHANG, 1991). As hemiceluloses e a lignina formam uma matriz que é encontrada nas paredes primária e secundária das células e, nesse caso, conferem maior resistência à parede celular. A lignina é encontrada, também, preenchendo os espaços entre as células, ou seja, a lamela média, onde funciona como agente aglutinante (CHEN, 1991; SEDEROFF e CHANG, 1991). Desempenha um papel essencial no crescimento e desenvolvimento da planta (MÉCHIN et al., 2006), além de ser responsável pela resistência mecânica dos vegetais e proteção dos tecidos contra o ataque de microorganismos (SALIBA et al., 2001; MÉCHIN et al., 2011), uma vez que a penetração de enzimas destrutivas secretadas por organismos invasores é reduzida (SEDEROFF e CHANG, 1991).

O termo lignina é comumente utilizado para ligninas inalteradas assim como para ligninas derivadas de processo químicos como, por exemplo, provenientes da polpa celulósica e do licor negro. Porém, os dados analíticos para lignina inalterada geralmente, não são válidos para lignina alterada devido às mudanças químicas. Além disso, técnicas analíticas usadas para avaliação da lignina inalterada, em geral não são aplicadas para análise das ligninas modificadas quimicamente. Então, o termo protolignina (lignina nativa) é utilizado quando se refere a lignina inalterada (BRUNOW et al., 1998).

De acordo com Lin e Dence (1992) a lignina pode ser definida como um material heterogêneo, ramificado, amorfo e polifenólico, oriundo de uma polimerização desidrogenativa de três monômeros de fenilpropanóides, os alcoóis coliferílico, sinapílico e p-coumarílico (Figura 2), mediada por uma enzima.

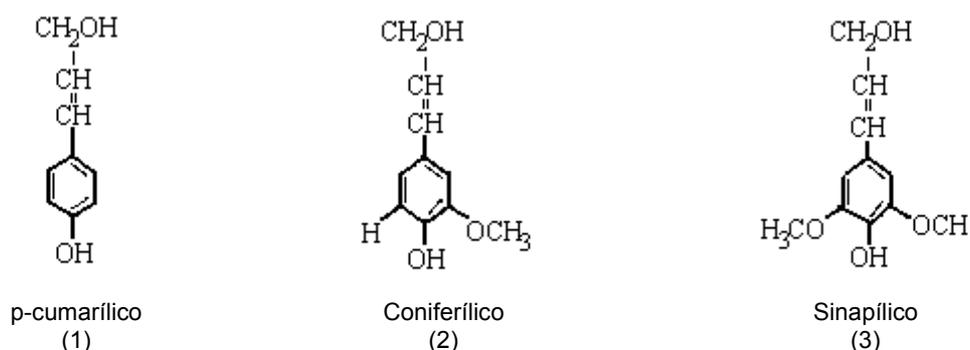


Figura 2 – Alcoóis precursores das unidades fenilpropanóides da lignina p-hidroxifenila (1), guaiacila (2) e siringila (3).

Fonte: Saliba et al., 2001

O teor de lignina, a sua composição e a proporção dos três tipos de fenilpropano varia de acordo com a origem botânica (BRUNOW et al., 1998).

No trabalho desenvolvido por Gomide et al. (2005) no qual foram estudados dez clones de *Eucalyptus* sp. observou-se teores de lignina que variaram de 27,5 até 31,7%. Esses valores indicaram que, mesmo sendo madeira de folhosa, alguns clones de eucalipto plantados no Brasil atingem teores de lignina acima de 30%, sendo esses valores mais característicos de madeiras de coníferas.

Trugilho et al. (2001) estudando sete clones de *Eucalyptus grandis* e três clones de *Eucalyptus saligna*, obtiveram valores médios para o teor de lignina total acima de 30%, observando valores de 31,89% e 31,51%, respectivamente.

3.4.3.1. Tipos de lignina

A composição da lignina é diferente para as espécies de Gimnospermas e de Angiospermas. As plantas superiores (Gimnospermas e Angiospermas) apresentam principalmente dois tipos de lignina: guaiacil e siringil-guaiacil. A lignina guaiacil (G) é o principal tipo encontrado nas madeiras normais das Gimnospermas (LIN e DENCE, 1992; SEDEROFF E CHANG, 1991; CHEN, 1991) e deriva do álcool coniferílico, mais de 95% do total das unidades estruturais (LIN e DENCE, 1992). Nas Angiospermas a lignina é produzida através da copolimerização do álcool coniferílico e do álcool sinapílico, e é conhecida como siringil-guaiacil (S) (Figura 3). Existe, também, um terceiro tipo de lignina que é encontrado em pequenas quantidades, nas gramíneas e nas madeiras de compressão das coníferas, em maior quantidade do que a encontrada em madeiras normais. Esse polímero é o para- hidroxifenil que é derivado do álcool p-coumarílico (SEDEROFF e CHANG, 1991; CHEN, 1991).

A estrutura da lignina siringil-guaiacil (Figura 3) é menos condensada que a lignina guaiacil, uma vez que possui o carbono reativo C5 disponível para reação na etapa de polimerização da biossíntese da lignina (GOMIDE et al., 2005). No carbono cinco (C5) existe um grupo metoxílico (OCH₃) ligado, o que impede a sua ligação com outras substâncias durante a polimerização. Por

outro lado a lignina guaiacil, por possuir o C5 disponível para reação com outros anéis de fenilpropano se torna um componente de maior peso molecular e, conseqüente, mais favorável à produção de carvão vegetal devido à sua maior estabilidade térmica. Pode-se dizer, que espera-se que a lignina do tipo siringil-guaiacil seja degradada a temperaturas mais baixas do que a lignina guaiacil, que possui uma estrutura mais condensada e mais difícil de desfazer.

A lignina apresenta um conteúdo de carbono cerca de 50% maior do que o encontrado nos polissacarídeos. Portanto, apresenta um potencial realmente grande para produção de energia (SEDEROFF e CHANG, 1991).

No estudo desenvolvido por Gomide et al. (2005), avaliando dez clones de *Eucalyptus sp*, verificaram que a relação entre as estruturas siringil e guaiacil (S/G) é de duas a três vezes maior que a das estruturas guaiacil. Ou seja, essa relação variou de 2,0 a 2,8, sendo que o valor médio foi de 2,32.

Santos (2010) estudando quatro clones híbridos de *Eucalyptus sp*, encontrou valores para a relação S/G que variaram de 2,6 a 3,25, sendo ligeiramente maiores do que os valores apresentados por Gomide et al. (2005).

Ainda de acordo com Santos (2010), espera-se que com maior proporção de lignina total e menor relação siringil/guaiacil, exista uma maior conversão em carvão vegetal em função da maior resistência à degradação térmica, promovida pela presença de estruturas mais condensadas.

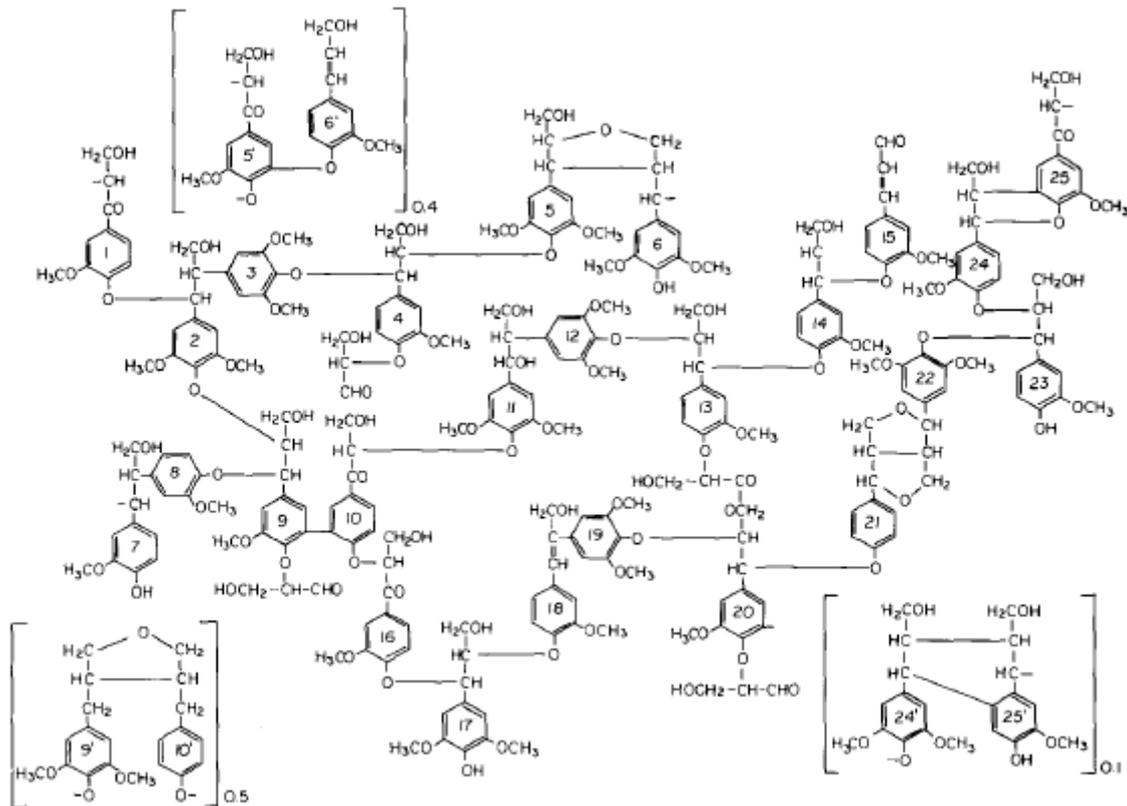


Figura 3 – Estrutura da lignina siringil-guaiacil presente nas Angiospermas.

Fonte: Lin e Dence (1992).

3.4.4. Extrativos

Os extrativos são componentes da madeira não pertencentes à parede celular das fibras, ou seja, não estruturais, e são compostos extracelulares e de baixo peso molecular (SJÖSTRÖM, 1992). Os extrativos influenciam nas propriedades físicas da madeira, como o cheiro, cor, resistência a microrganismos, entre outras. Os extrativos são substâncias solúveis em solventes orgânicos neutros e em água (GOLDENSTEIN, 1991; ZAVARIN e COOL, 1991; SJÖSTRÖM, 1992).

De acordo com Sjöström e Westermark (1999), os principais tipos de extrativos são os seguintes: terpenoides e esteróides, gorduras, ceras e substâncias fenólicas incluindo estilbenos, lignanas, taninos e flavonoides.

Os extrativos agem como intermediário no metabolismo das árvores, como reserva de energia e como mecanismo de defesa (TELMO e LOUSADA, 2011, apud ROWELL, 1984.).

Oliveira et al. (2010) encontraram um valor médio de teor de extrativos totais de 4,53%, para madeira de *Eucalyptus pellita* aos cinco anos. Trugilho et al. (2001), observaram maiores valores para o teor de extrativos totais, obtendo valores que variaram de 4,87% a 7,75%, e 6,50% a 7,54% respectivamente para clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*. Santos (2010) verificou um valor médio de 5% de extrativos para os quatro clones híbridos de *Eucalyptus* sp..

Os extrativos, em grande parte são formados por substâncias voláteis, sendo, portanto, de grande importância para a queima direta da madeira, pois se degradam mais rápido e ajudam a manter a chama do processo. Considerando-se a produção de carvão vegetal, o teor elevado de extrativos da madeira é um fator prejudicial, uma vez que proporciona menor rendimento gravimétrico em carvão, devido a degradação dessas substâncias a baixas temperaturas.

3.4.5. Inorgânicos

Além dos componentes citados anteriormente, a madeira possui também pequenas quantidades de compostos minerais, comumente conhecidos como cinzas. Em geral, o conteúdo dos componentes inorgânicos não passa de 1% da massa seca (SJÖSTRÖM e WESTERMARK, 1999). Normalmente estão associados à compostos orgânicos onde tem função fisiológica. Os mais comuns são o cálcio, magnésio, potássio, sódio, fósforo, silício, ferro, cobre e manganês na forma de carbonatos, cloretos, oxalatos, fosfatos e silicatos (SJÖSTRÖM e WESTERMARK, 1999). As cinzas são mais abundantes na casca e podem acarretar alguns problemas durante a utilização da madeira e do carvão vegetal, uma vez que contribuem negativamente para o poder calorífico, causam trincas e fissuras no ferro gusa (principalmente o enxofre e o fósforo), além de aumentar a quantidade de resíduo sólido, tanto nos cinzeiros das fornalhas, quanto no volume de escoria da produção do gusa. De acordo

com Santos (2008a) o teor de cinzas presentes no carvão vegetal deve ser menor que 1%.

3.5. Análises termogravimétricas

As técnicas termoanalíticas são métodos com os quais se mede a variação de uma determinada propriedade física de uma amostra em função do tempo ou da temperatura (CAVALHEIRO et al., 1995). A análise térmica é uma ferramenta simples, que permite analisar e compreender problemas que envolvem reações químicas ou físicas e seus mecanismos em função da temperatura (PINHEIRO et al., 2005).

A termogravimetria (TGA) pode ser considerada como um caso particular das técnicas termoanalíticas (CAVALHEIRO et al., 1995), e acompanha a variação da propriedade física, massa, da amostra em função do tempo (com a temperatura constante), ou em função da temperatura (CAVALHEIRO et al., 1995, SANTOS, 2010).

A termogravimetria baseia-se na medição contínua da massa de uma amostra durante o processo de aquecimento. Normalmente uma substância perde massa com o aquecimento, devido à perda de umidade, materiais voláteis, reações de pirólise e combustão (PINHEIRO et al., 2005).

De acordo com Santos (2010), com base na análise termogravimétrica, é possível interpretar o comportamento da madeira durante a sua decomposição térmica, além de fornecer informações, sobre em quais faixas de temperatura a decomposição é mais pronunciada. Essa técnica permite comparar o comportamento térmico da amostra, evidenciando a influência de diferentes materiais genéticos sobre a cinética de reação, apesar de fornecer apenas informações gerais sobre as reações de pirólise (SANTOS, 2010).

É possível, através da utilização da análise termogravimétrica, verificar em que temperatura é iniciada a decomposição térmica e, ainda, em que faixa de temperatura a decomposição térmica é mais pronunciada (OLIVEIRA, 2003).

O aparelho utilizado para a técnica é chamado “termobalança” e para obtenção de resultados, é preciso que se originem produtos de decomposição

térmica voláteis, ou que ocorra incorporação de átomos ou moléculas, provenientes dos gases da atmosfera do forno, respectivamente, aumentando ou diminuindo a massa original da amostra (CAVALHEIRO et al., 1995).

No trabalho desenvolvido por Santos (2010) que avaliou três clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e um clone híbrido de *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis*, aos sete anos de idade, verificou-se que a perda de massa total registrada até a temperatura de 500°C variou de 89% a 96%.

Campos (2008) avaliou a madeira de clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, aos 53 meses de idade, e encontrou rendimento gravimétrico variando de 17% a 26%, sendo que a faixa de maior degradação térmica foi de 250 a 400 °C. Vale salientar que essa faixa de temperatura corresponde ao intervalo de máxima degradação das hemiceluloses e ligninas.

3.6. Idade

As variações nas composições químicas, físicas e anatômicas da madeira são grandes entre espécies, embora dentro da mesma espécie elas também ocorram, em função principalmente da idade, fatores genéticos e ambientais (TRUGILHO et al., 1996).

A natureza das células é dependente da idade do tecido cambial e, dessa forma, zonas distintas de madeira podem ser distinguidas dentro da árvore (SILVA, 2002).

Geralmente, a madeira apresenta uma rápida elevação dos valores de densidade e comprimento de fibra, da fase juvenil até atingirem a maturidade, onde os valores permanecem mais ou menos constantes. Na fase juvenil, a taxa de incorporação de biomassa é crescente, tendendo a se estabilizar, quando a árvore atinge a fase adulta (TRUGILHO et al., 1996).

A idade de uma floresta é um fator muito importante para uma empresa uma vez que existe uma mudança nas propriedades da madeira com o aumento da idade.

De maneira geral, as empresas estipulam uma idade de corte para toda a sua área plantada, baseando-se na produtividade do povoamento.

Entretanto, essa recomendação desconsidera a rotação, o tipo de crescimento da espécie em questão, a vinculação com planos globais de abastecimento, o aumento em valor devido ao ganho em qualidade da madeira, o uso de diferentes taxas de juros (RODRIGUEZ et al., 1997).

A escolha da idade de corte de um povoamento é um fato complexo, que deve levar em consideração não somente a produtividade, mas também as condições em que essas plantas se desenvolveram, como por exemplo, a capacidade produtiva do local. De acordo com Soares et al. (2009), ao estudarem um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* em três classes de capacidade produtiva (baixa, média e alta), verificaram que a idade técnica de corte varia com a classe de capacidade produtiva, sendo que no melhor sítio a idade técnica de corte foi aos quatro anos, e para o pior sítio foi de seis anos.

Além disso, para determinar a melhor idade de corte de um povoamento florestal, é importante realizar avaliação das características tecnológicas da madeira, uma vez que essas características são influenciadas pelo incremento na idade.

Uma vez que as características da madeira variam de acordo com o incremento em idade, espera-se uma modificação, também nas características do carvão vegetal. Espera-se que o carvão vegetal produzido com madeiras mais velhas, até uma determinada idade, apresente maior densidade e resistência.

Na Tabela 1 estão apresentados resultados obtidos por alguns estudos que avaliaram o efeito da idade nas propriedades da madeira.

Tabela 1 – Efeito da idade sobre as propriedades da madeira

Espécie (Híbrido)	Idade (anos)	Efeito	Referência
<i>Eucalyptus viminalis</i>	Quatro e sete anos	Aumento da densidade básica da madeira com o aumento em idade. Madeiras mais densas produzem carvão com maior densidade.	Sturion et al. (1988)
<i>Eucalyptus saligna</i>	Um, dois, três e quatro anos	Aumento da densidade básica, do teor de holocelulose, do comprimento e da largura das fibras e diminuição do teor de lignina, de extrativos e do teor de cinzas com o aumento da idade.	Trugilho et al. (1996)
<i>Eucalyptus grandis</i> <i>x Eucalyptus urophylla</i>	Quatro, sete e nove anos	Aumento no teor de lignina, de extrativos e na densidade básica da madeira, e uma diminuição do teor de holocelulose e cinzas com o aumento da idade.	Carvalho (1997)
<i>Eucalyptus grandis</i>	Dez, quatorze, vinte e vinte e cinco anos	Aumento no teor de extrativos, no teor de lignina e diminuição no teor de holocelulose com o aumento da idade, e uma estabilização a partir de uma cer.a idade, pois não houve variação entre as idade de 20 e 25 anos.	Silva et al. (2004)
<i>Eucalyptus grandis</i> <i>x Eucalyptus camaldulensis</i>	Quatro, cinco, seis e sete anos	Aumento da densidade básica com o aumento da idade.	Rocha (2011)

4. MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização desse trabalho foram utilizados três clones de *Eucalyptus* sp (Tabela 2), nas idades de 3, 4, 5 e 7 anos, provenientes de plantios comerciais pertencentes à Gerdau S.A. localizado no município de Lassance – MG. Foram selecionadas três árvores de diâmetro médio para cada um dos doze tratamentos, totalizando trinta e seis árvores (amostras). As árvores foram coletadas em plantios comerciais com espaçamento médio de 3,5m x 2,5m nas classes de idade de três, quatro, cinco e sete anos.

Tabela 2 – Identificação do material genético utilizado.

Clones	Idades (anos)	Material Genético
GG 100	3	<i>E. urophylla</i>
	4	<i>E. urophylla</i>
	5	<i>E. urophylla</i>
	7	<i>E. urophylla</i>
GG 157	3	<i>E. urophylla</i>
	4	<i>E. urophylla</i>
	5	<i>E. urophylla</i>
	7	<i>E. urophylla</i>
GG 680	3	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>
	4	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>
	5	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>
	7	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>

A região de plantio se encontra no bioma cerrado, com clima caracterizado pela presença de invernos secos e verões chuvosos, classificado como Aw de Köppen (tropical chuvoso). Possui média anual de precipitação da ordem de 1500 mm, variando de 750 a 2000 mm. As chuvas são praticamente

concentradas de outubro a março (estação chuvosa), e a temperatura média do mês mais frio é superior a 18⁰C (RIBEIRO e WALTER, 1998).

O solo predominante da região em estudo é o latossolo, que são solos porosos, com alto grau de flocculação das argilas, bem drenados e ocupam predominantemente relevos planos ou com declives pouco acentuados.

4.1. Preparo das amostras

De cada árvore foram retirados cinco discos correspondentes a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial do tronco. Inicialmente, fez-se a medição das porcentagens de cerne e alburno de cada disco, antes que fossem realizadas as demais análises. De todos os discos, foram retiradas duas cunhas opostas, utilizadas para a determinação da densidade básica da madeira. O restante do disco foi seccionado, sendo que uma parte foi destinada à produção de carvão e outra parte destinada à determinação da composição elementar, composição química, poder calorífico superior e análise termogravimétrica. Para todas as análises foram utilizadas amostras compostas .

4.2. Relação cerne/alburno

Para a determinação das porcentagens de cerne e alburno foram feitas duas retas perpendiculares, passando sobre a medula. Conforme apresentado na Figura 4, fez-se a medida da distância das bordas até o início do cerne (retas marcadas em vermelho), nas duas extremidades da reta, e a medida do cerne (marcado em azul). Utilizou-se uma lupa para determinar a mudança do alburno para o cerne, uma vez que é definida pela mudança de cor e obstrução dos poros por tiloses, característico da madeira de eucalipto. A percentagem do alburno foi calculada subtraindo-se da área total a área de cerne. A relação cerne/alburno foi calculada dividindo-se a área de cerne pela área de alburno.



Figura 4 – Determinação da porcentagem de cerne e alburno.

4.3. Determinação da densidade básica da madeira

De cada disco foram retiradas duas cunhas amostras opostas 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.

4.4. Determinação do poder calorífico superior

O poder calorífico superior da madeira, foi determinados de acordo com a metodologia descrita pela norma da ABNT NBR 8633 (ABNT, 1984), utilizando-se uma bomba calorimétrica adiabática. As amostras de madeira foram transformadas em serragem utilizando-se um moinho de laboratório tipo Wiley, de acordo com a norma TAPPI 257 om-52 (TAPPI, 1998). 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, (ASTM, 1982). As amostras foram secas em estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$, até massa constante, para a determinação do poder calorífico superior.

4.5. Análise química da madeira

4.5.1. Composição elementar

Para a análise elementar (carbono, nitrogênio, hidrogênio, enxofre e oxigênio) utilizou-se uma massa equivalente a 2,5 mg ($\pm 0,5$) de serragem seca, selecionada em peneiras sobrepostas de 200 e 270 mesh, utilizando-se a fração retida na peneira de 270 mesh. O equipamento utilizado foi o Vario Micro Cube CHNS-O. Esse aparelho pode atingir temperaturas de até 1200°C e proporciona a combustão da serragem. Ocorrem, então, reações químicas que geram gases que, por sua vez, são conduzidos aos tubos redutores presentes em um compartimento específico. Em seguida, os elementos químicos são individualizados numa sequência induzida de acordo com a massa molecular de cada um e quantificados a partir de um software específico. O valor de oxigênio foi quantificado pelo somatório do C, N, H e S decrescido de 100.

4.5.2. Composição química

A transformação das amostras de madeira em serragem foi realizada utilizando-se um moinho de laboratório tipo Wiley, de acordo com a norma 257 om-52. Coletou-se 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, (ASTM, 1982). A determinação do teor absolutamente seco da madeira foi realizada conforme a norma TAPPI 264 om-88 (TAPPI, 1998).

Os teores de extrativos na madeira foram determinados em duplicatas, de acordo com a norma TAPPI 264 om-88, utilizando o método de extrativos totais, apenas alterando o etanol/benzeno, pelo etanol/tolueno.

Os teores de lignina insolúvel foram determinados em duplicata pelo método Klason, modificado de acordo com o procedimento proposto por Gomide e Demuner (1986), derivado da norma TAPPI T 222 om-88.

A lignina solúvel foi determinada por espectrometria, conforme Goldschimid (1971), a partir da diluição do filtrado proveniente do procedimento para obtenção da lignina insolúvel.

O teor de lignina total foi obtido através da soma dos dois valores de lignina solúvel e insolúvel e o teor de holocelulose foi obtido pelo somatório dos teores de extrativos e lignina totais, subtraído de 100.

4.5.3. 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 adaptações no método descrito por Lin e Dence (1992). Após a pesagem 200 mg a.s. de serragem livre de extrativo, ela 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 maria com glicerina por 2 horas e 30 minutos, a 170°C. Em seguida, o material oxidado foi transferido para um funil de separação e extraído com clorofórmio por cinco vezes, utilizando-se 30 mL do solvente em cada extração. Após a primeira extração, foram adicionados 3 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 m 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: 1,5 mL/minuto, injeção 20µl; padrão cromatográfico: vanilina para guaiacil e siringaldeído para siringil. A pressão utilizada foi de, aproximadamente, 160 kgf/cm².

4.6. Análise termogravimétrica da madeira

Para as análises termogravimétricas, a madeira foi reduzida a serragem, sendo utilizada a fração granulométrica de 270 mesh. A caracterização térmica da madeira foi realizada utilizando equipamento DTG-60 da Shimadzu. As análises foram realizadas sob atmosfera de gás nitrogênio, uma vazão constante de $50\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$. Os termogramas foram obtidos a partir da temperatura ambiente, em torno de 30°C , até a temperatura máxima de 450°C , com uma taxa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$.

4.7. Carbonização e rendimentos gravimétricos

A carbonização foi realizada com amostras de madeiras retiradas dos discos ao longo da altura comercial das árvores (0%, 25%, 50%, 75% e 100%). Para cada árvore, obteve-se uma amostra composta. As amostras foram, então, secas em estufa, a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$, até massa constante.

As carbonizações foram realizadas em mufla de laboratório com aquecimento elétrico, sendo que as amostras foram inseridas em um contêiner metálico. Para a recuperação dos gases condensáveis, adaptou-se na saída dos gases um condensador tubular resfriado a água.

O tempo total de carbonização da madeira foi de cinco horas, com taxa de aquecimento média de $1,56^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$, sendo que a temperatura inicial foi de 30°C e a temperatura final foi de 450°C , estabilizada por um período de 30 minutos. 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.

4.8. Propriedades do carvão

4.8.1. Análise química

Para a análise química imediata do carvão vegetal as amostras foram moídas e peneiradas a uma granulometria de, aproximadamente, $0,2\text{mm}$ de

acordo com a norma ABNT NBR 8112, com algumas adaptações, para a determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, em base seca (ABNT, 1986).

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

O teor de cinzas foi determinado após a combustão completa do carvão, através do 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, subtraído de 100.

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

4.8.2. 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. As amostras de carvão foram pesadas e, posteriormente, imersas em água para determinação do volume deslocado.

4.8.3. Determinação do poder calorífico superior

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

4.9. Estimativa de energia

A massa seca de madeira de cada clone foi obtida a partir da densidade básica (kg/m^3) encontrada em 1 m^3 de madeira. Para o cálculo da energia por m^3 de madeira, expressa em kcal, multiplicou-se a massa seca da madeira (kg) pelo respectivo poder calorífico superior de cada clone, conforme apresentado a seguir:

$$\text{Energia (kcal/m}^3\text{)} = \text{DB} \times \text{PCS}$$

em que Energia (kcal/m^3) = produção energética por metro cúbico de madeira; DB = massa seca da madeira em kg e PCS = poder calorífico superior da madeira em kcal/kg.

Para conversão da energia em kcal/m^3 para kW.h.m^{-3} , dividiu-se os valores em Kcal/m^3 por 860, conforme (SANTOS, 2010).

4.10. Delineamento experimental

O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado, em arranjo fatorial (3×4). Os tratamentos foram constituídos por três materiais genéticos (clones de *Eucalyptus urophylla*: GG 100 e GG 157, e um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*: GG 680) com quatro idades (3, 4, 5 e 7 anos), e três repetições.

Para avaliação das propriedades da madeira foram empregadas seis repetições por tratamento, sendo três árvores amostra com duas repetições por árvore. Já para a avaliação das características do carvão vegetal foram utilizadas três repetições, sendo cada repetição uma árvore amostra.

Os dados foram submetidos aos testes de Lilliefors e Cochran para testar a normalidade e homogeneidade das variâncias, respectivamente. Em seguida, procedeu-se a análise de variância pelo teste F, sendo as médias comparadas pelo teste Tukey. Para as variáveis que não atenderam as pressuposições de normalidade e homogeneidade de variância foi utilizado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. Considerou-se sempre o nível de significância de 5%.

Para determinar as correlações existentes entre as propriedades da madeira e idade com a produção de energia da lenha, foi empregado o coeficiente de correlação de Pearson. Para as correlações significativas foram feitas análises de regressão lineares.

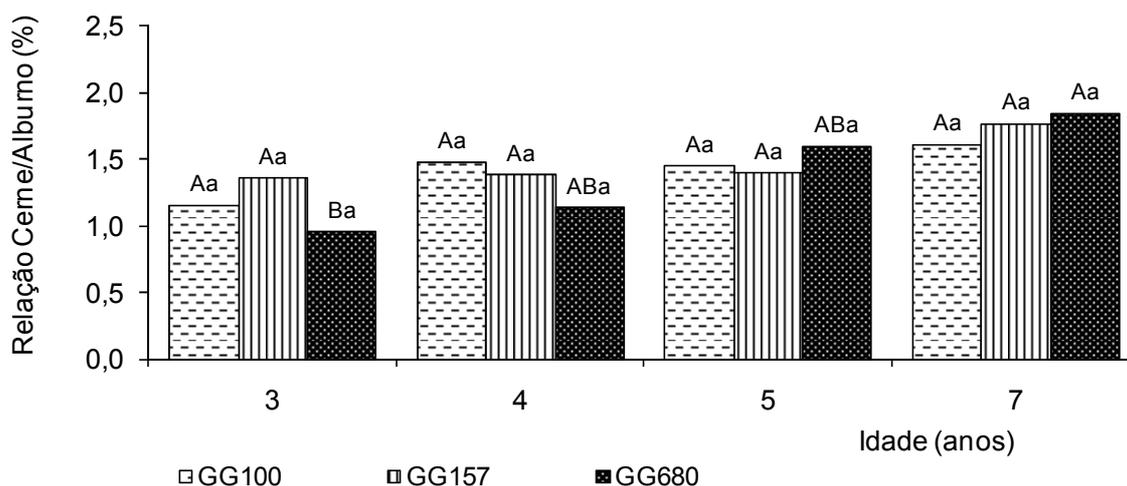
O mesmo procedimento foi utilizado para correlacionar as propriedades da madeira e idade com as propriedades do carvão vegetal. Considerou-se, também, o nível de significância de 5%.

As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa STATISTICA 8.0 (STATSOFT INC., 2008).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Relação cerne/alburno

Na Figura 5 são apresentados os valores médios para a relação cerne/alburno em função dos tratamentos idade e clone.



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

Figura 5 – Relação cerne/alburno da madeira em função da idade e clone.

O efeito da idade foi significativo somente para o clone GG 680 e a maior relação cerne/alburno foi observada aos sete anos, para os três clones avaliados. Observa-se que, em todas as idades, não houve diferença significativa na relação cerne/alburno entre os clones (Figura 5). Os valores médios variaram de 1,16 a 1,61 (GG 100), 1,36 a 1,77 (GG 157) e 0,96 a 1,85 (GG 680).

Resultado semelhante foi observado por Gonçalves et al. (2010), que avaliou as porcentagens de cerne e alburno na madeira de seis árvores de sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia*), na idade de sete anos. Esses autores obtiveram uma porcentagem média de 41,1% de cerne e 58,9% de alburno e relataram que essa alta porcentagem de alburno pode ser atribuída à idade das árvores, uma vez que elas eram jovens (sete anos).

No trabalho desenvolvido por Arantes (2009) que estudou um clone de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, aos seis anos de idade, observou-se que, para as árvores médias, a porcentagem média de cerne foi de 35% e de alburno foi de 65%, ou seja, obteve-se uma relação cerne/alburno de 0,54.

A produção de cerne ocorre conforme a madeira envelhece, deixando de ser útil como tecido de condução, e suas células parenquimáticas morrem. Durante esse processo a madeira geralmente sofre mudanças visíveis, que envolvem a perda de nutrientes de reserva e a infiltração de diversas substâncias (como extrativos), que mudam a coloração e o cheiro da madeira. Nesse processo ocorre a formação de tiloses, que são células de parênquima que entram no lume dos vasos mortos, devido a uma diferença de pressão, e com isso promovem a obstrução dessas células (RAVEN et al., 1996).

A madeira do cerne, geralmente, apresenta coloração mais escura, maior densidade básica, e maior durabilidade natural do que a madeira de alburno. As diferenças nas composições químicas e físicas na madeira de cerne e alburno podem levar a produtos finais com características completamente distintas (TRUGILHO e SILVA, 2001).

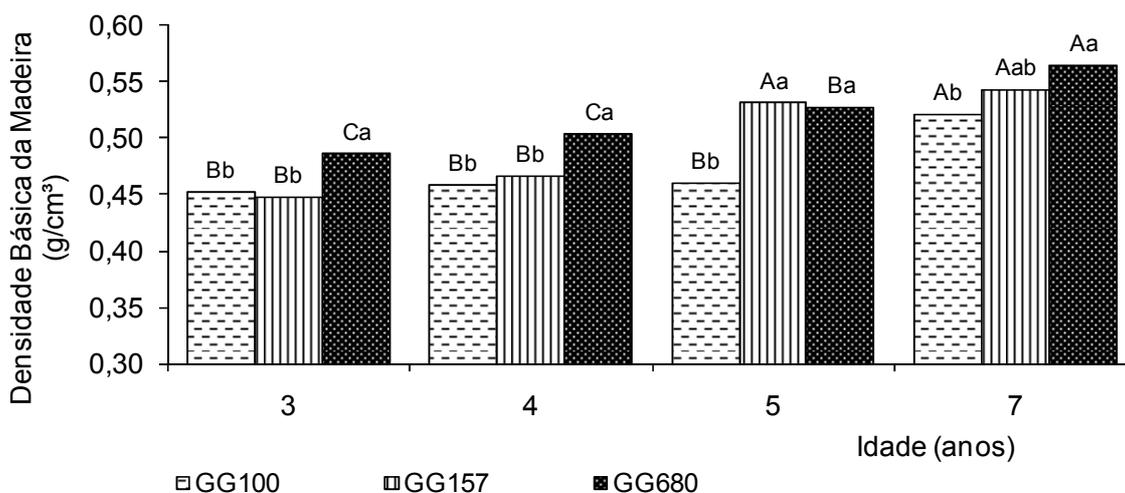
Uma maior relação cerne/alburno pode acarretar problemas durante a secagem da madeira, uma vez que o cerne é impermeável, e dificulta a passagem de água da parte mais interna da madeira para a mais externa, e proporciona uma secagem mais rápida da superfície e, conseqüentemente, ocorrem rachaduras (GALVÃO e JANKOWSKY, 1985).

Da mesma forma, uma maior relação cerne/alburno também pode acarretar problemas durante a carbonização, como a ocorrência de fissuras no carvão, relacionados à impermeabilidade do cerne (presença de tiloses), visto que os gases encontram dificuldades para permear a madeira e acabam

rompendo as fibras. Dessa forma, o carvão se torna mais friável e com menor resistência mecânica.

5.2. Densidade básica da madeira

Na Figura 6 estão apresentados os valores médios para densidade básica da madeira em função dos tratamentos idade e clone.



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

Figura 6 – Densidade básica da madeira em função da idade e clone.

De maneira geral, as madeiras de *Eucalyptus* sp., usadas para a produção de carvão vegetal, devem apresentar densidade básica classificadas como densidade média, em torno de $0,54 \text{ g/cm}^3$ (BRITO et al., 1983).

No presente trabalho observou-se um aumento significativo da densidade básica da madeira com o aumento da idade (Figura 6), sendo que, somente aos sete anos, foram observados valores semelhantes aos valores ideais para a produção de carvão vegetal, conforme estipulado por Birto et al. (1983) ($0,52 \text{ g/cm}^3$; $0,54 \text{ g/cm}^3$; $0,56 \text{ g/cm}^3$ para GG 100, GG 157 e GG 680, respectivamente).

Ainda analisando a Figura 6, verifica-se que houve diferença significativa, para a densidade básica da madeira, entre os clones em todas as

idades, e o clone GG 680 apresentou valores médios superiores nas quatro idades analisadas. Os valores de densidade básica da madeira variaram de 0,45 g/cm³ a 0,52 g/cm³; 0,45 g/cm³ a 0,54 g/cm³; 0,49 g/cm³ a 0,56 g/cm³ para GG 100, GG 157 e GG 680, respectivamente.

Trugilho et al. (1996) estudaram madeira de *Eucalyptus saligna* nas idades de 1, 2, 3 e 4 anos. Verificaram que existe uma tendência de aumento da densidade básica da madeira com o aumento da idade. Aos três anos o valor para densidade básica encontrado foi de 0,50 g/cm³ e aos quatro anos esse valor foi de 0,52 g/cm³, sendo esses valores superiores ao encontrados no presente trabalho, para os clones GG 100 (0,45 g/cm³ aos três anos e 0,46 g/cm³ aos quatro anos), GG 157 (0,45 g/cm³ aos três anos e 0,47 g/cm³ aos quatro anos) e GG 680 (0,49 g/cm³ aos três anos e 0,50 g/cm³ aos quatro anos).

Oliveira et al. (2010) avaliaram um clone de *Eucalyptus pellita* na idade de cinco anos, e encontram um valor de densidade básica da madeira de 0,56 g/cm³. Esse valor foi superior ao encontrado para os três clones avaliados nesse trabalho, que apresentaram, aos cinco anos de idade, os seguintes valores para densidade básica da madeira: 0,46 g/cm³; 0,53 g/cm³; 0,53 g/cm³ para GG 100, GG 157, GG 680, respectivamente.

Santos (2010) que avaliou três clones híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* e um clone híbrido *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus grandis* aos sete anos, observou valores médios de densidade básica superiores a 0,54 g/cm³ sendo semelhante aos valores encontrados no presente trabalho. Esse valor de densidade básica da madeira é importante 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.

Segundo Vital (1984) existe a tendência da densidade básica aumentar com a maturidade da árvore como conseqüência do aumento da espessura da parede celular e diminuição da largura das células.

De acordo com Panshin e Zeeuw (1980) a densidade básica da madeira apresenta um rápido aumento durante o período juvenil, passando para um

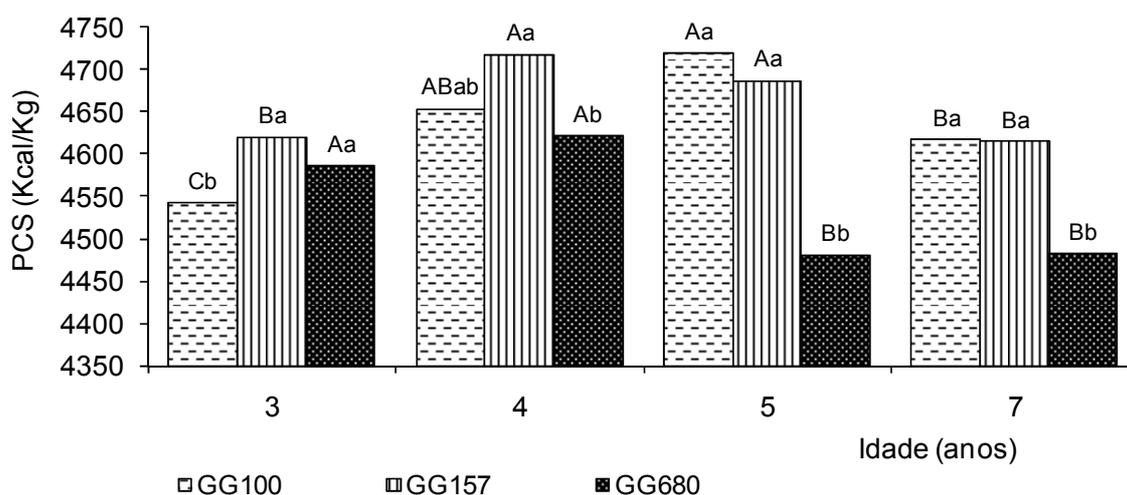
crescimento mais lento na fase intermediária até se tornar mais ou menos constante, quando a árvore atinge a maturidade.

A densidade básica da madeira está diretamente relacionada com a produção de energia, ou seja, quanto maior a densidade, maior a quantidade de energia estocada por metro cúbico. Portanto, essa característica é muito importante para a escolha de espécies para queima direta da madeira. Por outro lado, a densidade da madeira mais elevada, resulta em maiores densidades e resistência do carvão, bem como uma maior quantidade de massa enfiada, reduzindo os custos de produção e aumentando a produtividade das unidades de produção de carvão (UPC's), e nos altos fornos (BRITO, 1993).

5.3. Poder calorífico superior da madeira

Na Figura 7 estão apresentados os valores médios para poder calorífico superior da madeira em função dos tratamentos idade e clone.

O poder calorífico superior da madeira não apresentou homogeneidade de variância, portanto foi realizada uma análise não paramétrica, aplicando-se o teste de Kruskal-Wallis.



Médias seguidas da mesma letra maiúscula entre as idades e minúscula entre os clones, não diferem entre si. Todos a 5% de significância, pelo teste Kruskal-Wallis.

Figura 7 – Poder Calorífico Superior (Kcal/Kg) da madeira em função da idade e clone.

Analisando a Figura 7, observa-se que houve efeito da idade no poder calorífico superior da madeira, e diferença significativa entre os clones, em todas as idades. Os valores médios de poder calorífico superior da madeira obtidos no presente trabalho foram de 4633 Kcal/Kg (GG 100), 4660 Kcal/Kg (GG 157) e 4542 Kcal/Kg (GG 680).

Santana (2009) observou pouca influência da idade para essa variável, e obteve um valor médio de 4610 Kcal/Kg, para um clone de *Eucalyptus grandis* dos três aos sete anos.

Oliveira et al. (2010) estudaram um clone de *Eucalyptus pellita* na idade de cinco anos e encontraram para a variável poder calorífico superior um valor médio de 4630Kcal/Kg, sendo próximo aos valores encontrados no presente trabalho. Resultados semelhantes foram obtidos por Santos (2010), que estudou quatro clones híbridos de *Eucalyptus* sp., aos sete anos, e obteve valores que variaram de 4.274Kcal/Kg a 4.585Kcal/Kg.

O poder calorífico superior da madeira apresenta pequena variação dentro de uma mesma espécie, o que pode ser observado nesse trabalho, uma vez que os valores variaram de 4542Kcal/Kg a 4719Kcal/Kg; de 4615Kcal/Kg a 4718Kcal/Kg e de 4480Kcal/Kg a 4621Kcal/Kg, para os clones GG 100, GG 157 e GG 680, respectivamente. Entretanto, entres espécies existe variação um pouco maior, como pode ser observado pelo trabalho desenvolvido por Quirino et al. (2005), que realizou um levantamento bibliográfico, dessa variável, para diversas espécies e encontrou valores que variaram de 3350 Kcal/Kg a 5260 Kcal/Kg.

Algumas variáveis afetam o poder calorífico da madeira como a composição química, principalmente o teor de lignina, o teor de extrativos e o teor de cinzas (SANTOS, 2010).

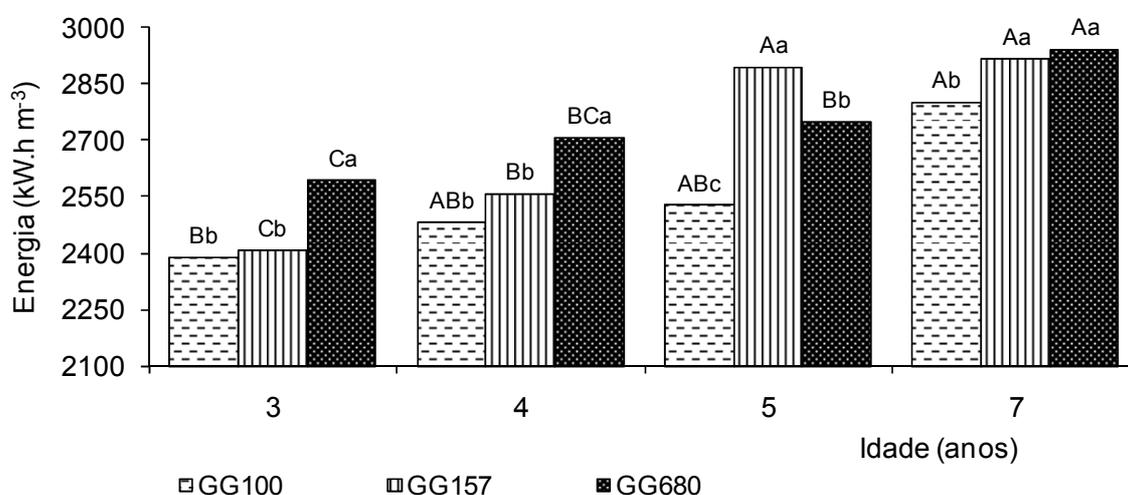
A característica da madeira que mais influencia o poder calorífico é o teor de umidade. Portanto, é inevitável que ocorra uma perda de calor nos gases de combustão em forma de vapor de água, já que a umidade da madeira evapora e absorve energia em combustão (QUIRINO et al., 2005), ou seja, necessita de energia para evaporá-la (BRITO e BARRICHELO, 1979).

O poder calorífico é uma das principais variáveis usadas para a seleção de espécies com melhores características para fins energéticos, uma vez que

esta relacionada com a quantidade de energia liberada pela madeira durante a sua queima. A quantidade de calor desprendida da madeira é muito importante para conhecer a capacidade energética de uma determinada espécie (SANTOS, 2010).

5.4. Energia da madeira

Na Figura 8 estão apresentados os valores médios para quantidade de energia por m^3 em função dos tratamentos idade e clone.



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

Figura 8 – Quantidade de energia produzida por m^3 em função da idade e clone.

Analisando a Figura 8 observa-se que a quantidade de energia armazenada em um metro cúbico de madeira aumentou com o aumento da idade, seguindo a mesma tendência da densidade básica da madeira. O clone GG 100 apresentou os menores valores para essa variável, observando uma variação de 2389 kW.h.m^{-3} a 2801 kW.h.m^{-3} , enquanto que o clone GG 680 apresentou o melhor desempenho para essa variável, sendo que os valores médios variaram de 2594 kW.h.m^{-3} a 2943 kW.h.m^{-3} . Pode-se dizer que a densidade básica da madeira foi a variável que mais contribuiu para o melhor

desempenho desse clone. Os valores médios para o clone GG 157 variaram de 2408 kW.h.m⁻³ a 2916 kW.h.m⁻³.

Esses valores estão próximos aos resultados obtidos por Santos (2010), que obteve valores variando de 2537 kW.h.m⁻³ a 2926 kW.h.m⁻³ para a quantidade de energia/m³, de clones de *Eucalyptus* sp., aos sete anos. Entretanto, esses valores foram superiores aos encontrados por Rocha (2011) que ao estudar um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* nas idades de quatro, cinco, seis e sete anos, obteve valores médios de energia/m³ variando de 1821 kW.h.m⁻³ a 2464 kW.h.m⁻³.

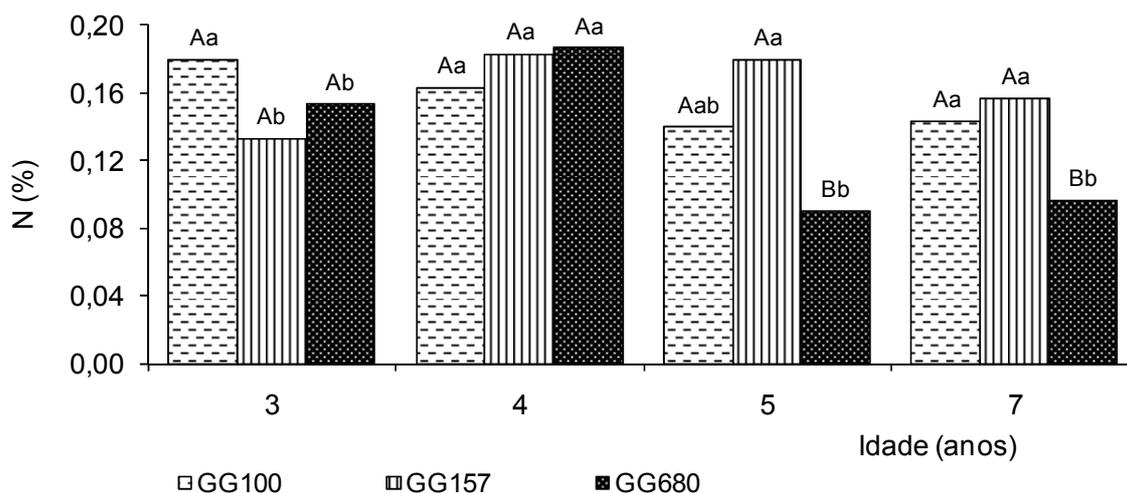
Cabe ressaltar que a escolha do melhor material genético deve levar em consideração as características tecnológicas da madeira, bem como a sua produtividade e efetividade técnica de produção.

5.5. Composição química elementar

Quando se utiliza biomassa para energia, a composição elementar é uma propriedade do combustível muito importante e constitui a base para análise do processo de combustão.

De maneira geral a composição elementar da madeira não varia muito, e os valores médios são: 50% de carbono; 6% de hidrogênio; 43% oxigênio, 0,15% de nitrogênio e 1% de cinzas (RAAD, 2004).

Na Figura 9 são apresentados os valores médios do teor de nitrogênio presente na madeira dos três clones em estudo em função da idade e clone.



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

Figura 9 – Teor de nitrogênio (N%) na madeira em função da idade e clone.

Analisando a Figura 9 observa-se que não houve influência da idade no teor de nitrogênio, exceto para o clone GG 680, que apresentou menores teores desse elemento nas idades de cinco e sete anos. Entre os clones ocorreu diferença significativa para todas as idades, exceto aos quatro anos.

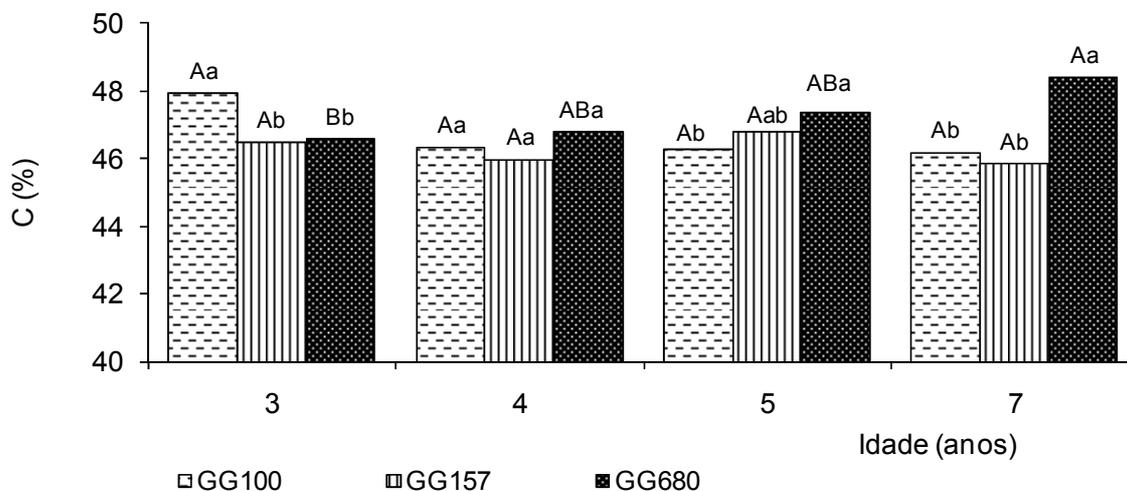
Os valores médios para o teor de nitrogênio variaram de 0,14 a 0,18; 0,13 a 0,18; 0,09 a 0,19, para os clones GG 100, GG 157 e GG 680, respectivamente.

Esses valores estão próximos aos obtidos por Santana (2009) ao estudar um clone de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, na idade de três e quatro anos, que obteve teores de nitrogênio que variaram de 0,09% a 0,13%.

Santos (2010) encontrou teores de nitrogênio variando de 0,16% à 0,20%, para madeira de clones de *Eucalyptus* sp. aos sete anos, sendo superiores para todos os clones avaliados no presente trabalho, nessa mesma idade (GG 100: 0,14; GG 157: 0,16; GG 680: 0,10).

O uso da madeira como combustível requer a caracterização elementar, visando, o conhecimento das quantidades presentes de nitrogênio, pois altas concentrações desse elemento têm impacto negativo no meio ambiente e na saúde humana devido à emissão de óxido nítrico, produzidos durante o processo de combustão (SANTANA, 2009).

Na Figura 10 estão apresentados os valores médios de teor de carbono presente na madeira dos três clones em estudo em função da idade.



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

Figura 10 – Teor de carbono (C%) na madeira em função da idade e clone.

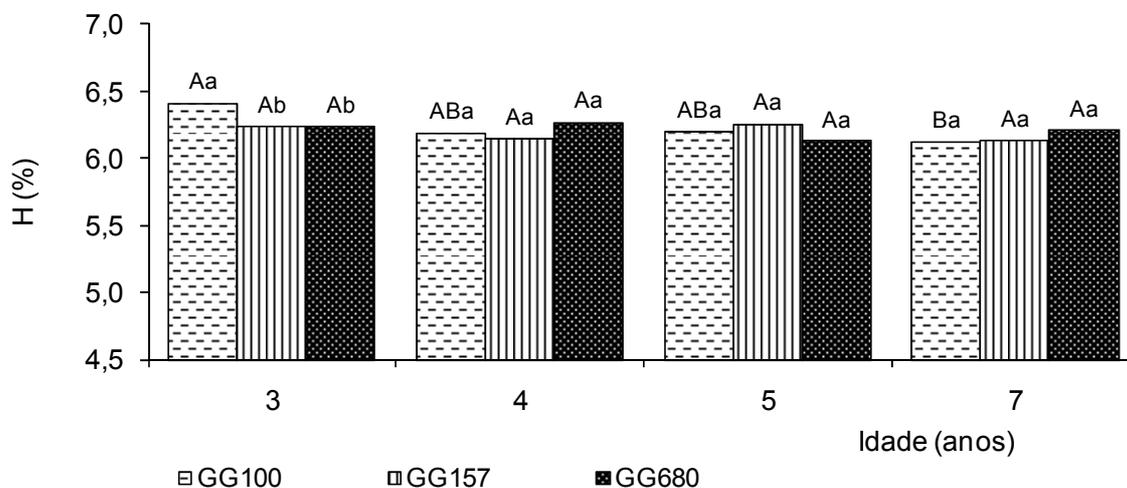
Analisando a Figura 10 observa-se que não houve influência da idade no teor de carbono, exceto para o clone GG 680, que apresentou aumento do teor de carbono com o aumento da idade. Observa-se que houve efeito significativo do clone nas diferentes idades avaliadas, exceto na idade quatro anos.

O maior valor encontrado para o teor de carbono foi de 48,42% para o clone GG 680 aos sete anos, e o menor valor foi de 45,84% para o clone GG 157 aos sete anos. Esses valores estão de acordo com os apresentados por Santos (2010), que obteve teores de carbono variando de 47,23% a 48,04%, para quatro clones de *Eucalyptus* sp., aos sete anos.

Resultado semelhante foi observado por Santana (2009), que obteve para um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, nas idades de três, quatro, cinco, seis e sete anos, valores que variaram de 48,65% a 48,93%.

O teor de carbono é muito importante, tanto para a produção de carvão vegetal, quanto para a queima direta da madeira. Na queima direta ele é totalmente consumido, enquanto que na produção de carvão vegetal, o carbono é convertido em carbono fixo, e é o principal responsável pela energia estocada no carvão.

Na Figura 11 são apresentados os valores médios de teor de hidrogênio presente na madeira em função da idade e clone.



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

Figura 11 – Teor de hidrogênio (H%) na madeira em função da idade e clone.

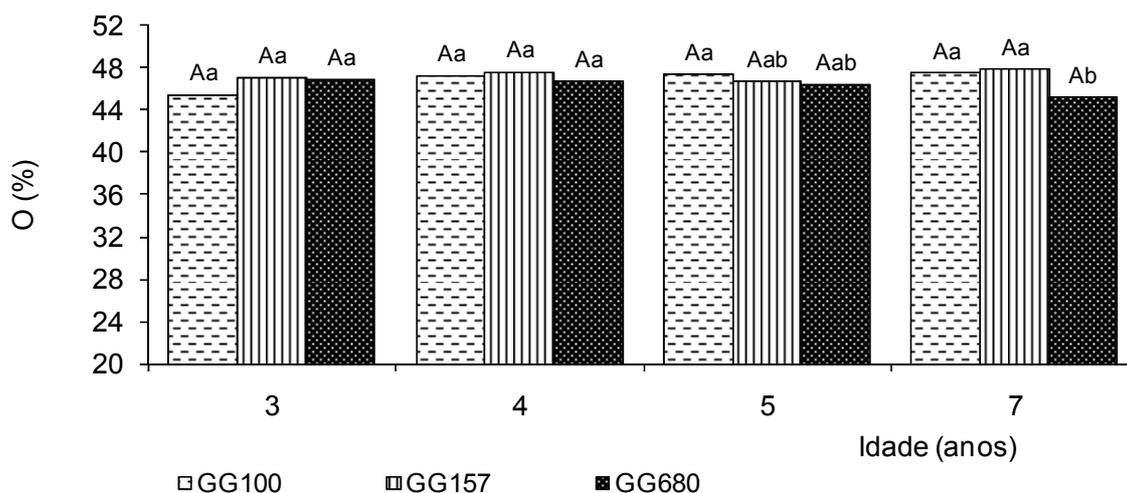
Verifica-se que não houve influência da idade no teor de hidrogênio, exceto para o clone GG 100. Entre os clones não houve diferença significativa, exceto aos três anos (Figura 11).

O maior valor médio obtido para o teor de hidrogênio foi de 6,41% para o clone GG 100 aos três anos de idade, e o menor foi de 6,13% encontrados para o clone GG 100 aos sete anos e para o clone GG 680 aos cinco anos. Esses resultados estão de acordo com o estudo desenvolvido por Arantes (2009) que encontrou um valor médio de 6,35%, para um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, aos seis anos; por Santos (2010), que obteve teores de hidrogênio variando de 6,32% a 6,68%, para quatro clones de *Eucalyptus* sp., aos sete anos e por Santana (2009) que obteve teores de hidrogênio variando de 6,55% a 6,74%, para um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*.

O hidrogênio libera durante a queima mais energia do que o carbono. Mesmo estando presente na madeira em pequenas quantidades, o teor de hidrogênio apresenta grande importância na geração de energia. Por outro lado, durante a produção de carvão vegetal a medida que se degrada a

madeira ocorre uma concentração de carbono e um decréscimo nos teores de nitrogênio e hidrogênio, sendo que acima de 500°C, ocorre perda excessiva de hidrogênio devido a fase de dissociação dos mesmos, não observando aumento do poder calorífico superior mesmo com concentração de carbono.

Na Figura 12 estão apresentados os valores médios de teor de oxigênio presente na madeira em função da idade e clone.



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

Figura 12 – Teor de oxigênio (O%) na madeira em função da idade e clone.

Verifica-se na Figura 12 que não houve influência da idade no teor de oxigênio, independente do clone. Entre os clones não ocorreu diferença significativa para as idades de três e quatro anos, sendo que aos cinco e sete anos a diferença foi significativa.

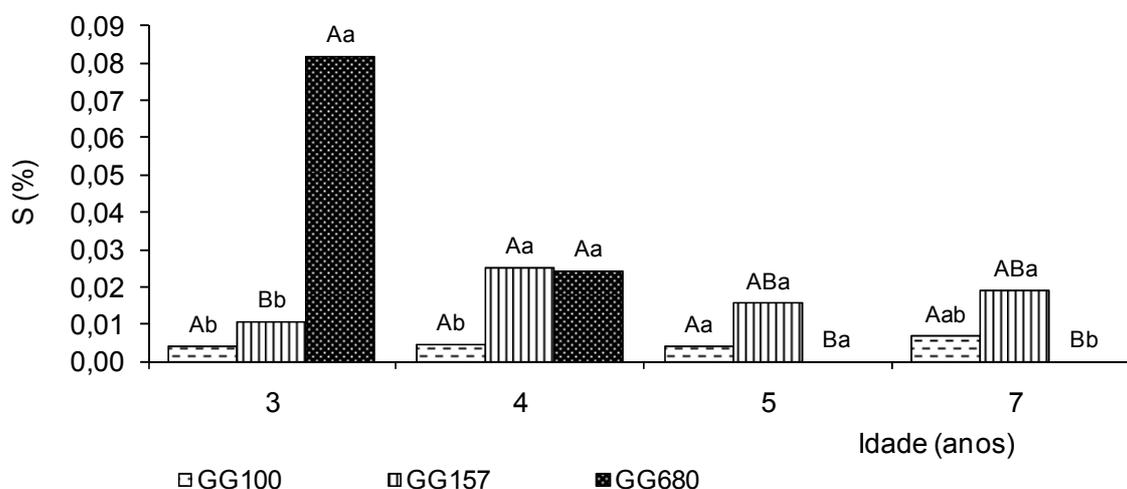
O maior valor encontrado para o teor de oxigênio foi de 47,85% para o clone GG 157 aos sete anos de idade, e o menor foi de 45,28% obtido para o clone GG 680, aos sete anos. Esses valores estão próximos aos resultados obtidos por Santos (2010), que encontrou teores de oxigênio variando de 44,21% a 46,02%, para clones de *Eucalyptus* sp., aos sete anos.

Arantes (2009) avaliando um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, aos seis anos, obteve resultados superiores ao apresentado no presente estudo e encontrou um valor médio de 43,47%.

Ao contrário do carbono e do hidrogênio, o oxigênio contribui negativamente para o poder calorífico, sendo assim, compostos com maiores teores de oxigênio implicam em menor energia armazenada.

Na Figura 13 são apresentados os valores médios de teor de enxofre presente na madeira em função da idade e clone.

O teor de enxofre da madeira não apresentou homogeneidade de variância, portanto foi realizada uma análise não paramétrica, aplicando-se o teste de Kruskal-Wallis.



Médias seguidas da mesma letra maiúscula entre as idades e minúscula entre clones, não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Kruskal-Wallis.

Figura 13 – Teor de enxofre (S%) na madeira em função da idade e clone.

De maneira geral, pela Figura 13, verifica-se que houve efeito da idade no teor de enxofre para os clones GG 157 e GG 680. Observa-se que houve diferença significativa entre os clones, exceto na idade de cinco anos. Para o clone GG 680, nas idade de cinco e sete anos, o teor de enxofre foi zero.

O valor máximo encontrado para o teor de enxofre foi de 0,08%, sendo este valor compatível com os obtidos por Santos (2010), que encontrou valores variando de 0,08% a 0,12%, para clones de *Eucalyptus* sp aos sete anos, e com os valores observados por Santana (2009), que obteve valores variando de 0,04% a 0,12%, para um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*.

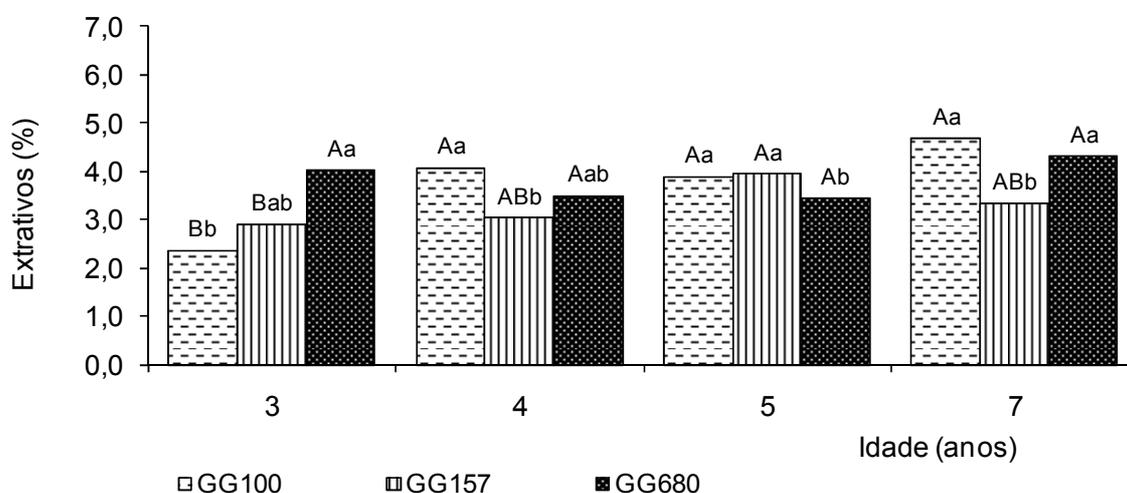
O enxofre juntamente com as cinzas são considerados como as principais impurezas dos combustíveis (QUIRINO et al., 2005). Uma vez que a madeira apresenta baixos teores de enxofre, torna-se uma vantagem ambiental comparativa em relação aos combustíveis fósseis, como o carvão mineral, (BRITO e BARRICHELO, 1979).

A combustão do enxofre gera o dióxido de enxofre (SO₂), que pode combinar-se com a água formando ácido sulfúrico diluído (QUIRINO et al., 2005). Assim como acontece para o nitrogênio, a presença de enxofre é prejudicial para o meio ambiente e para a saúde humana.

5.6. Análise química

5.6.1. Extrativos

Na Figura 14 são apresentados os valores médios de teor de extrativos totais presente na madeira em função da idade e clone.



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

Figura 14 – Teor de extrativos totais na madeira em função da idade e clone.

Na Figura 14, observa-se que houve efeito da idade, no teor de extrativos, para os clones GG 100 e GG157, e além disso, verifica-se uma diferença significativa entre os clones em todas as idades avaliadas.

Os valores médios obtidos para teor de extrativos foram de 2,37% a 4,68%, 2,91% a 3,94%, 3,50% a 4,31% para os clones GG 100, GG 157 e GG 680, respectivamente. Gomide et al. (2005), avaliaram dez clones de *Eucalyptus* sp., e encontraram teores de extrativos que variaram de 1,76% a 4,13%, sendo que o valor médio para esses clones foi de 3,01%. Esses valores estão próximos aos valores obtidos no presente trabalho.

Santana (2009) estudando um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, nas idades de três, quatro, cinco, seis e sete anos, verificou um aumento no teor de extrativos totais da madeira com o aumento da idade. Os valores médios encontrados por essa autora variaram de 3,10% a 4,36%, sendo semelhantes aos observados no presente estudo.

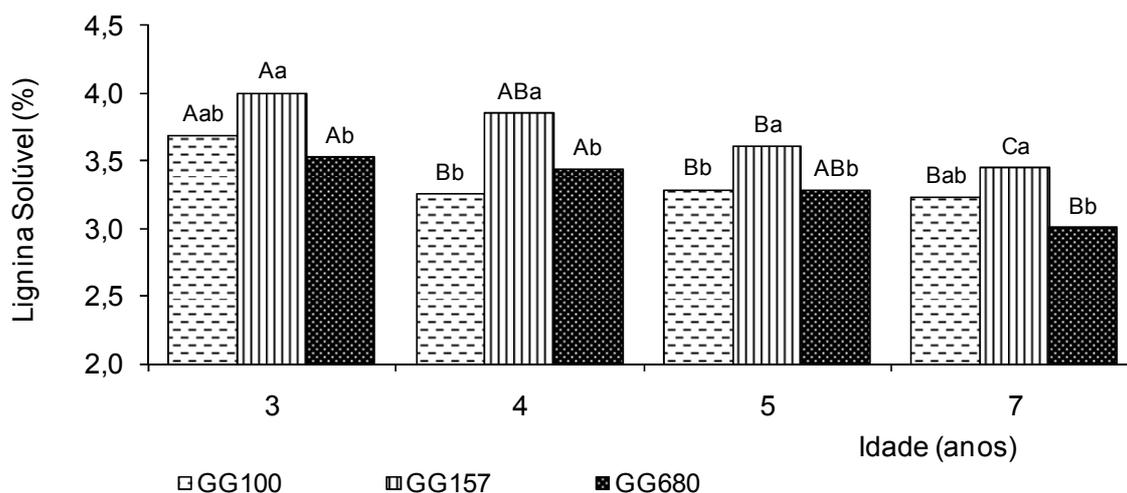
Silva (2011) estudou um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, nas idades de quatro, cinco, seis e sete anos, e verificou um aumento no teor de extrativos com o incremento em idade, variando de 4,23% a 5,74%.

Oliveira et al. (2010) estudaram um clone de *Eucalyptus pelita* aos cinco anos e encontraram um valor médio de extrativos de 4,53%, sendo mais elevado do que os valores médios encontrado no presente trabalho, para essa idade.

O teor de extrativos presentes na madeira está diretamente relacionado com a geração de energia através da queima direta da madeira. Isso se deve ao fato de grande parte dos extrativos serem voláteis, e se degradarem a baixas temperaturas, liberando energia. Entretanto, para a produção de carvão vegetal, a presença de maiores teores de extrativos é indesejável, uma vez que, para essa finalidade, é ideal que a madeira apresente maiores quantidades de compostos estáveis termicamente, como é o caso da lignina.

5.6.2. Lignina solúvel

Na Figura 15 são apresentados os valores médios de teor de lignina solúvel em função da idade e clone.



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

Figura 15 – Teor de lignina solúvel na madeira em função da idade e clone.

De maneira geral, houve uma tendência significativa de diminuição no teor de lignina solúvel com o aumento da idade, para os três clones em estudo. Além disso, observa-se que ocorreu diferença significativa entre os clones, para todas as idades estudadas.

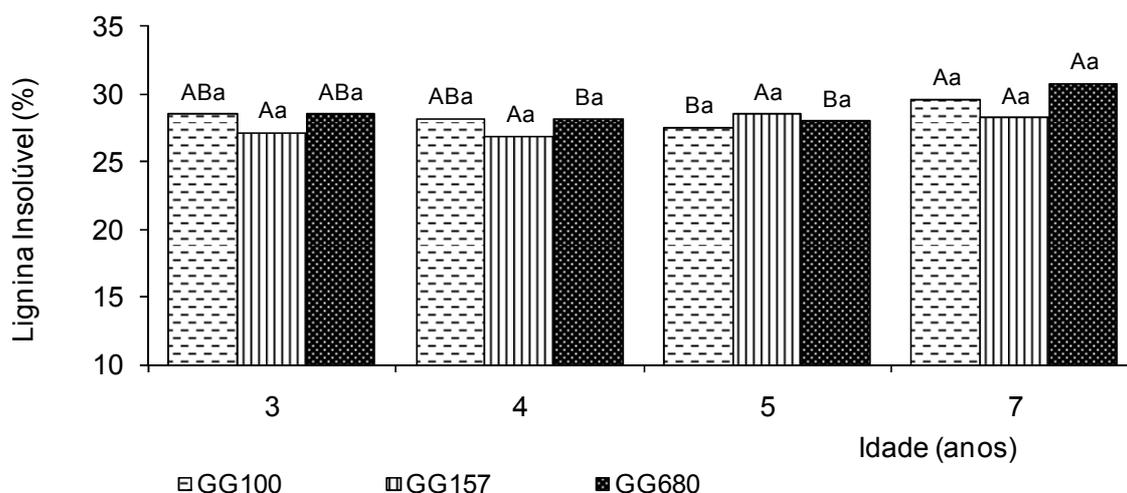
Os valores de lignina solúvel encontrados nesse trabalho variaram de 3,01% a 4,01%. Esses valores estão próximos aos valores obtidos por Gomide et al. (2005) que encontraram teores de lignina solúvel variando de 3,1% a 5,1%, para dez clones de *Eucalyptus* sp.

Arantes (2009) avaliou clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, aos seis anos, e encontrou valores médios de 3,01%, sendo esses valores próximos aos observados no presente trabalho.

Entretanto, Trugilho et al. (2001), que obtiveram para os clones de *Eucalyptus grandis* teores que variaram de 1,18% a 1,76%, e para os clones de *Eucalyptus saligna* valores que variaram de 1,00% a 1,39%, inferiores aos obtidos no presente trabalho.

5.6.3. Lignina insolúvel

Na Figura 16 são apresentados os valores médios de teor de lignina insolúvel presente na madeira em função da idade e clone.



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

Figura 16 – Teor de lignina insolúvel na madeira em função da idade e clone.

Analisando a Figura 16 observa-se que houve efeito significativo da idade no teor de lignina insolúvel, para os clones GG 100 e GG 680. Além disso, não ocorreu diferença significativa entre os clones, em todas as idades.

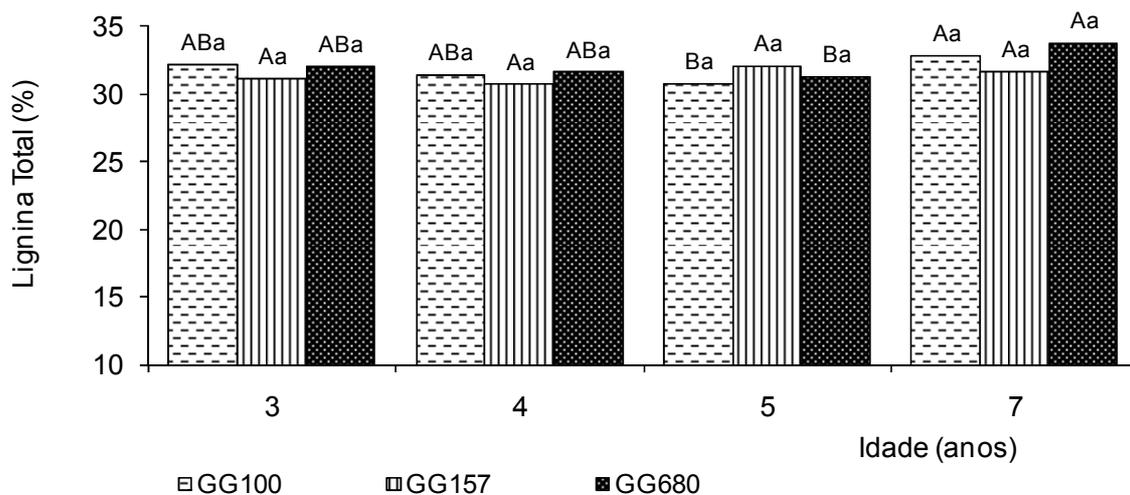
Os teores de lignina insolúvel, no presente trabalho, variaram de 26,87% a 30,81%. Esses valores estão de acordo com os resultados encontrados por Trugilho et al. (2001), que obtiveram para os clones de *Eucalyptus grandis* valores que variaram de 27,93% a 32,75%, e para os clones de *Eucalyptus saligna* os valores variaram de 30,10% a 30,62%.

Valores semelhantes foram encontrados por Arantes (2009), que obteve para clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, aos sete anos, um valor médio, para lignina insolúvel, de 26,97%.

Entretanto, os valores encontrados no presente trabalho, foram ligeiramente superiores aos obtidos por Gomide et al. (2005), que observou teores de lignina insolúvel variando de 22,4% a 28,6%.

5.6.4. Lignina total

Na Figura 17 estão apresentados os valores médios de teor de lignina total presente na madeira em função da idade e clone.



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

Figura 17 – Teor de lignina total na madeira em função da idade e clone.

De acordo com a Figura 17, observa-se que houve efeito da idade para os clones GG 100 e GG 680, e que não ocorreu diferença significativa entre os clones, em nenhuma idade avaliada.

Os resultados encontrados nesse trabalho para o teor de lignina total variaram de 30,73% a 33,82%. Esses valores estão próximos aos obtidos por Santos (2010), que verificou, para clones de *Eucalyptus* sp. aos sete anos, valor médio de 32%.

Rocha (2011) avaliou clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis*, em diferentes espaçamentos e na idade de sete anos, e obteve um valor médio para essa variável de 31,56%.

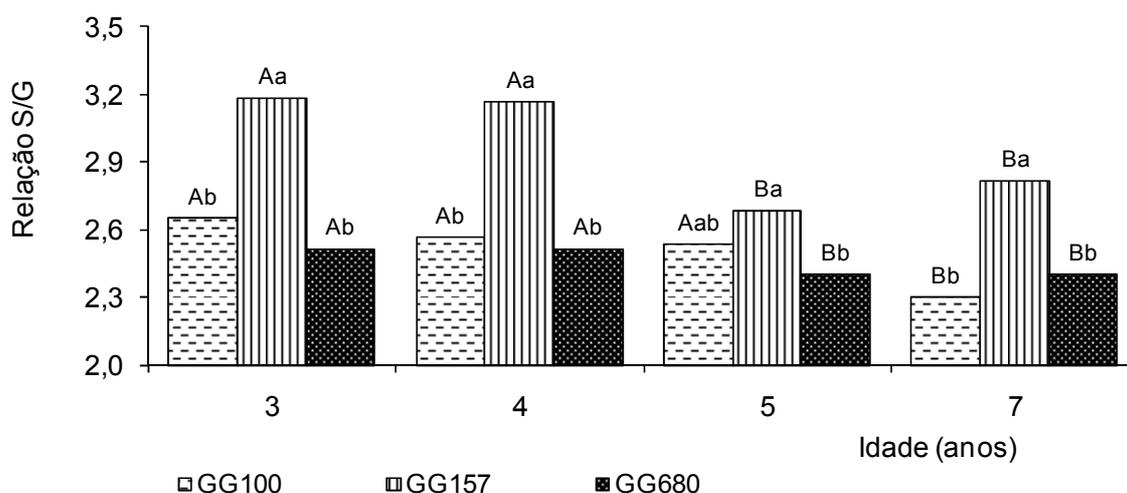
Valores inferiores aos obtidos no presente estudo foram encontrados por Gomide et al. (2005), que estudaram dez clones de *Eucalyptus* sp. e encontraram teores de lignina total variando de 27,5% a 31,7%, sendo que o valor médio foi de 29,3%. Vale ressaltar que os clones estudados por esses autores foram provenientes de empresas produtoras de celulose, que buscam no melhoramento genético, menores teores de lignina total.

A lignina é um componente químico que mais contribui para o rendimento gravimétrico durante o processo de carbonização em função da sua maior resistência à degradação térmica (SANTOS, 2010). Sendo assim, é o

principal componente da madeira responsável pela presença de carbono fixo no carvão vegetal. Já na queima direta, a lignina é completamente degradada e contribui para a liberação de energia.

5.6.5. Relação Siringil/Guaiacil

Na Figura 18 estão apresentados os valores médios de relação S/G na madeira em função da idade e clone.



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

Figura 18 – Relação S/G na madeira em função da idade e clone.

Analisando a Figura 18, pode-se dizer que, de maneira geral, ocorreu uma diminuição da relação S/G com o aumento da idade, para os três clones avaliados. Além disso, observa-se a existência de diferença significativa entre os clones.

Os valores médios para a relação S/G variaram de 2,7 a 2,3; de 3,2 a 2,8; de 2,5 a 2,4 para os clones GG 100, GG 157 e GG 680, respectivamente. Esses valores estão de acordo com Santos (2010), que obteve para quatro clones híbridos de *Eucalyptus* sp., aos sete anos, valores médios que variaram de 2,6 a 3,25.

Os valores obtidos por Gomes (2007) foram próximos aos observados no presente trabalho, uma vez que variaram de 2,72 a 2,98, para clones de *Eucalyptus* sp., nas idades de três anos.

Esses valores foram ligeiramente superiores aos encontrados por Gomide et al. (2005), que obtiveram uma relação S/G de 2,32, para dez clones de *Eucalyptus* sp.

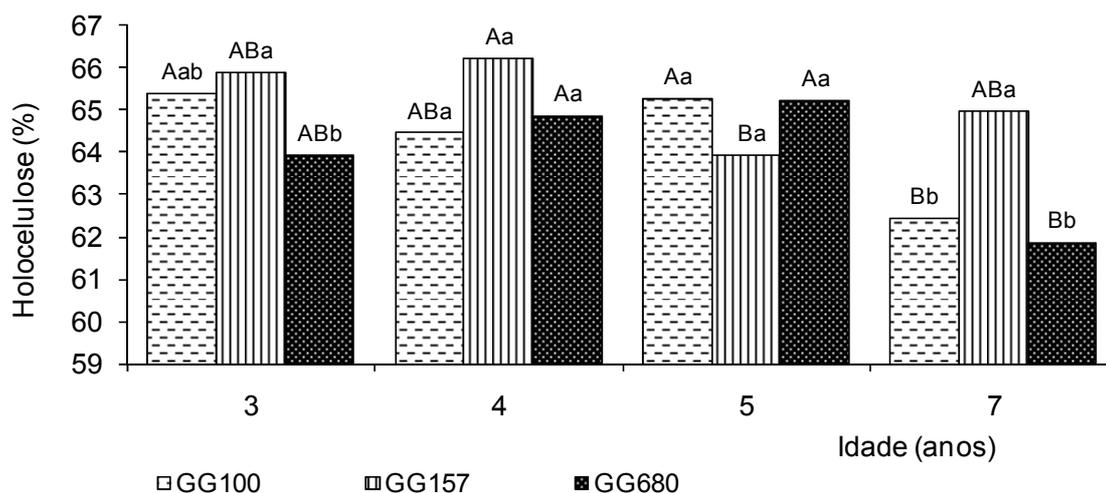
De acordo com Santos (2010) a lignina é um componente desejável na conversão da madeira em carvão e seu teor e tipo são parâmetros importantes, do ponto de vista industrial. Isso porque, de modo geral, espera-se que quanto maior a proporção de lignina total e menor a relação siringil/guaiacil, maior será a conversão em carvão vegetal em função da maior resistência à degradação térmica, promovida pela presença de estruturas mais condensadas.

A lignina do tipo guaiacil apresenta estrutura mais condensada, e conseqüentemente, mais resistente à degradação térmica, uma vez que apresenta apenas um grupo metoxílico ligado ao anel fenólico e por apresentar o carbono C5 disponível para reações durante a etapa de polimerização durante a biossíntese da lignina (GOMIDE et al., 2005).

De maneira geral, houve uma diminuição na relação S/G com o aumento da idade, o que indica que a utilização de madeiras mais velhas deve ser mais vantajoso, no que diz respeito à qualidade da madeira. Pode-se destacar o clone GG 680 que apresentou valores mais baixos para a relação S/G, em todas as idades.

5.6.6. Holocelulose

Na Figura 19 são apresentados os valores médios para o teor de holocelulose na madeira em função da idade e clone.



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

Figura 19 – Teor de holocelulose na madeira em função da idade e clone.

Analisando a Figura 19 observa-se que houve efeito da idade para os três clones avaliados. Observa-se, também, que existe diferença significativa entre os clones em todas as idades, exceto aos quatro e cinco anos.

Os valores para o teor de holocelulose da madeira variaram de 62,46% a 65,41%; 63,95% a 66,24%; 61,88% a 65,24% para os clones GG100, GG 157, GG 680, respectivamente.

Santos (2010) obteve resultado semelhante ao estudar clones de *Eucalyptus* sp., aos sete anos, uma vez que o valor médio para essa variável foi de 65,0%.

No entanto, Frederico (2009) encontrou valores médios superiores, que variaram de 68,71% a 69,94%, para clones de *Eucalyptus* sp., aos três anos.

O teor de holocelulose é inversamente proporcional ao teor de lignina, dessa forma, para a produção de carvão vegetal, madeiras com menores teores de holocelulose devem ser preferidas.

5.7. Correlações entre idade e relação S/G; idade e energia/m³, e relação S/G e energia/m³

Na Tabela 3 estão apresentadas as correlações existentes entre idade e relação S/G; idade e energia/m³, e relação S/G e energia/m³ para os clones GG 100, GG 157 e GG 680, e entre os clones.

Essas correlações foram realizadas, visto que essas variáveis destacam-se no objetivo do trabalho.

Tabela 3 – Correlações entre idade e relação S/G; idade e energia/m³, e relação S/G e energia/m³

Clone GG100	Energia (kW.h.m ⁻³)	S/G
Idade	0,90*	-0,83*
S/G	-0,74*	-
Clone GG157		
Idade	0,85*	-0,69*
S/G	-0,87*	-
Clone GG157		
Idade	0,86*	-0,49*
S/G	-0,51*	-
Todos Clones		
Idade	0,79*	-0,45*
S/G	-0,44*	-

Em que: (S/G) relaçãoiringil/guaiacil. *Correlações significativas a 5%, pelo teste t.

De acordo com a Tabela 3, observa-se que a idade apresentou correlação positiva com a energia/m³ e negativa com a relação S/G para os três clones separadamente, e seguiu a mesma tendência quando se avaliou os três clones conjuntamente. A relação S/G apresentou correlação negativa com a energia/m³, em todas as situações avaliadas.

A diminuição da relação S/G, independentemente do material genético, ocasionou um aumento da quantidade de energia da madeira/m³ com o aumento da idade, indicando um ganho da densidade energética da madeira. Isso ocorreu, provavelmente, devido ao aumento da fração de lignina guaiacil, que possui o carbono C5 disponível para realizar ligações com outros anéis fenólicos, criando uma estrutura mais condensada e, conseqüentemente, mais estável termicamente.

A relação funcional observada entre as variáveis idade, relação S/G e energia estimada está apresentada na Figura 20.

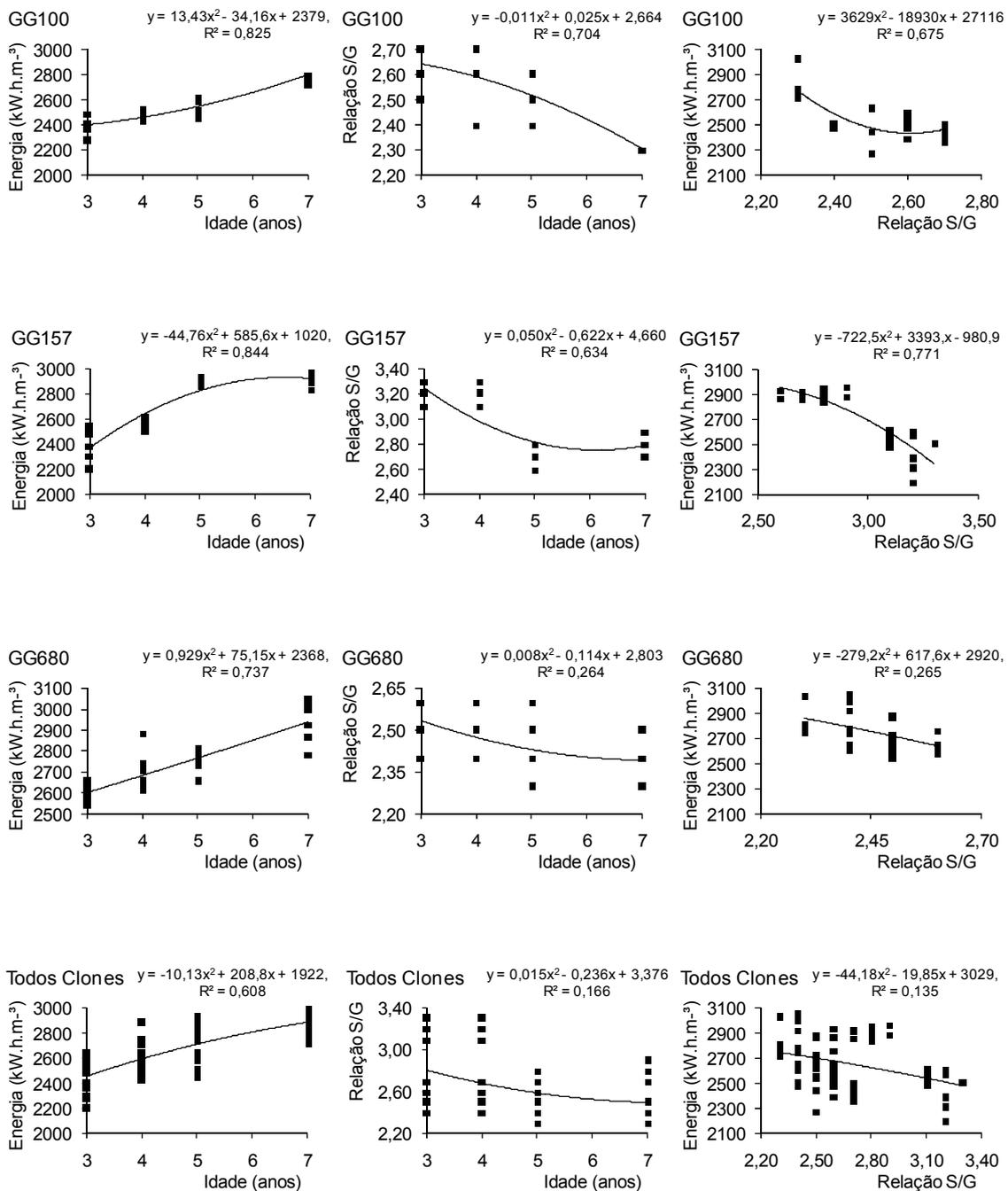


Figura 20 – Regressões realizadas para as correlações significativas.

5.8. Análises termogravimétricas da madeira

Na Figura 21 estão apresentados os termogramas referentes às análises de TGA em função da idade e dos materiais genéticos.

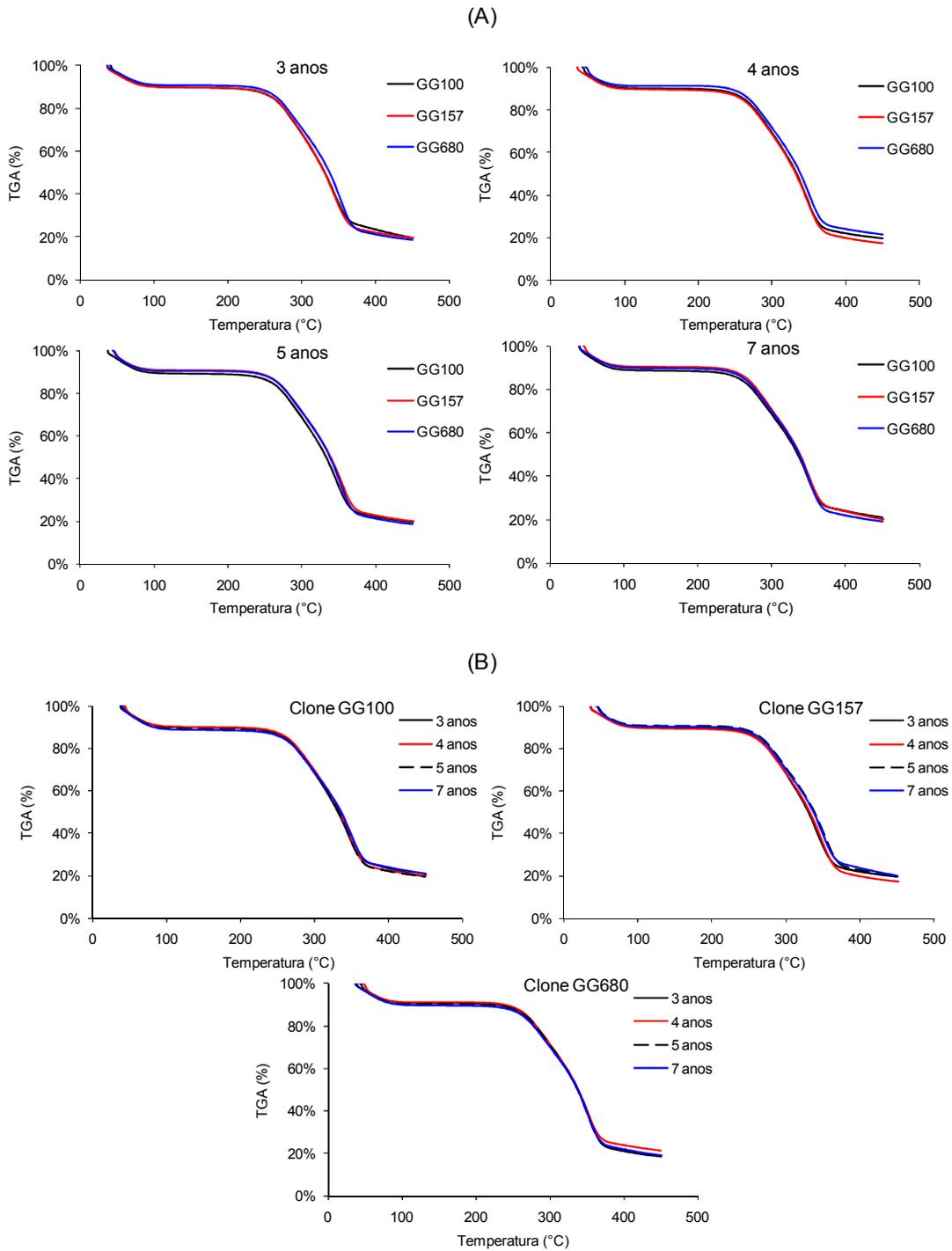


Figura 21 – Termogramas referentes as análise de TGA em função das idades (A) e em função dos clones (B).

Na Tabela 4 está representada a perda de massa (%) em função das faixas de temperatura para os três clones para cada idade.

Analisando a Tabela 4, observa-se que de modo geral, o clone GG 100 apresentou o maior valor médio de massa residual (20,0%), independente da idade. Observa-se que o clone GG 680, aos quatro anos, apresentou a maior massa residual (21,5%), enquanto que o clone GG 157, também aos quatro anos, apresentou o menor valor (17,5%), até a temperatura de 450°C. Campos (2008) obteve rendimento gravimétrico para a temperatura final de 450°C, para a madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, variando de 17,0% a 26,0%, semelhante ao observado no presente trabalho. Entretanto, Santos (2010) obteve valores médios inferiores, para a massa residual, à temperatura de 500°C, que variaram de 4,0% a 11,0%. Essa diferença está relacionada com a maior degradação das amostras devido à temperatura utilizada.

A faixa de 30°C a 100°C, que compreende a secagem da madeira, fase do processo de carbonização tipicamente endotérmica (SANTOS, 2010), apresentou perda de massa média de 10,3%, 9,7%, 9,3% para os clones GG 100, GG 157 e GG 680, respectivamente. Santos (2010), estudando a madeira de clones de *Eucalyptus* sp, aos sete anos, encontrou um valor médio de perda de massa nessa faixa, de 7,25%, sendo inferior ao observado no presente trabalho.

Na faixa de 100°C a 200°C, a perda de massa média variou de 0,7%; 0,5%; 0,3%, para os clones GG 100, GG 157 e GG 680, respectivamente. Nessa faixa ocorre o desprendimento de água de constituição, e pode-se afirmar que o processo de decomposição dos componentes da madeira é estável em períodos não prolongados de exposição de calor nestas temperaturas (RAAD, 2004). Santos (2010) não observou perda de massa nessa faixa de temperatura.

Campos (2008) analisou a degradação térmica de um híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, e dos componentes da madeira (celulose, xilana e lignina) separadamente, e verificou que as maiores perdas de massa, para hemiceluloses, ocorreram no intervalo de 220° a 300°C.

Tabela 4 – Perda de massa (%) em função das faixas de temperatura para os três clones em cada idade.

Material Genético	Idade	Faixas de temperatura						Massa Residual (%)
		30° - 100°C	100° - 200°C	200° - 300°C	300° - 400°C	400° - 450°C	300° - 450°C	
Clone GG100	3	9,9	0,7	21,1	44,7	4,0	48,7	19,6
Clone GG100	4	9,7	0,6	20,1	47,4	2,3	49,7	19,9
Clone GG100	5	10,5	0,6	19,9	46,9	2,6	49,5	19,5
Clone GG100	7	11,0	0,7	19,4	44,7	3,1	47,8	21,1
Média		10,3	0,7	20,1	45,9	3,0	48,9	20,0
Clone GG157	3	9,9	0,6	21,5	46,0	2,5	48,5	19,5
Clone GG157	4	10,2	0,7	20,3	48,8	2,4	51,3	17,5
Clone GG157	5	9,1	0,3	19,4	48,3	2,7	51,0	20,2
Clone GG157	7	9,5	0,4	19,9	46,6	3,8	50,4	19,8
Média		9,7	0,5	20,3	47,4	2,9	50,3	19,2
Clone GG680	3	9,0	0,4	19,6	50,0	2,5	52,5	18,5
Clone GG680	4	8,8	0,1	19,3	47,8	2,5	50,3	21,5
Clone GG680	5	9,5	0,2	19,1	49,9	2,6	52,5	18,7
Clone GG680	7	10,0	0,5	19,4	48,0	2,9	50,9	19,2
Média		9,3	0,3	19,4	48,9	2,6	51,6	19,5

Para a faixa de 200°C a 300°C, observou-se no presente trabalho, valores médios de perda de massa que variaram de 19,4% a 20,1% e pode-se dizer que a maior fração dessa massa é composta pelas hemiceluloses. Santos (2010) obteve valores médios entre 16% a 19%, para clones de *Eucalyptus* sp, aos sete anos. Raad (2004) verificou para essa mesma faixa de temperatura, um valor médio de perda de massa de 28,00%, para a madeira de *Eucalyptus* sp.

As maiores perdas de massa foram observadas na faixa de 300°C a 400°C, sendo que os valores médios variaram de 45,9% a 48,9%. Santos (2010) também observou maior perda de massa nessa faixa, e obteve valores médios acima de 50%. À medida que se eleva a temperatura as reações químicas vão tornando-se mais complexas e acima de 270°C essas reações de decomposição ocorrem mais intensamente, sendo, em grande parte, com liberação de calor (reações exotérmicas) (RAAD, 2004).

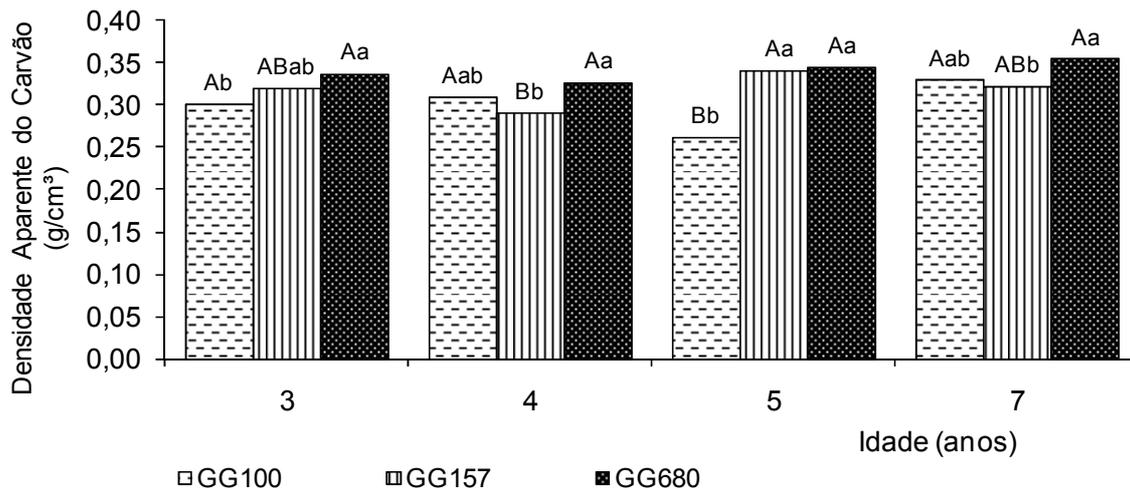
Na faixa de temperatura de 400°C até 450°C houve uma perda de massa menor, variando de 2,6% a 3,0%, sendo que a maior parte da massa residual é composta por lignina, uma vez que é o componente da madeira mais estável termicamente.

De forma geral, o clone GG 100, que apresentou o maior valor médio de massa residual apresentou, também, o maior percentual de lignina total (32,86%), mesmo não havendo diferença significativa entre os clones para esse componente. Aos sete anos, observa-se o maior valor de massa residual para o clone GG 100, e observa-se, nessa idade, o menor valor para a relação S/G (2,3), o que, provavelmente, contribuiu para o aumento da estabilidade térmica.

5.9. Análises do carvão vegetal

5.9.1. Densidade aparente do carvão

Na Figura 22 estão apresentados os valores médios para a densidade aparente do carvão vegetal em função da idade e clone.



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

Figura 22 – Densidade aparente do carvão vegetal em função da idade e clone.

Maiores valores de densidade aparente do carvão vegetal conferem ao mesmo maior resistência mecânica e maior capacidade calorífica por unidade de volume (STURION et al., 1988).

De acordo com Santos (2008a) o valor ideal para a densidade aparente do carvão vegetal deve ser superior a $0,25 \text{ g/cm}^3$ quando este é destinado para uso siderúrgico. Sendo assim, os três clones avaliados nesse trabalho, apresentam densidade aparente dentro dos parâmetros estabelecidos para siderurgia, independentemente da idade de corte.

Analisando a Figura 22 observa-se que, de modo geral, houve efeito significativo da idade e do material genético na densidade aparente do carvão. Para o clone GG 680 o fator idade não foi significativo.

Os valores médios de densidade aparente do carvão variaram de $0,26 \text{ g/cm}^3$ a $0,33 \text{ g/cm}^3$; $0,29 \text{ g/cm}^3$ a $0,34 \text{ g/cm}^3$; $0,33 \text{ g/cm}^3$ a $0,35 \text{ g/cm}^3$ para os clones GG 100, GG 157 e GG 680, respectivamente. Esses estão de acordo com os encontrados por Pereira (2011) ao estudar a madeira de *Eucalyptus benthamii* e *Eucalyptus urophylla* nas idades de três, cinco e sete anos, que obteve valores que variaram de $0,26 \text{ g/cm}^3$ a $0,33 \text{ g/cm}^3$. Esse autor verificou, ainda, que houve efeito da idade.

Trugilho et al. (2005) avaliaram a madeira de seis clones híbridos naturais de *Eucalyptus* aos sete anos de idade, e encontraram valores de

densidade aparente do carvão variando 0,27 g/cm³ a 0,36 g/cm³ sendo esses valores próximos aos encontrados no presente trabalho.

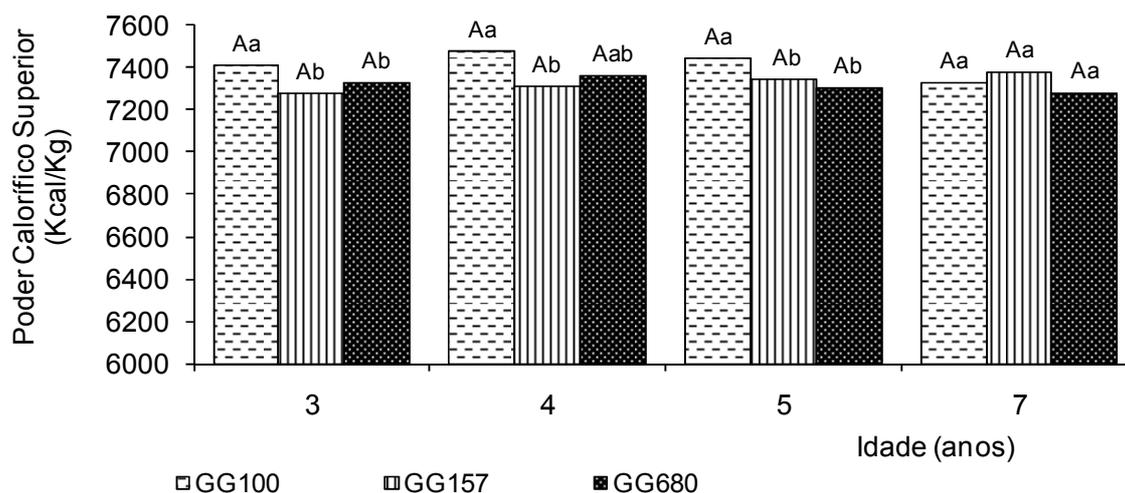
Santos (2010) também obteve valores semelhantes, para os clones de *Eucalyptus* sp., aos sete anos, variando de 0,26 g/cm³ e 0,35 g/cm³.

Trugilho et al. (2001) estudaram sete clones de *Eucalyptus grandis* e três clones de *Eucalyptus saligna*, aos sete anos, e obtiveram um valor médio de 0,45 g/cm³ para densidade aparente do carvão e os valores variando de 0,40 g/cm³ a 0,49 g/cm³, para os dois clones. Esses valores foram superiores aos obtidos no presente trabalho.

Ressalta-se que, os valores de densidade aparente obtidos neste experimento diferem de alguns autores, a exemplo de Trugilho et al. (2001), pois esta variável é influenciada pela densidade da madeira que lhe deu origem e pela temperatura final e tempo de carbonização, pois quanto maior exposição da madeira ao calor maior será a perda de massa em relação ao volume.

5.9.2. Poder calorífico superior do carvão

Na Figura 23 são apresentados os valores médios para poder calorífico superior do carvão vegetal em função da idade e clone.



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

Figura 23 – Poder calorífico do carvão vegetal em função da idade e clone.

Pela Figura 23 observa-se que não houve influência da idade para os três clones avaliados. Entretanto, houve diferença significativa entre os clones em todas as idades, exceto aos sete anos.

Os valores para o poder calorífico superior do carvão variaram de 7332 kcal/kg a 7478 kcal/kg; 7279 kcal/kg a 7383 kcal/kg; 7282 kcal/kg a 7363 kcal/kg para os clones GG 100, GG 157 e GG 680, respectivamente.

Rocha (2011) obteve valores semelhantes aos observados no presente trabalho, para um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* aos sete anos, os quais variaram de 7.834 kcal/kg a 7.900 kcal/kg.

Valores superiores foram encontrados por Santos (2010) que verificou poder calorífico superior variando de 8.210 kcal/kg a 8.515 kcal/kg, para clones de *Eucalyptus* sp., aos sete anos.

Frederico (2009) também obteve valores mais elevados para essa variável, sendo que esses variaram de 8139 kcal/kg a 8315 kcal/kg, para um clone de *Eucalyptus grandis* e quatro clones híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, aos três anos.

Oliveira et al. (2010) observaram valores médios para o poder calorífico superior do carvão variando de 8023 kcal/kg a 8339 kcal/kg, para *Eucalyptus pellita*, aos cinco anos.

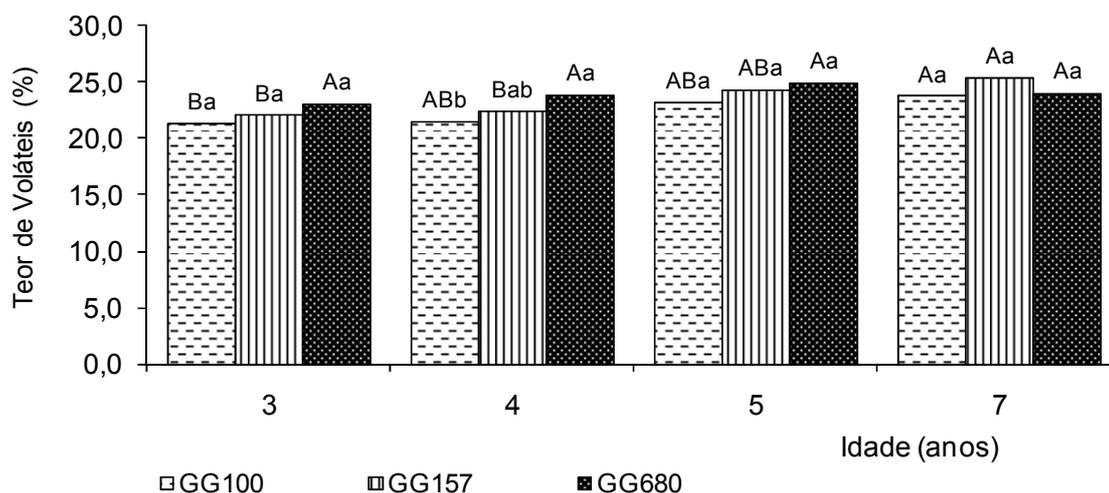
Observa-se uma grande variação dos resultados de poder calorífico superior do carvão nos trabalhos avaliados. Essa diferença pode estar relacionada com o uso de diferentes marchas de carbonização. Sabe-se que o poder calorífico do carvão está relacionado com o teor de carbono fixo do mesmo, que por sua vez, aumenta com a degradação da madeira. Entretanto, ao expor a madeira a temperaturas de carbonização mais altas e por mais tempo, ocorre maior degradação e consequente perdas na densidade aparente e resistência do carvão. Portanto, é necessário estabelecer uma marcha de carbonização que forneça valores ideais para propriedades do carvão em função do material genético a ser utilizado.

Além disso, o poder calorífico superior está relacionado à composição elementar do combustível. Sabe-se que o hidrogênio é o elemento que apresenta maior poder calorífico, portanto, combustíveis com maiores teores

desse elemento liberam mais energia durante a queima. Sendo assim, os maiores valores para poder calorífico superior do carvão encontrados na literatura, devem estar relacionados, provavelmente, ao menor teor de carbono fixo presente no carvão oriundo dos clones que apresentaram também os maiores teores de materiais voláteis, ricos em hidrogênio (H₂) e que tem poder calorífico superior ao da madeira (SANTOS, 2010).

5.9.3. Teor de voláteis

Na Figura 24 são apresentados os valores médios para o teor de materiais voláteis do carvão vegetal em função da idade e clone.



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

Figura 24 – Teor de voláteis do carvão vegetal em função da idade e clone.

É necessário que exista uma fração de voláteis no carvão vegetal uma vez que esses materiais promovem o aumento da permeabilidade da carga no alto-forno e a diminuição da reatividade do carvão vegetal. Entretanto, para uso doméstico, um alto teor de voláteis ocasiona o desconforto da fumaça, além de menor eficiência energética, acarretando maior consumo de carvão vegetal (FREDERICO, 2009).

O carvão vegetal para uso siderúrgico deve apresentar um valor máximo de 25% de materiais voláteis (SANTOS, 2008a). Observa-se que todos os

carvões provenientes dos diferentes clones avaliados neste experimento, independente da idade, obtiveram valores de matérias voláteis dentro do especificado.

Analisando a Figura 24 verifica-se um aumento no teor de voláteis do carvão em função da idade, exceto para o clone GG 680 que não apresentou diferença significativa entre as idades. Observa-se, ainda, que o teor de matérias voláteis foi influenciado pelo material genético utilizado para a produção de carvão vegetal, exceto para idade de sete anos.

Os valores de matérias voláteis do carvão variaram de 21,34% a 23,77%; 22,05% a 25,40%; 23,13% a 24,97% para os clones GG 100, GG 157 e GG 680, respectivamente.

Valores superiores aos apresentados no presente trabalho foram obtidos por Arantes (2009) que verificou percentuais médios de 26,99%, para carvões provenientes de madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* aos seis anos.

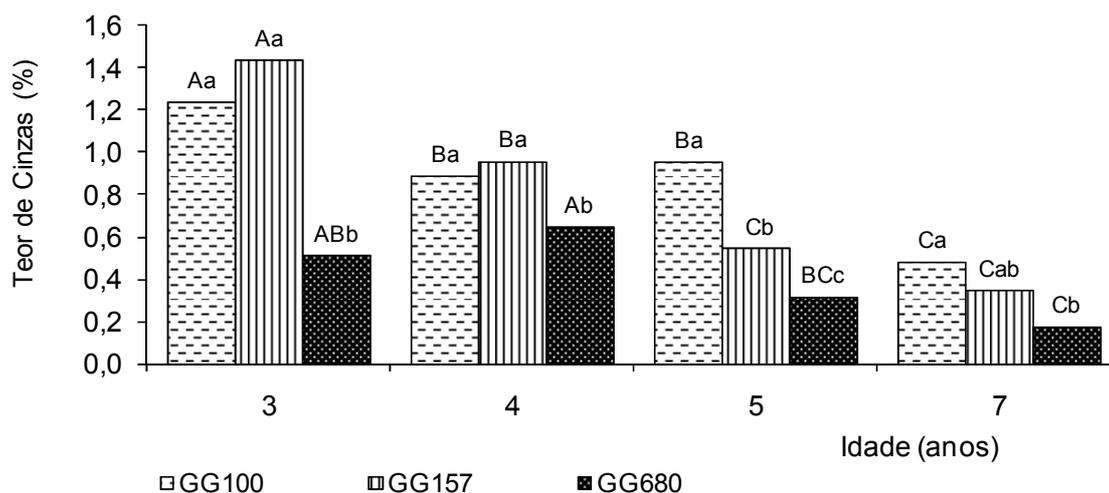
Rocha (2011) também obteve maiores valores para essa variável ao analisar madeira de clones híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* aos sete anos, sendo que o valor médio foi de 26,14%.

Entretanto, Oliveira et al. (2010) encontraram valores inferiores aos observados no presente estudo, ao avaliarem madeira de *Eucalyptus pellita*, aos cinco anos, os quais variaram de 9,71% a 14,65%.

Resultado semelhante foi observado por Andrade (2009) quando avaliou dois clones de *Eucalyptus* sp., aos sete anos, e obteve valores médios variando entre 15,30% e 18,40%, sendo esses também, inferiores aos observados no presente estudo.

5.9.4. Teor de cinzas

Na Figura 25 são apresentados os valores médios para o teor de cinzas do carvão vegetal em função da idade e clone.



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

Figura 25 – Teor de cinzas do carvão vegetal em função da idade e clone.

Quando o carvão vegetal se destina à produção de alguns tipos de ferro-ligas ou de carbureto de cálcio, a presença de alguns componentes minerais é indesejável. O fósforo é o elemento que mais afeta a produção das ligas metálicas. Dessa forma, o fósforo presente no carvão é incorporado às ligas metálicas tornando-as quebradiças, menos maleáveis e com campos favoráveis à propagação de trincas e fissuras (VITAL et al., 1989).

De modo geral, o teor de cinzas no carvão para a siderurgia devem ser menores que 1% (SANTOS, 2008a). Observa-se que o carvão vegetal oriundo do clone GG 680 apresentou, independentemente da idade, teores de cinzas menores que 1%. Para os demais clones, verifica-se que apenas a partir da idade de quatro anos, que os teores de cinzas foram inferiores a 1%.

Avaliando o efeito da idade no teor de cinzas dos carvões, independente do clone verifica-se, de modo geral, uma redução desta variável a medida que se aumentou a idade da árvore. Isso se deve provavelmente, a mudanças no estado nutricional das árvores (WADT et al, 1999).

Os valores médios de teor de cinzas no carvão variaram de 0,48% a 1,24%; 0,35% a 1,44%; 0,17% a 0,65% para os clones GG 100, GG 157 e GG 680, respectivamente.

Trugilho et al. (2001) obtiveram valores médios, dessa variável, para os clones de *Eucalyptus grandis* de 0,44% e para os clones de *Eucalyptus saligna*

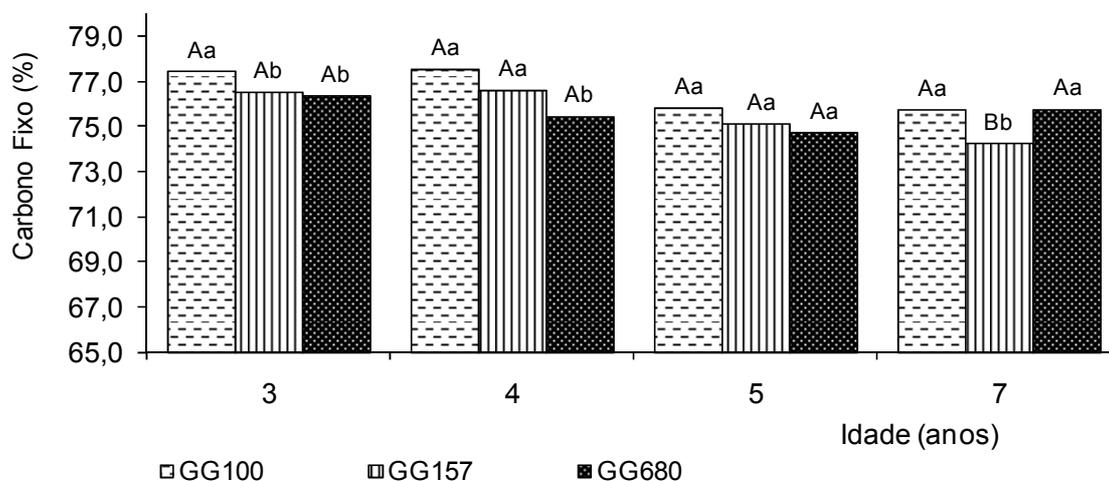
de 0,28%, todos aos sete anos. Da mesma forma, Rocha (2011) observou valores médios para o teor de cinzas variando de 0,28% a 0,39%, para clones híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis*, aos sete anos.

Santos (2010) também obteve resultado semelhante, sendo que os valores médios para o teor de cinzas variaram de 0,39% a 0,76%, para clones de *Eucalyptus* sp., aos sete anos.

Entretanto, os valores médios observados no trabalho desenvolvido por Frederico (2009) variaram de 0,66% a 0,99%, para clones de *Eucalyptus* sp, aos três anos de idade, sendo menores que os obtidos no presente trabalho, para a mesma idade.

5.9.5. Teor de carbono fixo

Na Figura 26 são apresentados os valores médios para o teor de carbono fixo do carvão vegetal em função da idade e clone.



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

Figura 26 – Teor de carbono fixo do carvão vegetal em função da idade e clone.

O teor de carbono fixo do carvão para a siderurgia deve estar em torno de 70% a 80% (SANTOS, 2008a). Observa-se que os valores obtidos no presente estudo estão de acordo com as exigências para uso em siderurgia.

Analisando a Figura 26 verifica-se que não houve efeito da idade no teor de carbono fixo do carvão vegetal, exceto para o clone GG 157 que apresentou um menor valor para essa variável aos sete anos. Observa-se que houve diferença significativa entre os materiais genéticos, exceto na idade de cinco anos. De modo geral, o clone GG 100 apresentou os maiores teores de carbono fixo.

Os valores médios para teor de carbono fixo no carvão variaram de 75,75% a 77,55%; 74,25% a 76,63%; 74,71% a 76,36% para os clones GG 100, GG 157 e GG 680, respectivamente.

Sturion et al. (1988) avaliando o teor de carbono fixo de carvões provenientes de *Eucalyptus viminalis* aos quatro e aos sete anos, não observaram diferenças significativas entre eles, que tiveram valor médio de 78%, sendo esse superior aos obtidos no presente trabalho. Todavia, Pereira (2011) verificou uma tendência de aumento do teor de carbono fixo com a idade, ao analisar a madeira de *Eucalyptus benthamii* e *Eucalyptus urophylla*, nas idades de três, cinco e sete anos, tendo valores variando de 84,26% a 86,02%.

Santos (2010) observou teores de carbono fixo que variaram de 85,33% a 87,52%, para clones de *Eucalyptus* sp., aos sete anos, sendo mais elevados do que os valores apresentados no presente estudo. Frederico (2009) também obteve resultado mais elevado, e os valores médios para o teor de carbono fixo variaram de 81,38% a 82,36%, para clones de *Eucalyptus* sp, aos três anos de idade.

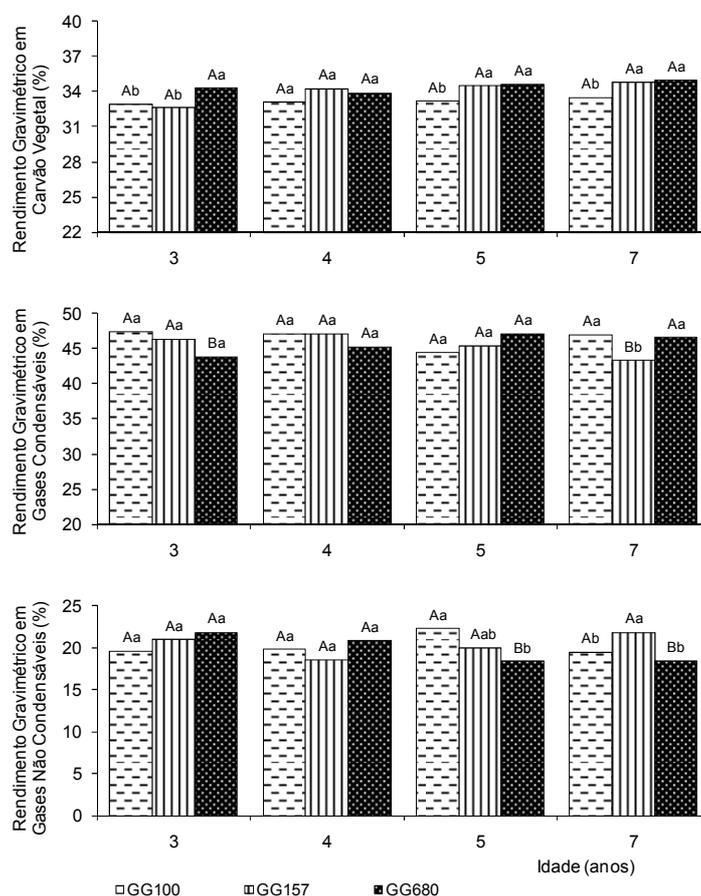
Entretanto, Rocha (2011) estudou um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis*, aos sete anos, obteve valores médios para o teor de carbono fixo que variaram de 72,16% a 74,22%, inferiores aos observados no presente estudo.

Observa-se uma variação entre os valores de carbono fixo encontrados na literatura e os obtidos no presente trabalho, o que pode estar relacionado com a utilização de diferentes marchas de carbonização, uma vez que ocorre o incremento do teor de carbono fixo com o aumento da temperatura ou com o tempo de carbonização.

Maiores teores de carbono fixo contribuem para o aumento da produtividade dos alto-fornos para o mesmo consumo do redutor; contudo, altos teores de carbono fixo estão associados a baixos teores de materiais voláteis e ao aumento da reatividade do carvão, o que pode trazer prejuízos no processo siderúrgico (FREDERICO, 2009).

5.9.6. Rendimentos gravimétricos

Na Figura 27 são apresentados os valores médios para o rendimento gravimétrico em carvão, o rendimento gravimétrico em gases condensáveis e o rendimento gravimétrico em gases não condensáveis, em função da idade e clone.



Médias seguidas da mesma letra maiúscula entre as idades e minúscula entre clones, para uma mesma variável, não diferem entre si a 5% de significância, pelo teste Tukey.

Figura 27 – Rendimento gravimétrico em carvão, rendimento gravimétrico em gases condensáveis e rendimento gravimétrico em gases não condensáveis em função da idade e clone.

Analisando a Figura 27 observa-se que não houve influência da idade no rendimento gravimétrico em carvão vegetal. No entanto, observa-se que houve diferença entre os clones, exceto aos quatro anos. Os valores médios variaram de 32,98% a 33,53%; 32,61% a 34,81%; 33,91% a 34,96% para os clones GG 100, GG 157 e GG 680, respectivamente.

Esses valores estão de acordo com os obtidos por Sturion et al. (1988) que estudaram as características da madeira e do carvão de *Eucalyptus viminalis* nas idades de quatro e sete anos. Verificaram que a idade não influenciou o rendimento gravimétrico em carvão, sendo que os valores médios foram de 33% nas duas idades avaliadas.

Pereira (2011) observou uma diminuição no rendimento gravimétrico em carvão com o aumento da idade, para madeira de *Eucalyptus benthamii*, sendo que os valores médios variaram de 29,70% a 27,05%, aos três e aos sete anos, respectivamente. Entretanto, para as madeiras de *Eucalyptus urophylla* não houve influência da idade, e o valor médio foi de 27,31%.

Rocha (2011) avaliou um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* aos sete anos e obteve um valor médio de 30,01% para o rendimento gravimétrico em carvão, sendo inferior aos encontrados no presente trabalho. Santos (2010) também observou valores médios mais baixos, que variaram de 28,27% a 30,21%, para clones de *Eucalyptus* sp., aos sete anos.

Trugilho et al. (2001), entretanto, observaram maiores valores para o rendimento gravimétrico em carvão, sendo que para *Eucalyptus grandis* foi de 36,83% e para os clones de *Eucalyptus saligna* de 38,33%, todos aos sete anos.

Maiores valores de rendimento gravimétrico em carvão são desejáveis, pois resulta em maior massa de carvão vegetal e, conseqüentemente, maior produtividade dos fornos.

Para o rendimento gravimétrico em gases condensáveis os valores médios obtidos variaram de 44,52% a 47,40%; 43,32% a 47,12%; 43,81% a 47,13% para os clones GG 100, GG 157 e GG 680, respectivamente.

Frederico (2009) obteve valores semelhantes ao estudar a madeira de clones de *Eucalyptus* sp., aos três anos, sendo que os valores médios variaram de 44,01% a 45,91.

Ao estudar clones de *Eucalyptus* sp., aos sete anos, Santos (2010) obteve valores médios para rendimento gravimétrico em gases condensáveis variando de 36,76% a 41,29%.

Para o rendimento gravimétrico em gases não condensáveis os valores médios variaram de 19,51% a 22,30%; 18,59% a 21,87%; 18,38% a 21,88% para os clones GG 100, GG 157 e GG 680, respectivamente. Esses resultados estão de acordo com os valores encontrados por Trugilho et al. (2001), que obteve para os clones de *Eucalyptus grandis* um valor médio de 20,85% e para os clones de *Eucalyptus saligna* um valor médio de 21,37%, todos aos sete anos.

Valores mais elevados foram observados no trabalho desenvolvido por Frederico (2009) com clones de *Eucalyptus* sp., aos três anos, os quais variaram de 24,37% a 27,06%.

5.10. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal

Na Tabela 5 estão apresentados os resultados para correlações entre as propriedades da madeira e as propriedades do carvão para os clones GG 100, GG 157 e GG 680, e para todos os clones.

Tabela 5 – Correlações entre as propriedades da madeira (linhas) e do carvão vegetal (colunas).

	RGCV (%)	PCSCV (Kcal/Kg)	DACV (g/cm ³)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	TCF (%)
Clone GG100						
Idade (anos)	0,37	-0,46	0,31	0,87*	-0,91*	-0,77*
Relação C/A	0,34	-0,25	0,33	0,52	-0,61*	-0,44
DBM (g/cm ³)	0,43	-0,56	0,63*	0,69*	-0,86*	-0,57
PCSM (Kcal/Kg)	-0,03	0,35	-0,39	0,33	-0,27	-0,32
Extrativos (%)	0,02	-0,11	0,22	0,46	-0,69*	-0,35
Holocelulose (%)	-0,35	0,38	-0,72*	-0,37	0,66*	0,24
Lignina (%)	0,43	-0,38	0,72*	0,05	-0,22	0,01
S/G	-0,15	0,20	-0,44	-0,61*	0,85*	0,48
Clone GG157						
Idade (anos)	0,53	0,52	0,22	0,68*	-0,91*	-0,54
Relação C/A	0,07	0,34	0,02	0,37	-0,53	-0,29
DBM (g/cm ³)	0,48	0,49	0,38	0,69*	-0,94*	-0,54
PCSM (Kcal/Kg)	0,32	-0,19	-0,14	-0,17	0,06	0,18
Extrativos (%)	0,47	0,03	0,46	0,47	-0,40	-0,43
Holocelulose (%)	-0,53	-0,27	-0,73*	-0,55	0,40	0,52
Lignina (%)	0,49	0,39	0,80*	0,52	-0,34	-0,51
S/G	-0,40	-0,30	-0,60*	-0,62*	0,81*	0,50
Clone GG680						
Idade (anos)	0,38	-0,38	0,52	0,42	-0,79*	-0,24
Relação C/A	0,42	-0,40	0,45	0,51	-0,79*	-0,33
DBM (g/cm ³)	0,42	-0,49	0,60*	0,52	-0,80*	-0,34
PCSM (Kcal/Kg)	-0,18	0,21	-0,24	-0,25	0,65*	0,09
Extrativos (%)	0,41	-0,40	0,30	-0,19	-0,10	0,22
Holocelulose (%)	-0,35	0,66*	-0,53	-0,05	0,38	-0,05
Lignina (%)	0,23	-0,59*	0,48	0,13	-0,40	-0,03
S/G	-0,71*	0,62*	-0,85*	-0,58	0,48	0,48
Todos Clones						
Idade (anos)	0,37*	-0,09	0,26	0,58*	-0,70*	-0,47*
Relação C/A	0,13	-0,04	0,07	0,29	-0,34*	-0,24
DBM (g/cm ³)	0,58*	-0,31	0,64*	0,71*	-0,89*	-0,57*
PCSM (Kcal/Kg)	-0,11	0,22	-0,44*	-0,15	0,35*	0,07
Extrativos (%)	0,22	-0,07	0,26	0,26	-0,41*	-0,18
Holocelulose (%)	-0,35*	0,20	-0,56*	-0,30	0,46*	0,22
Lignina (%)	0,31	-0,22	0,56*	0,23	-0,33	-0,17
S/G	-0,16	-0,13	-0,34*	-0,28	0,59*	0,15

Em que: (Relação C/A) relação cerne/alburno; (DBM) densidade básica da madeira em g/cm³; (PCSM) poder calorífico superior da madeira em Kcal/Kg; (S/G) relação siringil/guaiacil da madeira; (RGCV) rendimento gravimétrico em carvão vegetal em porcentagem; (PCSCV) poder calorífico superior do carvão vegetal em Kcal/Kg; (DACV) densidade aparente do carvão vegetal g/cm³; (TCF) teor de carbono fixo do carvão em porcentagem. *Correlações significativas a 5% de significância, pelo teste t.

As propriedades do carvão vegetal são influenciadas pela madeira que lhe deu origem e pelo processo de carbonização. De maneira geral, sabe-se que à medida que aumenta o tempo e a temperatura final de carbonização, espera-se que ocorra aumento no teor de carbono fixo e no poder calorífico superior do carvão, e uma redução nos valores de densidade, no teor de materiais voláteis, na resistência mecânica e no rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Sabe-se, também, que a densidade básica da madeira está diretamente relacionada com a densidade aparente do carvão. Além disso, espera-se que com o aumento do teor de lignina da madeira e com a diminuição da relação S/G ocorra um ganho no rendimento gravimétrico e carbono fixo do carvão. Essas tendências já foram comprovadas pela literatura, entretanto, no presente trabalho, nem todas as correlações realizadas apresentaram resultados condizentes com o esperado.

Analisando a Tabela 5 observa-se uma correlação negativa entre a idade e o teor de cinzas, independentemente do clone avaliados. Isso pode estar relacionado ao fato de que nas florestas equiâneas, a idade das árvores reflete seu estágio de desenvolvimento. Dessa forma, entre diferentes classes de idade pode haver diferenças na dinâmica da ciclagem dos nutrientes e portanto, no estado nutricional das árvores (WADT et al., 1999).

Observa-se, ainda na Tabela 5, que houve correlação positiva entre a densidade básica da madeira e a densidade aparente do carvão, para os clones GG 100 e GG 680, e quando se avalia todos os clones em conjunto. Resultados semelhante foram obtidos por Brito e Barrichelo (1980) ao estudarem carvão vegetal proveniente de *Eucalyptus* sp, em diferentes idade, por Frederico (2009) que avaliou um clone de *Eucalyptus grandis* e quatro clones híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, aos três anos, e por Santos (2010) que estudou a madeira de clones de *Eucalyptus* sp, aos sete anos. Segundo Brito e Barrichelo (1980), essa correlação pode servir para nortear a escolha e o melhoramento de espécies destinadas à produção de carvão.

Ainda avaliando a Tabela 5, observa-se uma correlação positiva entre o teor de lignina e a densidade aparente do carvão. De acordo com Brito e Barrichelo (1977) pode-se dizer que na escolha de madeiras para obtenção de

carvão com melhores propriedades químicas (maiores teores em carbono fixo e menores teores em substâncias voláteis e cinzas), devem-se procurar aquelas que possuam altos teores de lignina. Com relação ao aumento do rendimento volumétrico em carvão, as madeiras devem possuir além de teor de lignina mais elevado, uma mais alta densidade básica para aumentar a quantidade de matéria seca colocada no forno de carbonização.

A relação S/G apresentou correlação negativa com o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, sendo mais expressiva para o clone GG 680. Dessa forma, a redução na relação S/G indica que o aumento na quantidade de lignina do tipo guaiacil aumenta o rendimento gravimétrico em carvão, uma vez que essa lignina possui estrutura mais condensada e, provavelmente, maior estabilidade dimensional.

Nas Figuras 28, 29, 30 e 31 estão apresentadas as regressões realizadas para as correlações significativas entre as variáveis da madeira e idade com as variáveis do carvão vegetal, para os clones GG 100, GG 157, GG 680 e todos os clones, respectivamente.

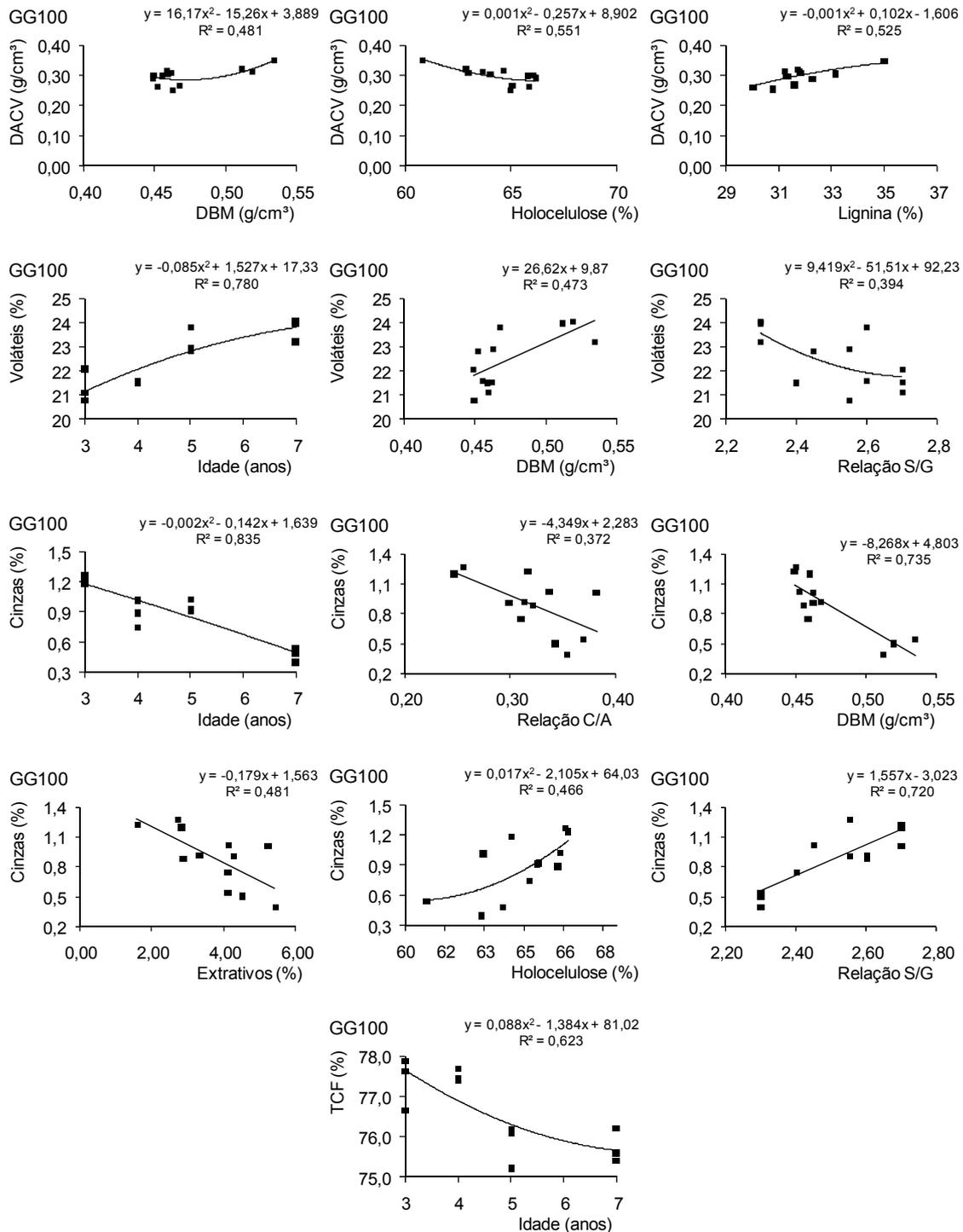


Figura 28 – Regressões realizadas para as correlações significativas entre as variáveis da madeira e idade com as variáveis do carvão vegetal, do clone GG 100.

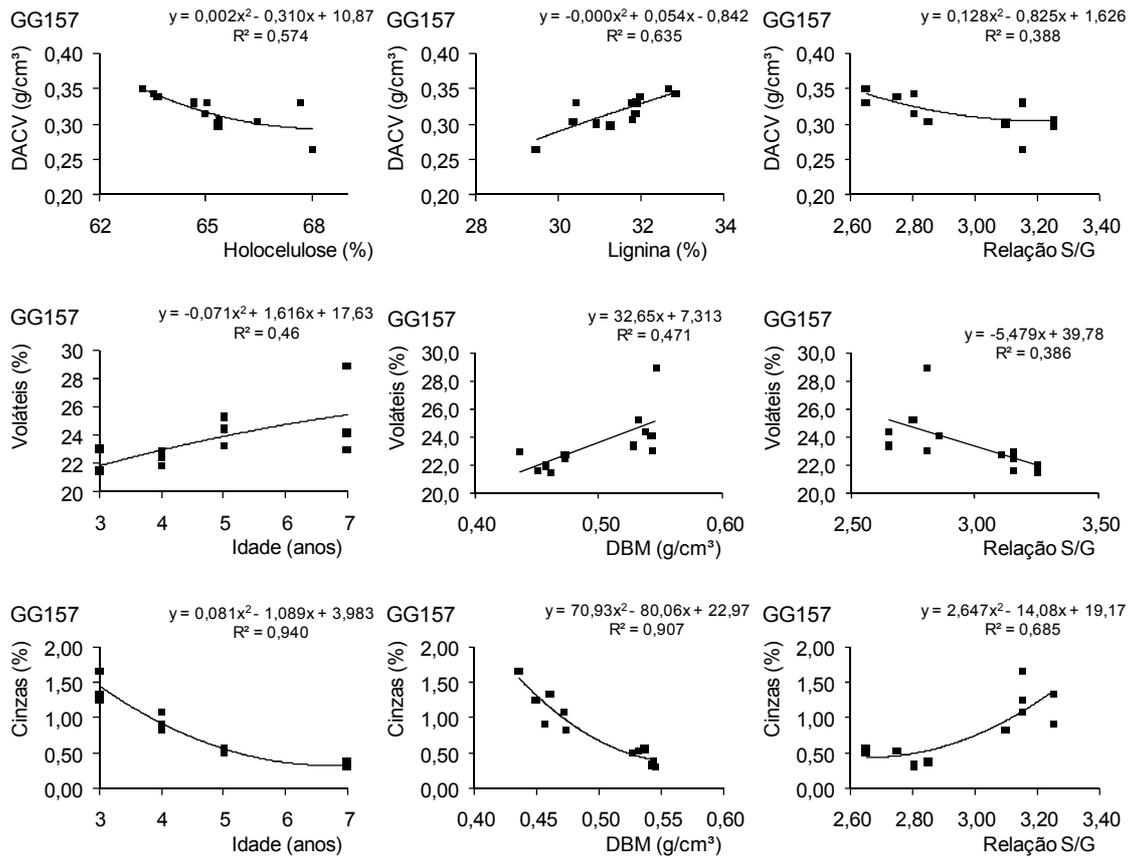


Figura 29 – Regressões realizadas para as correlações significativas entre as variáveis da madeira e idade com as variáveis do carvão vegetal, do clone GG 157.

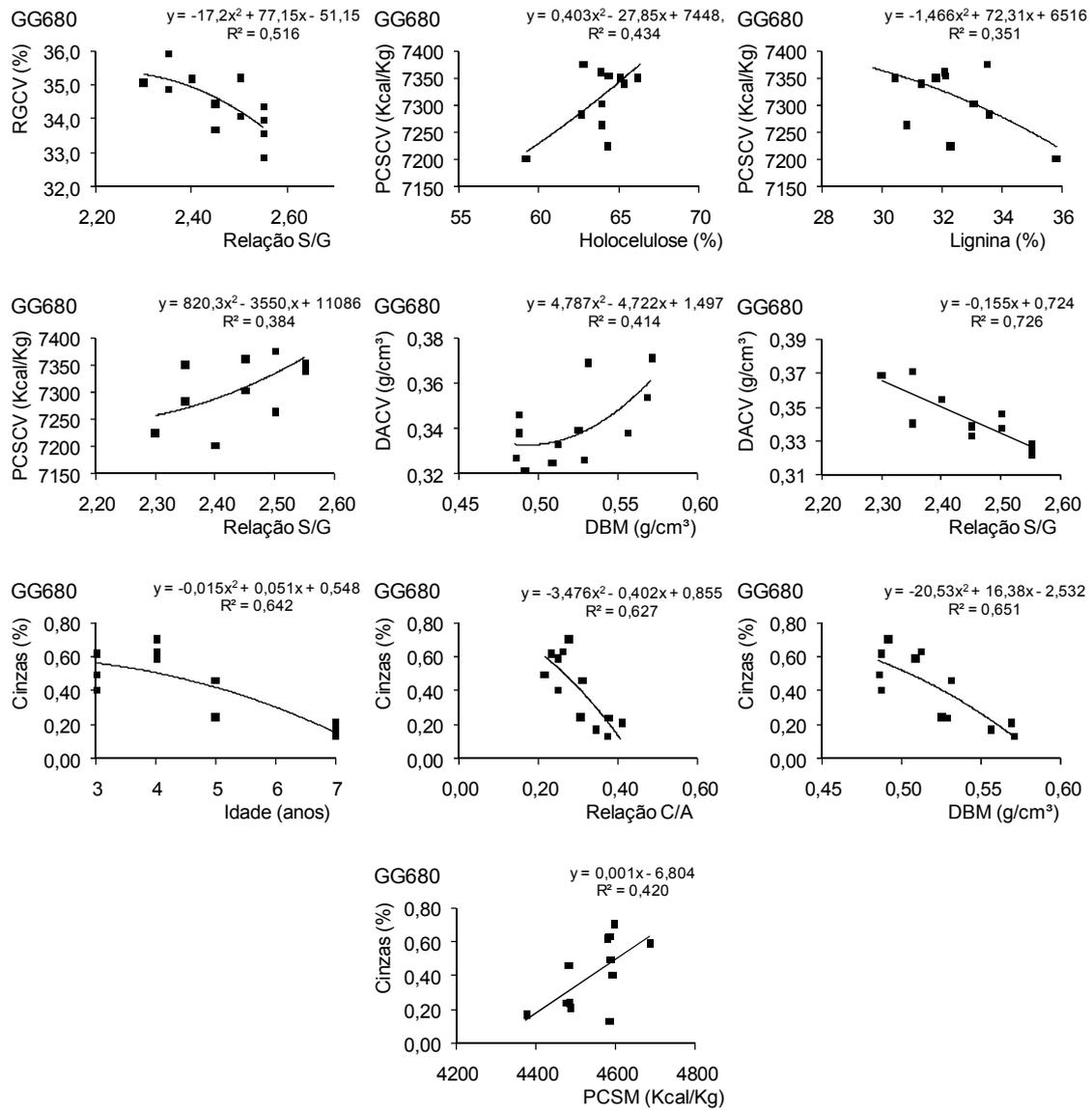


Figura 30 – Regressões realizadas para as correlações significativas entre as variáveis da madeira e idade com as variáveis do carvão vegetal, do clone GG 680.

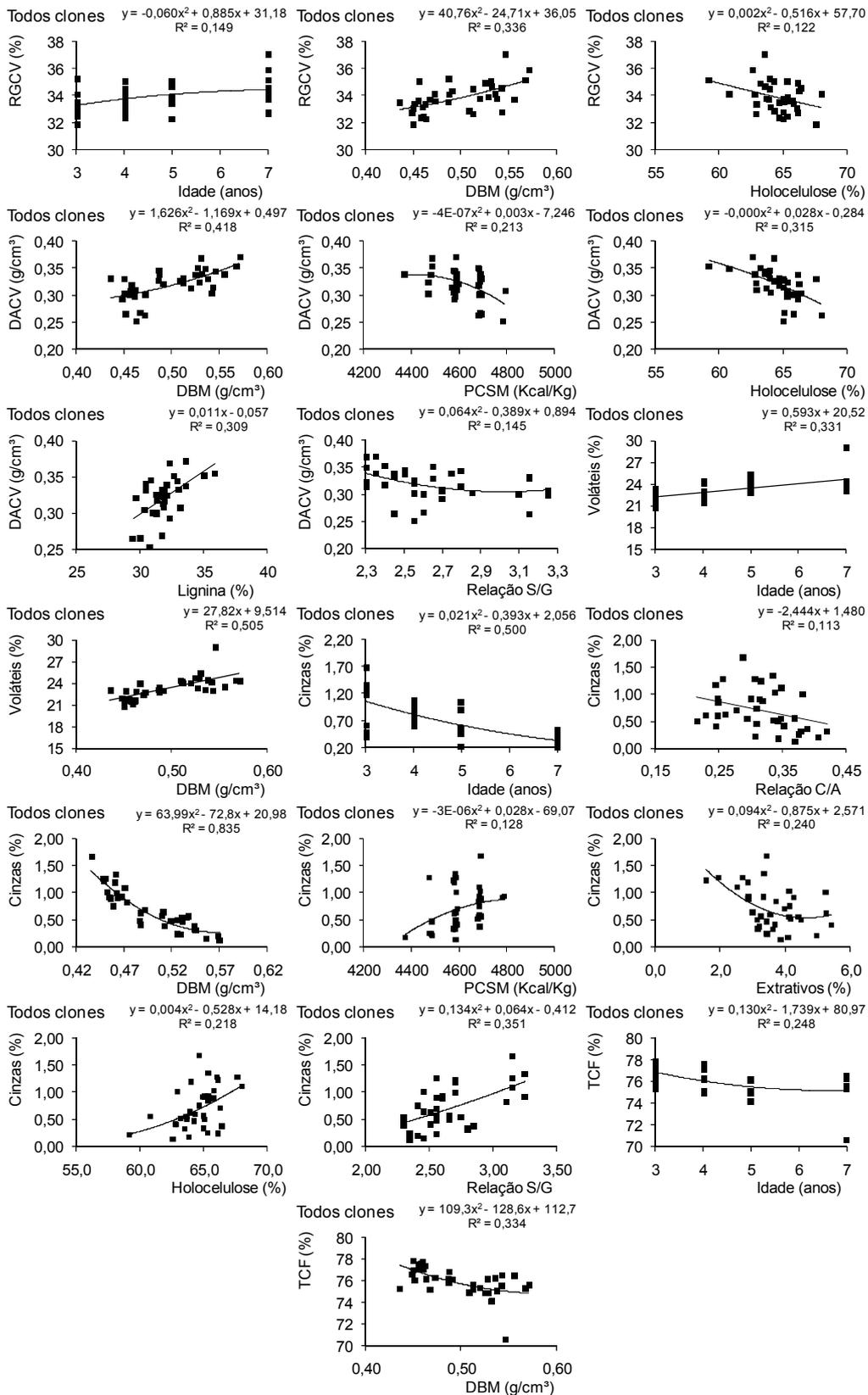


Figura 31 – Regressões realizadas para as correlações significativas entre as variáveis da madeira e idade com as variáveis do carvão vegetal, para todos os clones.

6. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que:

A idade da árvore influenciou as propriedades da madeira, independente do clone, proporcionando ganhos na qualidade do carvão e aumento na produção de energia/m³.

A idade do material genético não influenciou o rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

O clone GG 680 apresentou melhor desempenho quando se avaliou o uso da madeira para geração de energia, atingindo aos sete anos um valor de 2802 kW.h.m⁻³.

A relação S/G da madeira teve influência no rendimento gravimétrico em carvão vegetal sendo mais expressiva para o clone GG 680.

Levando em consideração somente as propriedades da madeira para a escolha do melhor material genético, pode-se dizer que o clone GG 680 apresentou o maior potencial para a produção de carvão.

Entretanto, deve-se avaliar também, a produtividade das florestas, com o objetivo de determinar se o ganho em qualidade da madeira é superior ao ganho pela produtividade.

E por fim, conclui-se que os três materiais genéticos estudados, independentemente da idade, atendem as especificações para uso siderúrgico, e com rendimento gravimétrico satisfatório.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, C. R. **Espectroscopia no infravermelho próximo para prever propriedades da madeira e do carvão vegetal de plantio clonal de *Eucalyptus* sp.** 2009, 121 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2009.

Agência Nacional de Energia Elétrica – **ANEL**. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa(2).pdf)>

ARANTES, M. D. C. **Variação nas características da madeira e do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake.** 2009, 149 f. Doutorado (Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2009.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. **Anuário Estatístico:** ano base 2010. Brasília, 2011. 130 p. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br>>. Acesso em: 18/04/2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM. **Standard methods of evaluating properties of wood-base fiber and particles materials**. Philadelphia: 1982.

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. **IPEF**, 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: 2. densidade da madeira x densidade do carvão. **IPEF**, Piracicaba, n. 20, p. 101-113, 1980.

BRITO, J. O. Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico. **IPEF**, Piracicaba, Circular Técnica, n. 181, 1993.

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

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Usos diretos e propriedades da madeira para a geração de energia. **IPEF**, Piracicaba, Circular Técnica, n. 52, 1979.

BRUNOW, G.; LUNDQUIST, K.; GELLERSTEDT, G. :Lignin. In: SJÖSTRÖM, E.; ALÉN, R. (ed.). **Analytical methods in wood chemistry, pulping, and papermaking**. Berlin: Springer-Verlag, 1998. 316 p.

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**. 2008, 128 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2008.

CARVALHO, A. M. **Valorização da madeira do híbrido de *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla* através da produção conjunta de madeira serrada em pequenas dimensões, celulose e lenha.** 2000. 138 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2000.

CARVALHO, H. G. **Efeito da idade de corte da madeira e de variáveis de refino nas propriedades da celulose Kraft branqueada de eucalipto.** 1997, 121 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1997.

CAVALHEIRO, E. T. G.; IONASHIRO, M.; BREVIGLIERI, S. T.; MARINO, G.; CHIERICE, G. O. Influência de fatores experimentais nos resultados de análises termogravimétricas. **Química Nova**, v. 18, n. 3, p. 305-308, 1995.

CHEN, C. L. Lignins: Occurrence in wood tissues isolation reactions, and structure. In: LEWIS, M., GOLDSTEIN, I.S. (ed.). **Wood structure and composition.** N.i. : Marcel Dekker, 1991.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. STATISTICS Acessado em: 29 de junho de 2011. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/626/default.aspx#ancor>>.

FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal.** 2009. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

GALVÃO, Antonio Paulo Mendes; JANKOWSKY, I. P. **Secagem Racional da Madeira.** SAO PAULO. NOBEL, 1985. v. 1. 00112 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.

GOLDSTEIN, I. Overview of the chemical composition of wood. In: LEWIN, M.; GOLDSTEIN, I. (ed). **Wood structure and composition**. Nova York, Marcel Dekker, Inc., 1991. 487 p.

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* no Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v.29, n.1, p.129-137, 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.; LELIS, R. C. C.; ABREU, H. S. Caracterização físico-química da madeira de sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth.). **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 23, n. 1, p. 54-62, 2010.

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

MÉCHIN, V.; BAUMBERGER, S. POLLET, B. LAPIERRE, C. Peroxidase activity can dictate the *in vitro* lignin dehydrogenative polymer structure. **Phytochemistry**, v. 68, p. 571-579, 2007.

MOKFIENSKI, A. **Importância relativa da densidade básica e da constituição química de madeira de *Eucalyptus* spp. no rendimento, branqueabilidade e qualidade da polpa Kraft**. 2004, 153 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2004.

MOURA, V. P. G.; **O germoplasma de *Eucalyptus urophylla* S. T. BLAKE no Brasil**. Brasília: *Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia*, 2004. 12 p. (Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia. Comunicado técnico, 111).

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; ALMEIDA, W.; CORRADI, B. L.; CARDOSO, M. T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.

OLIVEIRA, E. **Características anatômicas, químicas e térmicas da madeira de três espécies de maior ocorrência no semi-árido nordestino**. 2003, 149 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

PALERMO, G. P. M.; LATORRACA, J. V. F.; SEVERO, E. T. D.; REZENDE, M. A.; ABREU, H. S. Determinação da densidade da madeira de *Pinus elliottii* Englm, através de atenuação de radiação gama comparada a métodos tradicionais. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 11, n.1, p. 01-06, 2004.

PANSHIN, A.J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 4 ed. New York: 1980. 722p.

PEREIRA, J.C.D.; STURION, J.A.; HIGA, A.R.; HIGA, R.C.V.; SHIMIZU, J.Y. Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. Colombo: **Embrapa Florestas**, 2000. 113p. (*Embrapa Florestas*. Documentos, 38).

PEREIRA, B. C. S. **Propriedades da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus* sp. em função da idade de corte**. 2011, 40 f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

PINHEIRO, P. C. C.; FIGUEIREDO, F. J.; SEYE, O. Influência da temperatura e da taxa de aquecimento da carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Biomassa e Energia**, v. 2, n. 2, p. 159-168, 2005.

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

RAAD, T. J. **Simulação do processo de secagem e carbonização de *Eucalyptus spp.*** 2004. 114 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2004.

RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. **Biologia Vegetal**. 5ª Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1996. 738 p.

REZENDE, J. B.; SANTOS, A. C. A cadeia produtiva do carvão vegetal em Minas Gerais: pontos críticos e potencialidades. **EPAMIG**, Viçosa, Boletim Técnico, n. 95, 2010.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomia do bioma cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S.P. (ed.). **Cerrado: ambiente e flora**. Planaltina, Embrapa-CPAC, .89-166p, 1998.

ROCHA, M. F. V. **Influência do espaçamento e da idade na produtividade da madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* para energia**. 2011, 84 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

RODRIGUEZ, L. C. E.; BUENO, A. R. S.; RODRIGUES, F. Rotações de eucaliptos mais longas: análise volumétrica e econômica. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 51, p. 15-28, 1997.

SALIBA, E. O. S.; RODRIGUEZ, N. M.; MORAIS, S. A. L.; PILÓ-VELOSO, D. Ligninas – Métodos de obtenção e caracterização química. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n.5, p.917-928, 2001.

SANTANA, W. M. S. **Crescimento, produção e propriedades da madeira de um clone de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* com enfoque energético**. 2009, 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2009.

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

SANTOS, M. A. S. Parâmetros da qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno. In: **Fórum nacional de carvão vegetal**. 2008a, Belo Horizonte. Disponível em: <painelflorestal.com.br/exibeNews.php?id=1784>. Acesso em: 31 Maio, 2009.

SANTOS, R. C. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. 2010, 173 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2010.

SEDEROFF, R.; CHANG, H. Lignin Biosynthesis. In: LEWIS, M., GOLDSTEIN, I.S. (ed.). **Wood structure and composition**. N.i. : Marcel Dekker, 1991p.

SILVA, J. C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira**. 2002, 181 f. Tese (Doutorado em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2002.

SILVA, J. C.; OLIVEIRA, J. T. S.; TOMAZELLO FILHO, M.; KEINERT, JÚNIOR, S.; MATOS, J. L. M. Influência da idade e da posição radial na massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. MAIDEN. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 34, n. 1, p. 13-22, 2004.

SILVA, M. G. **Produtividade, idade e qualidade da madeira de *Eucalyptus* destinada à produção de polpa celulósica branqueada**. 2011, 95 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Produtos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP, 2011.

SJÖSTRÖM, E.; WESTERMARK, U. Chemical composition of wood and pulps: Basic constituents and their distribution. In: SJÖSTRÖM, E.; ALÉN, R. (ed.). **Analytical methods in wood chemistry, pulping, and papermaking**. Berlin: Springer-Verlag, 1998. 316 p.

SJÖSTRÖM, E. **Wood Chemistry – Fundamentals and applications**. Academic Press, Inc. 1992, 293 p.

SOARES, C. P. B.; DEMOLINARI, R. A.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L. Predição do crescimento em povoamentos clonais de eucalipto não desbastados utilizando matrizes de transição não estacionárias. **Revista Árvore**, v. 33, n. 5, p. 831–840, 2009.

STATSOFT INC. **Statistica data analysis system version 8.0**. Tulsa: Statsoft Inc., 2008.

STURION, J. A.; PEREIRA, J. C. D.; CHEMIN, M. S. Qualidade da madeira de *Eucalyptus viminalis* para fins energéticos em função do espaçamento e da idade de corte. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 16, p. 55-59, 1988.

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

TELMO, C.; LOUSADA, J. The explained variation by lignin and extractive contents on higher heating value of wood. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, p. 1663-1667, 2011.

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

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

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. da. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de Jatobá (*Himenea courbaril* L.). **Scientia Agraria**, Piracicaba, v. 2, n. 1/2, p. 45-53, 2001.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, J. R. M.; MORI, F. A.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M.; MENDES, L. F. B. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 178-186, 2005.

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

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

VITAL, B. R.; ANDRADE, A. M.; VALENTE, O. F.; CAMPOS, J. C. C. Influência da casca no rendimento e na qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis*. **IPEF**, Piracicaba, n. 41/42, p. 44-49, 1989.

WADT, P. G. S.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; DIAS, L. E. Variação no estado nutricional de eucaliptos por influencia do material genético e da idade da árvore. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 10, p. 1797-1803, 1999.

WHISTLER, R. L.; CHEN, C. Hemicelluloses. In: LEWIN, M.; GOLDSTEIN, I. (ed). **Wood structure and composition**. Nova York, Marcel Dekker, Inc., 1991. 487 p.

ZAVARIN, E.; COOL, L. Extraneous materials from wood. In: LEWIN, M.; GOLDSTEIN, I. (ed). **Wood structure and composition**. Nova York, Marcel Dekker, Inc., 1991. 487 p.