



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO - UFRRJ  
INSTITUTO DE FLORESTAS - IF  
CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO E ATIVAÇÃO DE CARVÕES DE ACACIA  
(*Acacia mangium* Willd), DE GUACHAPELLE (*Pseudosamanea guachapelle* Kunth ex Hams)  
E DE EUCALIPTO (*Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden)  
EM VAPOR D'ÁGUA SUPERAQUECIDO**

Enoque Leda de Arruda

Orientador: Professor Dr. Azarias Machado de Andrade

SEROPÉDICA, RJ  
JANEIRO DE 2008

## FICHA CATALOGRÁFICA

UFRRJ / Biblioteca Central / Divisão de Processamentos Técnicos

---

662.74  
A779a  
M

Arruda, Enoque Leda de, 1980-  
Avaliação do potencial energético e  
ativação de carvões de acácia (*Acácia  
mangium* Wild), de guachapelle  
(*Pseudosamanea guachapelle* Kunth ex Hams)  
e de eucalipto (*Eucalyptus grandis* Hill ex  
Maiden) em vapor d'água superaquecido /  
Enoque Leda de Arruda. - 2008.  
22f : il.

Orientador: Azarias Machado de Andrade.  
Monografia - Universidade Federal Rural  
do Rio de Janeiro, Instituto de Florestas.  
Bibliografia: f. 16-19.

1. Carvão vegetal - Teses. 2.  
Carbonização - Teses. I. Andrade, Azarias  
Machado de, 1959-. II. Universidade  
Federal Rural do Rio de Janeiro. Instituto  
de Florestas. *III. Título.*



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO - UFRRJ  
INSTITUTO DE FLORESTAS – IF  
CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL

Avaliação do potencial energético e ativação de carvões de acácia (*Acacia mangium* Willd),  
de guachapelle (*Pseudosamanea guachapelle* Kunth ex Hams) e de eucalipto  
(*Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden) em vapor d'água superaquecido

Enoque Leda de Arruda

Sob a orientação do professor  
Dr. Azarias Machado de Andrade

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia  
Florestal, como requisito parcial para obtenção do  
Título de Engenheiro Florestal, Instituto de  
Florestas da Universidade Federal Rural do Rio  
de Janeiro.

Seropédica, RJ  
Janeiro de 2008

Monografia aprovada em: 30/01/2008

Comissão examinadora:

Orientador: \_\_\_\_\_  
Professor Dr. Azarias Machado de Andrade

Titular 1: \_\_\_\_\_  
Professor Dr. Acacio Geraldo de Carvalho

Titular 2: \_\_\_\_\_  
Professor Dr. Edvá Oliveira Brito

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais João Pedro e Maria das Dores, pelo apoio e incentivo incondicional;

Aos meus irmãos, pela amizade sincera;

A meu avô Manoel Leda e minha avó Sebastiana Arruda, pelo carinho de sempre.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, Pai todo poderoso;

À minha família pela confiança em mim depositada, me incentivando a cada passo da minha jornada. Especialmente os meus pais João Pedro e Maria das Dores, meu irmão Bruno, minhas irmãs Ana Alice, Ana Angélica e Sebastiana, os meus tios Arruda, José Bonifácio, Antônio Arruda, Zé Arruda e tia Sônia Leda, pelos constantes incentivos e apoios;

Ao professor orientador e amigo Azarias Machado de Andrade, por me orientar e sempre dispor de tempo para ouvir e me ensinar;

A grande família 214: Marcos Roberto, Mauricio Martins, Márcio Porton, Alysson Soares, Gustavo Ávila, Wagner Mendes, Vladimir Lemos, Wesley Soares, Eduardo Silva e Jeferson Alves;

Aos grandes amigos de UFRRJ, que levarei na memória, Samuel de Deus, Paulo Boa Sorte, Khalil Menezes, Carlos Antônio Barreto, Silvana Aparecida, Afrânio Madeiro, Lírio Morais, Evanilson Lima, Helcivan Reis, Helcides Reis e Wemerson;

Aos Engenheiros Florestais Evandro Lima, José de Sá, Ademir e Raimundo Morais, pelo incentivo ao iniciar o curso nesta instituição;

Aos colegas de graduação, pelo companheirismo, especialmente Antônio José Neto, Vanessa Azevedo, André Oliveira, Denis Martins, Manon Perdomo e Victor Satiro.

Ao Engenheiro Agrônomo Khalil Rodrigues de Menezes e ao Engenheiro Florestal Alessandro de Paula Silva, pela ajuda nas análises estatísticas;

A todos os professores, pelo ensino e atenção a mim prestados durante esta jornada;

Ao pesquisador da Embrapa Agrobiologia Alexander Silva Resende, pela ajuda na obtenção dos materiais vegetais utilizados na pesquisa;

Ao servidor técnico administrativo do Instituto de Florestas José Carlos, pela ajuda indispensável ao desenvolvimento deste trabalho;

A todos que estiveram direta e indiretamente envolvidos na realização do presente trabalho;

À UFRRJ, por dispor de condições as quais me possibilitaram cumprir mais uma etapa de minha vida.

## **BIOGRAFIA**

ENOQUE LEDA DE ARRUDA, filho de João Pedro Lima de Arruda e de Maria das Dores Leda de Arruda, nasceu na cidade de Grajaú, Estado do Maranhão, em 10 de março de 1980.

Iniciou os estudos de alfabetização e primário em 1988 na Escola Municipal Major Altino, na localidade Brejão dos Arrudas, zona rural do município de Grajaú, MA, hoje município de Formosa da Serra Negra, MA, onde seus pais residem até hoje.

Em 1993 ingressou no Complexo Educacional de Primeiro e Segundo Grau Desembargador Nicolau Dino, na cidade de Grajaú, MA, concluindo o ginásio em 1996.

No ano de 1998 ingressou nos cursos de Ensino Médio e Técnico em Agropecuária na Escola Agrotécnica Federal de Araguatins, Estado do Tocantins, concluindo os estudos em 2000.

Em 2003 ingressou no Curso de Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

## RESUMO

Nesta pesquisa foram efetuadas pirólises das madeiras de acácia (*Acacia mangium*), guachapelle (*Pseudosamanea guachapelle*) e eucalipto (*Eucalyptus grandis*), às temperaturas máximas de 400 °C, 500 °C e 600 °C. O maior rendimento médio em carvão foi apresentado pela madeira de eucalipto (*E. grandis*) pirolisada à temperatura máxima de 400 °C (31,22%). Foram observadas tendências à diminuição dos teores de materiais voláteis e ao aumento dos teores de carbono nos carvões com o aumento da temperatura máxima de pirólise. Teor de carbono e rendimento em carbono estatisticamente superiores foram apresentados pelo carvão da madeira de eucalipto (*E. grandis*) pirolisada à temperatura máxima de 600 °C (90,75% e 24,80%, respectivamente). Em seguida, os carvões foram ativados sob a ação de vapor superaquecido e comparados entre si por meio de testes de adsorção/absorção em suspensão de água bideionizada e 1% de pigmentos coloridos. Os carvões ativados das madeiras de acácia (*A. mangium*), pirolisada a 400 °C e 500 °C, de guachapelle (*P. guachapelle*) pirolisada a 400 °C e de eucalipto (*E. grandis*) pirolisada a 500 °C se destacaram em relação aos demais carvões e podem ser recomendados para descolorir e purificar água e demais bebidas.

Palavras-chave: carvão vegetal, carvão ativado, ativação, adsorção e absorção.

## ABSTRACT

In this research had been effected pyrolyses of acacia (*Acacia mangium*), guachapelle (*Pseudosamanea guachapelle*) and eucalipto (*Eucalyptus grandis*), under maximum temperatures of 400 °C, 500 °C and 600 °C. The biggest average income in coal was presented by the wood of eucalipto (*E. grandis*) pyrolysed under maximum temperature of 400 °C (31,22%). Trends to the reduction of texts of volatile materials and to the increase of carbon texts had been observed in the coals with the increase of the maximum temperature of pyrolysis. Superior carbon text and income in carbon had been presented by the coal of the wood of eucalipto (*E. grandis*) pyrolysed under maximum temperature of 600 °C (90,75% and 24,80%, respectively). After that, the coals had been activated under overheated vapor action and compared between itself by means of tests of adsorption/absorption in suspension of water and 1% of colorful pigments. The activated coals of acacia wood (*A. mangium*), pyrolysed under 400 °C and 500 °C, guachapelle wood (*P. guachapelle*) pyrolysed under 400°C and eucalipto wood (*E. grandis*) pyrolysed under 500 °C had detached in relation to the others coals and can be recommended to deink and to clean water and drunk.

Key words: charcoal, actived coal, activation, adsorption and absorption



## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1 Espécies Florestais.....	2
2.2 Carvão Vegetal.....	3
2.3 Processo de Carbonização.....	4
2.4 Processos de Ativação de Carvão.....	5
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	6
3.1 Matéria-Prima Vegetal.....	6
3.2 Pirólise dos Materiais Lignocelulósicos.....	6
3.3 Análise Química Imediata dos Carvões.....	7
3.4 Ativação dos Carvões.....	7
3.5 Testes de absorção e adsorção de pigmentos coloridos pelos carvões.....	8
3.6. Análise dos Dados .....	10
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	11
5. CONCLUSÃO.....	16
6. RECOMENDAÇÃO.....	16
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	16
8. ANEXOS.....	20
Apêndice A .....	21

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Cadinho metálico, usado para a destilação seca dos materiais vegetais, Seropédica – RJ, 2007..... 7
- Figura 2** - Sistema laboratorial usado para a destilação seca dos materiais vegetais, Seropédica – RJ, 2007.....7
- Figura 3** - Peneiras instaladas dentro de um recipiente e recebendo a aplicação do vapor superaquecido, possibilitando a ativação dos carvões, Seropédica – RJ, 2007...8
- Figura 4** - Ensaio de absorção/adsorção de pigmentos coloridos, com os carvões vegetais ativados e não-ativados, Seropédica – RJ, 2007.....9
- Figura 5** - Amostra de carvão impregnado com pigmentos coloridos, comprovando a capacidade de absorção/adsorção, principalmente dos carvões ativados, Seropédica – RJ, 2007.....15

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** - Tratamentos analisados no decorrer da pesquisa, Seropédica – RJ, 2007.....**10**
- Tabela 2** - Valores médios dos respectivos rendimentos em carvão (RGR), gases condensáveis (RGC) e gases incondensáveis (RGI) das madeiras de acácia (*A. mangium*), guachapelle (*P. guachapelle*) e de eucalipto (*E. grandis*), Seropédica – RJ, 2007.....**11**
- Tabela 3** - Valores médios dos teores de materiais voláteis (TMV), de Cinza (TCZ), de carbono fixo (TCF) e rendimento em carbono fixo (RCF), dos carvões das espécies analisadas, Seropédica – RJ, 2007.....**12**
- Tabela 4** - Teores médios de pigmentos coloridos que foram adsorvidos/absorvidos pelos carvões das madeiras de acácia (*A. mangium*), guachapelle (*P. guachapelle*) e de eucalipto (*E. grandis*), ativados e não ativados, Seropédica – RJ, 2007.....**14**
- Tabela 5** - Teores de pigmentos que foram adsorvidos/absorvidos pelos carvões das madeiras de acácia (*A. mangium*), guachapelle (*P. guachapelle*) e de eucalipto (*E. grandis*), ativados e não ativados, com interação entre as variáveis analisadas, Seropédica – RJ, 2007.....**15**
- Tabela 1A** - Teores de corantes que foram absorvidos/adsorvidos, pelos carvões de acácia (*A. mangium*), guachapelle (*P. guachapelle*) e eucalipto (*E. grandis*), ativados e não ativados, Seropédica – RJ , 2007.....**21**



## 1. INTRODUÇÃO

O aproveitamento da madeira como fonte de energia remonta à pré-história. Com o domínio do fogo pelo homem primitivo, a lenha passou a ser usada como principal combustível. O carvão da madeira também é um combustível fabricado desde a antiguidade, já sendo comum na Gália, por ocasião da invasão romana. Os egípcios, persas e chineses faziam uso do carvão vegetal para a geração das altas temperaturas necessárias para a fabricação de armas e de moedas. No Egito eram utilizados vasos fechados para a destilação de lenha e, a exemplo dos persas, fabricava-se o carvão e obtinha-se o alcatrão vegetal (ELIAS, 1961, apud ANDRADE e CARVALHO, 1998).

Atualmente, muito se tem discutido acerca dos problemas gerados pelas frequentes crises do petróleo, o que resulta na percepção da vulnerabilidade do planeta em relação às suas fontes energéticas. Pesquisas buscando fontes alternativas de energia têm sido desenvolvidas em vários países, visando-se, principalmente, o conhecimento de novos combustíveis derivados de fontes renováveis. Dentro deste contexto, cresce a importância da madeira para fins energéticos, quando comparada com os combustíveis fósseis. Além de renovável a madeira é menos poluente, caracterizando-se por um ciclo fechado em relação ao dióxido de carbono. Em regime de produção sustentada, aquilo que a madeira libera de dióxido de carbono para a geração de energia, a floresta consome no seu metabolismo. O mesmo não acontece com os combustíveis fósseis que lançam na atmosfera o CO<sub>2</sub>, além de outros gases, como os compostos de enxofre, que praticamente não são produzidos quando se usa a madeira. Em relação à energia da biomassa florestal, o Brasil destaca-se pelos seguintes motivos: existência de significativas extensões de terra com vocação florestal, condições excepcionais para a utilização de biomassa florestal, tecnologias disponíveis ao setor, clima favorável, alto índice solarimétrico, boa precipitação e grande potencial hídrico (ANDRADE e CARVALHO, 1998; NOGUEIRA et al., 2000).

A lenha sustenta 18% de todo o consumo de energia do Brasil, o que equivale a um consumo de 88 milhões de toneladas anuais. Grande parte dessa lenha é transformada em carvão vegetal para diversas aplicações, dentre as quais se destacam os usos siderúrgico e doméstico (VALENTE, 1997). O carvão vegetal é um dos termos redutores mais importantes para a siderurgia nacional. Em 1999, o consumo de carvão vegetal alcançou 26,9 milhões de metros cúbicos, sendo 70% provenientes de florestas plantadas. Há duas décadas o setor siderúrgico era considerado o “vilão” do setor florestal, principalmente por utilizar madeiras nativas em larga escala. Esse quadro vem mudando, com o aumento da utilização de madeira oriunda de florestas plantadas, na sua grande maioria de espécies do gênero *Eucalyptus*. Pouco se conhece acerca do potencial energético de muitas espécies florestais. O pré-conhecimento de tais potencialidades poderia resultar no consorciamento destas com o eucalipto, amenizando os impactos provocados pela monocultura e, indiretamente, contribuir para a diminuição da pressão sobre algumas espécies da flora brasileira (ANDRADE e CARVALHO, 1998; NOGUEIRA et al., 2000).

Além do uso siderúrgico, o carvão vegetal encontra uma ampla aplicação no setor industrial, sobretudo na fabricação do cimento, nas indústrias química e farmacêutica, na indústria alimentícia etc. O seu espectro de utilização aumenta ainda mais quando o mesmo é submetido ao processo de ativação. Segundo SANTANA e ASSUMPCÃO (sd), o carvão ativado possui muitas aplicações, dentre as quais se destacam: nas refinarias de açúcar, para purificação e branqueamento; na fabricação de óleos e gorduras; na produção de bebidas alcoólicas, para a retirada de odores desagradáveis e adsorção de partículas em suspensão; na

purificação de produtos farmacêuticos; no tratamento de água, eliminando odores e gostos desagradáveis; na purificação do ar; na recuperação de solventes orgânicos; na adsorção de moléculas corantes durante a fabricação de plásticos; etc.

Com a ativação em vapor superaquecido, os resíduos de hidrocarbonetos ( $C_nH_{2n+2}$ ) são dissolvidos e retirados da superfície do carvão vegetal por arraste ou liquefação. O mesmo fenômeno ocorre em relação ao alcatrão residual, que é solubilizado e, ou, arrastado pelo vapor d'água aquecido. Com a “lavagem” da superfície do carvão vegetal em vapor superaquecido ocorre uma erosão superficial e, conseqüentemente, advirá a desobstrução dos poros e capilares. Isto pode aumentar significativamente a capacidade adsortiva/absortiva do carvão vegetal, tornando-o ativado (ANDRADE e CARVALHO, 1998).

As propriedades de um carvão ativado são muito influenciadas pela matéria-prima florestal usada na sua produção e pelas condições de ativação. Com base nestes fatores, os carvões ativados podem apresentar propriedades adsortivas diferentes e servir para variados usos. Para carvões derivados de algumas folhosas, como as acácias, e de algumas espécies de bambu, há necessidade de temperaturas de pré-ativação da ordem de 800 a 950°C (SANTANA e ASSUMPÇÃO, sd). Espécies florestais como a aroeira (*Astronium urundeuva*) e a acácia (*Acacia mangium*) são freqüentemente citadas como potenciais fornecedoras de material lignocelulósico para o setor industrial e para fins energéticos, principalmente na forma de carvão vegetal (DANIEL et al., 1997; VALE et al., 2000; VEIGA et al., 2000; QUISEN, 2004).

A presente pesquisa objetivou o estudo das potencialidades energéticas da acácia (*Acacia mangium*), guachapelle (*Pseudosamanea guachapelle*) e eucalipto (*Eucalyptus grandis*), a partir da análise dos seus respectivos carvões, pirolisados às temperaturas máximas de 400°C, 500°C e 600°C e, posteriormente, ativados sob a ação de vapor superaquecido.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 - Espécies Florestais

A acácia (*A. mangium*) segundo (MARSARO JR., s.d.), apud (MARTO et al., 2007,) apresenta uma área plantada em torno de 600 mil ha em todo o mundo, apresenta uma relevante importância do ponto de vista social e industrial no reflorestamento. Sendo, uma das espécies de maior utilização, tendo a sua produção destinada para a produção de celulose, madeira para movelaria e construção, matéria prima para compensados, combustível, controle de erosão, quebra-vento e sombreamento, além de ser aproveitada para a produção de carvão vegetal. De acordo com TONINI e VIEIRA (2006), apud (MARTO et al., 2007) as maiores áreas de cultivo de acácia (*A. mangium*) se concentram no Sudeste Asiático, principalmente na Indonésia e Malásia, tendo como origem a Austrália e Papua Nova Guiné (BALIEIRO et al., 2004). A espécie é uma leguminosa pioneira que vem despertando a atenção dos técnicos e pesquisadores pela sua rusticidade, rapidez de crescimento e, principalmente, por ser nitrificadora (VEIGA et al., 2000, apud MARTO et al., 2007). A madeira de acácia (*A. mangium*) apresenta uma densidade básica que varia de 0,42 a 0,50 g/cm<sup>3</sup>. O poder calorífico de sua madeira está numa faixa de 4800 a 4900 KCal/kg. (LEILLES et al., 1996, apud MARTO et al., 2007).

Em um plantio de acacia (*A. mangium*) no município de Seropédica, RJ, foi observado um crescimento satisfatório e altura média das árvores de 17,2m em 5 anos, valor semelhante ao encontrado por COLE et al. (1996), apud BALIEIRO et al. (2004), para plantas que cresceram em solos não adubados e adubados em um experimento com acacia (*A. mangium*) realizado no Hawaii. A capacidade que a espécie apresentou de acumular biomassa em seu tronco ( $95\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) esteve próxima à produtividade do *Eucalyptus grandis*, em uma área adjacente à avaliada ( $99,7\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). No Brasil, a *A. mangium* pode representar uma alternativa silvicultural para áreas degradadas, nas quais o eucalipto não apresente aptidão para crescer ou os custos de sua implantação sejam inviáveis.

A guachapelle (*P. guachapelle*) com origem no sudeste do México, pode ser encontrada em toda a América Central e ilhas do Caribe. Os maiores plantios comerciais estão localizados na Costa Rica, Guatemala e Honduras. Possui porte arbóreo médio a grande, de rápido crescimento, alcançando cerca de 20m de altura, ocasionalmente 25m. A sua madeira, que a partir dos 12 anos pode ser empregada na serraria, possui uma densidade básica entre 0,55 e  $0,60\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . A precipitação pluviométrica na sua região de origem varia de 600 a  $1800\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ , com temperaturas no meses mais quentes variando entre 30 e 40 °C e nos meses mais frios entre 10 e 28 °C, com médias anuais em torno de 24 a 28 °C. A *P. guachapelle* é uma espécie pioneira e boa fixadora de nitrogênio. Dentre os usos da espécie destacam-se: a alimentação de ruminantes, lenha de excelente qualidade, sombreamento de pastagens, construções rurais, serraria, vigas, tábuas, pisos e combustível (RODRIGUEZ DELGADO, 1995).

O eucalipto (*E. grandis*) ocorre naturalmente na Austrália, nos Estados de New South Wales e Queensland, em áreas de altitude de 300 a 900m, com precipitação pluviométrica variando de 1000 a 1700mm, predominantemente no verão, com estação seca não ultrapassando 3 meses, com geadas ocasionais nas regiões mais interiores da área de ocorrência natural. As temperaturas máximas variam entre 29 a 32 °C e as mínimas entre 5 a 6°C. A madeira de *E. grandis* é leve e fácil de ser trabalhada, sendo utilizada em larga escala, na Austrália e na África do Sul, como madeira de construção e para caixotaria. Plantações bem manejadas desta espécie podem produzir madeira excelente para serraria e laminação. No estado de São Paulo o *E. grandis* é a principal fonte de matéria-prima para a produção de celulose e papel (FERREIRA, 1979). A madeira de *E. grandis* possui um amplo espectro de utilização, podendo ser utilizada para a produção de lenha, carvão, papel e celulose, em serrarias, para caixotaria, produção de lápis, caixa de fósforo, palito de fósforo, movelaria, etc.

A madeira de *E. grandis* possui uma coloração rosa até marrom-avermelhada clara, sendo bastante flexível, não possuindo grande resistência mecânica, com densidade básica variando de 0,40 e  $0,55\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  (LAMPRECHT, 1990). O seu cultivo é recomendado em regiões de clima úmido, frio e subúmido. Desenvolve-se bem em solos de textura média a argilosos (PAIVA et al., 2001).

## 2.2 - Carvão Vegetal

A lenha é o terceiro material energético primário consumido no Brasil, com um consumo médio, nos últimos 26 anos, de  $9,78 \times 10^7$  toneladas/ano (VALE et al., 2000). Segundo Bem (1996), citado por VALE et al. (2000), no ano de 1995, de um consumo de  $7,65 \times 10^7$  toneladas, 45,05 % foram utilizados, de forma indireta, prioritariamente para a produção

de carvão vegetal, sendo que os outros 54,95 % foram queimados diretamente em fogões e fornalhas.

O Brasil é o maior produtor e, ao mesmo tempo, maior consumidor de carvão vegetal do mundo. Em 2005 a produção nacional foi de 5,5 milhões de toneladas o que significou um aumento na produção de 17,1 % em relação ao ano anterior. Cerca de 2,5 milhões de toneladas (46 %) foram oriundos de florestas plantadas cujo principal produtor foi o Estado de Minas Gerais, com produção de 1,74 milhões de toneladas. O consumo neste mesmo ano foi de 38,05 milhões de mdc (SBS, 2006). Este insumo energético é em grande parte utilizado pelo setor industrial brasileiro, principalmente pelo segmento siderúrgico.

O Estado de Minas Gerais é o mais importante pólo de produção de produtos siderúrgicos do país, sendo que a produção mineira de ferro gusa corresponde à cerca de 60% da produção nacional e utiliza, principalmente, o carvão vegetal como termo-redutor. O maior consumo de carvão vegetal no Brasil está concentrado nos pólos siderúrgicos de Minas Gerais (64 %) e de Carajás (21 %), este último localizado nos estados do Maranhão e Pará (AMS, 2004).

De acordo com a ABRACAVE (1999), no Brasil operam 107 altos-fornos a carvão vegetal que juntos produziram  $6.810 \times 10^3$  toneladas de ferro-gusa e, para esta produção, consumiram  $26,9 \times 10^6$  mdc no ano de 1998. Além do uso siderúrgico, o carvão vegetal encontra uma ampla aplicação no setor industrial, sobretudo na fabricação do cimento, nas indústrias química e farmacêutica, na indústria alimentícia etc.

O segmento cimenteiro, que vem substituindo de modo crescente o óleo combustível nos últimos anos, passou de 3,0 % em 1980 para 11,0 % do consumo nacional de carvão vegetal e os setores residencial, comercial e público corresponderam a 9,0 % do consumo em 1984 (FONTES, 1989).

### **2.3 - Processo de Carbonização**

A carbonização da madeira é caracterizada pela decomposição térmica parcial da mesma em ambientes fechados, na ausência ou na presença de quantidades controladas de oxigênio, envolvendo uma série de transformações físicas e químicas extremamente complexas (CARVALHO, 1997).

WENZL (1970), apud CARVALHO (1997), diz que o processo de carbonização consiste em concentrar carbono e retirar oxigênio da madeira, sendo totalmente dependente da temperatura, pois maiores temperaturas resultam em maiores concentrações de carbono no resíduo. Contudo perde-se carbono junto com gases durante a retirada do oxigênio, o que resulta em um baixo rendimento em carbono.

O comportamento da madeira durante a carbonização é o resultado do somatório dos comportamentos dos seus constituintes químicos, nas várias fases de aquecimento (CARVALHO, 1997). WENZL (1970), apud CARVALHO (1997), diz que tais fases se caracterizam por regiões bastante distintas em grau de decomposição térmica. A primeira fase, denominada fase A, se inicia quando a temperatura do ambiente atinge valores em torno de 150 °C sendo detectada na fumaça a presença de ácido acético, ácido fórmico, glioxial e gases efluentes constituídos de vapor d'água e traços de CO<sub>2</sub>. Esta fase é curta e se caracteriza basicamente pela secagem da madeira uma vez que a temperatura no interior das peças ainda é baixa. Na fase B, observada entre 200 °C e 280 °C são gerados gases semelhantes aos da fase A, no entanto, há uma moderação na quantidade de vapor d'água e liberação de monóxido de carbono. Ocorre a quebra das hemiceluloses, a despolimerização da celulose nas



regiões amorfas e a ruptura da lignina em blocos complexos. Até esta fase as reações são de natureza endotérmica. Quando a temperatura ultrapassa os 280 °C inicia-se a fase C, ocorrendo a pirólise propriamente dita. As reações nesta fase são exotérmicas, quando a decomposição térmica da madeira pode se manter apenas com a energia liberada pela quebra das ligações das unidades básicas de celulose, hemiceluloses e lignina. Nesta fase são gerados monóxidos de carbono, metano, formaldeído, ácido fórmico, ácido acético, metanol, hidrogênio e alcatrões. Ao ser atingida a temperatura de 450 °C inicia-se a fase D, quando não há mais madeira, apenas carvão. Nesta fase, os efluentes são altamente inflamáveis, com a capacidade de manterem a combustão.

A velocidade do processo de carbonização exerce grande influência nos rendimentos e na qualidade dos produtos obtidos (BROWNE 1958; WENZL, 1970; MENDES et al., 1982 e OLIVEIRA et al., 1982). VELLA et al. (1989), analisando a madeira de *Eucalyptus tereticornis* de um povoamento de nove anos de idade, constataram que aumentos na velocidade de carbonização acarretam reduções na densidade aparente do carvão, no rendimento em carvão, no teor de matérias voláteis e aumento no teor de cinza.

Aumentos na temperatura final de carbonização proporcionam aumentos no teor de carbono e reduções no rendimento em carvão e no teor de matérias voláteis. O poder calorífico do carvão equivale ao do carbono. No entanto, o carvão que possua um alto teor de matérias voláteis pode apresentar um poder calorífico mais elevado, desde que os compostos voláteis sejam ricos em hidrogênio (OLIVEIRA, 1982).

A qualidade do carvão vegetal está vinculada às características físicas e químicas da lenha carbonizada. COLLET (1955), BRITO & BARRICHELO (1978) e MARTINS (1980) verificaram que a madeira que apresenta elevado teor de lignina, provavelmente, dará origem a um carvão com elevado teor de carbono. ANDRADE (1989) menciona que os componentes minerais encontrados na madeira e, em maior concentração, na casca, são repassados para o carvão. Quando o carvão vegetal se destina à produção de alguns tipos de ferros-liga ou de carbureto de cálcio, a presença de alguns componentes minerais é indesejável. O fósforo presente no carvão pode se incorporar às ligas metálicas tornando-as quebradiças, menos maleáveis e com campos favoráveis à propagação de trincas e fissuras. Neste caso, especificamente, a casca tem sido referenciada como uma translocadora de minerais para o carvão vegetal e, apesar de representar, em média, 10 a 15% do volume total da árvore, é tratada como uma porção indesejável.

## **2.4 - Processos de Ativação de Carvão**

De acordo com SANTANA & ASSUMPCÃO (sd) todo e qualquer processo de ativação de carvão é conduzido de tal forma a controlar os fatores que diretamente influem nas propriedades de adsorção do produto. As características principais envolvidas no fenômeno de adsorção podem ser classificadas em: ação capilar, grande extensão da área superficial e centros ativos. A ação capilar se manifesta por meio de forças que agem intersuperficialmente. Assim, uma substância qualquer pode ficar retida no capilar de um outro material. Por outro lado, a desobstrução de poros na superfície do carvão, aumenta a área superficial, obtendo-se uma elevada área específica, o que facilita o contato entre o carvão e o material a ser absorvido. Isto traz um aumento do poder de adsorção, por permitir que se manifeste a ação capilar. Em relação aos centros ativos, os mesmos são definidos como sendo a soma das forças que permitirão que uma molécula adsorvida fique presa ao carvão

ativo. Os centros ativos correspondem, possivelmente, a arranjos geométricos específicos dos átomos da superfície.

SANTANA & ASSUMPÇÃO (sd) agruparam os métodos de ativação em métodos físicos, quando as operações de ativação levam de 15 minutos a algumas horas, dependendo da atividade desejada, pois quanto maior o tempo de ativação, maior será o poder de adsorção conferido ao carvão. Tal tempo de ativação é limitado, pois o processo de oxidação envolve uma perda de carvão, havendo um ponto acima do qual não é mais viável conduzir o processo de ativação. Os agentes de ativação deste método são: vapor de água superaquecido, dióxido de carbono e outros gases oxidantes. Métodos químicos: utiliza como agentes de ativação o cloreto de zinco,  $K_2S$  e  $KCNS$ , sais desidratantes, ácido fosfórico, dolomita e outros agentes como a soda cáustica e o ácido sulfúrico.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 - Matéria-Prima Vegetal

As madeiras de acacia (*A. mangium*), guachapelle (*P. guachapelle*) e de eucalipto (*E. grandis*) foram obtidas de cinco árvores de cada espécie, coletadas num experimento instalado em 1993 no Campo Experimental da EMBRAPA-AGROBIOLOGIA, no município de Seropédica, RJ.

Após o abate, de cada árvore-amostra foram retirados seis discos de madeira, com aproximadamente três centímetros de espessura, para a realização das análises físico-químicas. Os discos foram retirados nas seguintes alturas do fuste: o primeiro a 0,3 m do nível do solo, o segundo a 1,30 m do nível do solo (altura do peito) e os quatro restantes a 25, 50, 75 e 100 % da altura comercial. Em seguida, o material foi acondicionado em embalagens plásticas devidamente identificadas e encaminhado para as análises posteriores no Laboratório de Energia da Madeira do Departamento de Produtos Florestais, no Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

#### 3.2 - Pirólise dos Materiais Lignocelulósicos

As amostras dos materiais lenhosos foram cavaqueadas e secas até 0% de umidade em uma estufa regulada a  $105 \pm 3$  °C. O material a.s. (absolutamente seco) de cada espécie florestal foi submetido ao processo de pirólise às temperaturas máximas de 400°C, 500°C e 600°C.

No decorrer das destilações os vapores liberados foram condensados, quantificados e armazenados. O carvão vegetal, analisado qualitativa e quantitativamente, foi produzido num cadinho metálico (Figura 1), acondicionado dentro de uma mufla devidamente adaptada. Os gases incondensáveis, com alguns constituintes inflamáveis na sua composição, foram queimados na saída do sistema de arrefecimento. De posse das massas de cada um dos produtos foram obtidos os rendimentos gravimétricos em carvão, em líquido pirolenhoso e em gases incondensáveis. A Figura 2 apresenta o sistema adaptado para a pirólise das matérias-primas lenhosas analisadas.



Figura 1 - Cadinho metálico, usado para a destilação seca dos materiais vegetais.

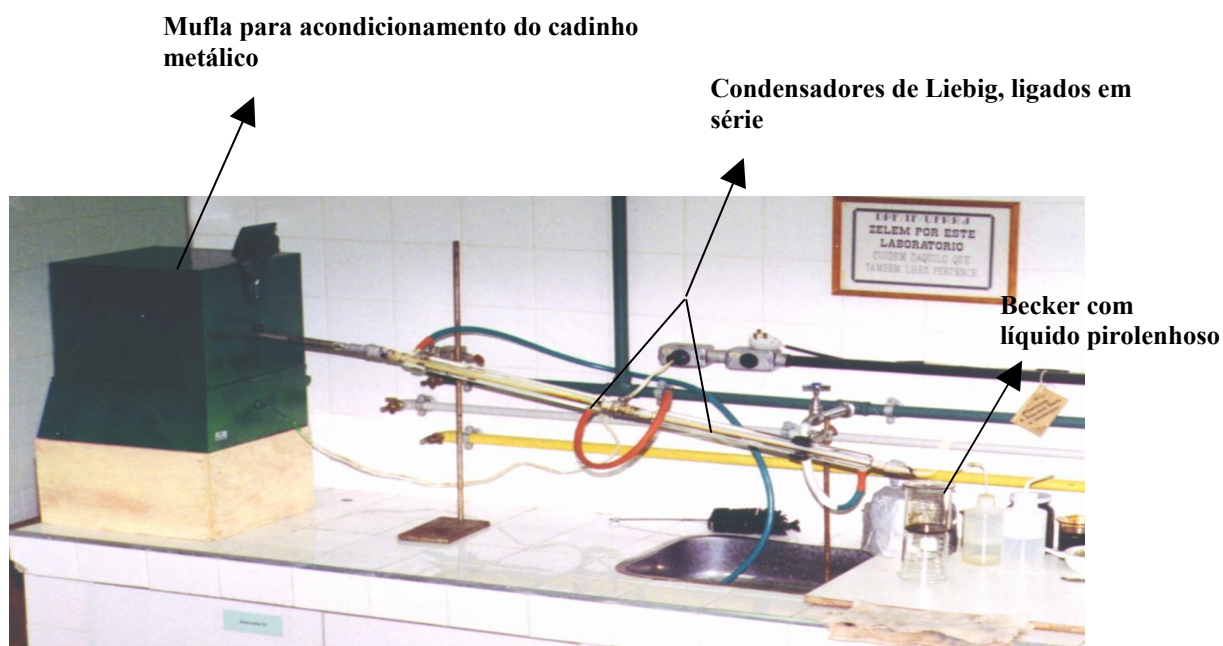


Figura 2 - Sistema laboratorial usado para a destilação seca dos materiais vegetais.

### 3.3 - Análise Química Imediata dos Carvões

Após as determinações das respectivas massas totais, amostras representativas dos carvões foram separadas, maceradas e peneiradas. Nas análises químicas subseqüentes foram utilizadas amostras com a granulometria média inferior a 1,00 mm e superior a 0,25 mm, mantidas numa estufa regulada a  $105 \pm 3$  °C por cerca de 48 horas. Posteriormente, foram realizadas as análises das amostras dos respectivos carvões, utilizando-se alíquotas de 1 grama e adotando-se a norma ASTM D 1762-64, modificada por OLIVEIRA et al. (1982), determinando-se os teores de matérias voláteis, de cinza e de carbono fixado no carvão vegetal. De posse do rendimento em carvão vegetal e do teor de carbono obteve-se o rendimento em carbono fixo, que é utilizado para expressar a qualidade do carvão.

### 3.4 - Ativação dos Carvões

As amostras de carvões a serem ativadas foram secas em estufa regulada a  $105 \pm 3$  °C durante 24 horas, para se obter uma aferição correta de suas massas antes do processo de ativação. Os carvões foram ativados entre duas peneiras de aço inoxidável, com aberturas de

1,0 e 0,25 mm, sobrepostas e devidamente instaladas dentro de um recipiente com 12 litros de capacidade volumétrica. Vapor superaquecido, proveniente de um reator com a capacidade volumétrica de 20 litros e pressão de vapor de 15 kgf/cm<sup>2</sup>, passou através das malhas das peneiras, erodindo as superfícies dos carvões durante 15 minutos, no momento da ativação o reator registrava uma temperatura máxima de 180 °C, o vapor d'água direcionado nas amostras de carvão a serem ativados registrava uma temperatura que variava entre 140 e 160°C . Após o tratamento em vapor d'água superaquecido os carvões foram secos em uma estufa regulada a 105 ± 3 °C, por um período de 24 horas, medida esta tomada para se conhecer as massas reais das amostras antes das mesmas serem colocadas em contato com os pigmentos coloridos. A Figura 3 mostra as peneiras instaladas dentro do recipiente e recebendo a aplicação do vapor superaquecido.



Figura 3 - Peneiras instaladas dentro de um recipiente e recebendo a aplicação do vapor superaquecido, possibilitando a ativação dos carvões.

### 3.5 - Testes de absorção e adsorção de pigmentos coloridos pelos carvões

A propriedade descolorizante do carvão foi testada em meio aquoso, com base na sua capacidade de absorver e de adsorver micro-partículas em suspensão. As soluções coloridas a 1,0% em água bidesionizada, foram preparadas com pigmentos verdes, normalmente usados para tingir tecidos, as amostras dos carvões ativos e não-ativos permaneceram em contato com a solução de pigmentos coloridos por um período de 24 horas, após este período as amostras foram secas em estufa regulada a 105 ± 3 °C por um período de 24 horas, afim de se obter as reais massas de pigmentos coloridos absorvidos e adsorvidos pelas respectivas amostras. A Figura 4 apresenta os procedimentos utilizados para a impregnação dos carvões ativados e não-ativados, com os pigmentos coloridos.



Figura 4 - Ensaio de absorção/adsorção de pigmentos coloridos, com os carvões vegetais ativados e não-ativados.

Foram comparadas as absorbâncias e adsorvidades dos carvões ativados e não-ativados, dentro e entre cada temperatura de pirólise e espécie florestal analisadas. Os tratamentos que foram analisados constam na Tabela 1.

Tabela 1 - Tratamentos analisados no decorrer da pesquisa

Tratamento	Espécie floretal	Temp. Máxima (°C)	Condição do Carvão
01	Acacia ( <i>A. mangium</i> )	400	Ativado
02			Não-Ativado
03		500	Ativado
04			Não-Ativado
05		600	Ativado
06			Não-Ativado
07	Guachapelle ( <i>P.guachapelle</i> )	400	Ativado
08			Não-Ativado
09		500	Ativado
10			Não-Ativado
11		600	Ativado
12			Não-Ativado
13	Eucalipto ( <i>E. grandis</i> )	400	Ativado
14			Não-Ativado
15		500	Ativado
16			Não-Ativado
17		600	Ativado
18			Não-Ativado
19	Carvão Ativado Industrial – Cromoline Química Fina		

### 3.6 - Análise dos Dados

Para a análise dos dados referentes às propriedades químicas dos carvões das três espécies florestais, bem como ao estudo da capacidade adsorptiva/absorptiva destes carvões, foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado, com 18 tratamentos e 3 repetições por tratamento, num esquema fatorial 3 X 3 X 2 X 3 (espécies florestais X temperaturas máximas X carvão ativado/não-ativado X repetições). Os dados foram avaliados por intermédio de análise de variância e por comparações entre as médias dos tratamentos através do teste de Tukey ao nível de 5 % de significância.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 constam os valores médios dos rendimentos gravimétricos em carvão, gases condensáveis e gases incondensáveis, observados após a pirólise das madeiras de acácia (*A. mangium*), guachapelle (*P. guachapelle*) e de eucalipto (*E. grandis*), às temperaturas máximas de 400 °C, 500 °C e 600 °C.

Tabela 2 - Valores médios dos rendimentos em carvão (RGR), gases condensáveis (RGC) e gases incondensáveis (RGI) das madeiras de acácia (*A. mangium*), guachapelle (*P. guachapelle*) e de eucalipto (*E. grandis*)\*

Tratamento	Temp. (°C)	Espécie Florestal	RGR (%)	RGC (%)	RGI (%)
1	400	Acácia ( <i>A. mangium</i> )	30,54 Ab	39,21 Ab	30,25 Aa
2	500		27,91 Ba	41,39 Aa	30,70 Aa
3	600		27,07 Bab	39,14 Ab	33,79 Aa
4	400	Guachapelle ( <i>P. guachapelle</i> )	30,02 Ab	38,15 Ab	31,83 Aa
5	500		27,87 Ba	41,83 Aa	30,30 Aa
6	600		26,23 Cb	41,88 Aab	31,89 Aab
7	400	Eucalipto ( <i>E. grandis</i> )	31,22 Aa	43,74 Aa	25,04 Bb
8	500		28,78 Ba	43,52 Aa	27,70 ABa
9	600		27,33 Ca	42,28 Aa	30,39 Ab

\*Letras maiúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferenças estatística entre as temperaturas, para cada espécie; letras minúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferenças estatísticas, nas respectivas temperaturas e espécies.

Observa-se, pela análise da Tabela 2, para todas as espécies analisadas, que os valores médios dos rendimentos gravimétricos em carvão tendem a diminuir à medida que se aumenta a temperatura máxima de pirólise. O maior rendimento médio em carvão (31,22%) foi apresentado pela madeira de eucalipto (*E. grandis*), pirolisada a 400 °C. Em seguida aparecem os rendimentos apresentados pelas madeiras de acácia (*A. mangium*) e guachapelle (*P. guachapelle*), pirolisadas na mesma temperatura, com os rendimentos de 30,54% e 30,02%, respectivamente.

A 500 °C não ocorreram diferenças significativas entre os rendimentos dos carvões das espécies florestais analisadas e, a 600 °C, sobressaíram-se as madeiras de eucalipto (*E. grandis*) e acácia (*A. mangium*), cujos rendimentos médios em carvão foram de 27,33 % e 27,07 %, respectivamente. Todas as espécies florestais apresentaram um maior rendimento médio em carvão quando foram pirolisadas à temperatura máxima de 400 °C.

Em relação aos rendimentos em gases condensáveis e incondensáveis não foi detectada uma tendência ou um comportamento bem definido, dentro e entre as espécies analisadas. Entretanto, a madeira de eucalipto (*E. grandis*), apresentou rendimentos em gases condensáveis superiores aos das demais espécies quando pirolisadas à temperatura máxima de 400 °C e de gases incondensáveis inferior aos das demais espécies quando pirolisadas à temperatura máxima de 400 °C. Os rendimentos em gases incondensáveis foram iguais na temperatura máxima de 500 °C, enquanto que à 600 °C o eucalipto (*E. grandis*) apresentou rendimentos inferiores aos das demais espécies.

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios dos teores de matérias voláteis, de cinza e de carbono fixo dos carvões das espécies florestais analisadas.

Tabela 3 - Valores médios dos teores de matérias voláteis (TMV), de cinza (TCZ), de carbono fixo (TCF) e rendimento em carbono fixo (RCF) dos carvões das espécies florestais analisadas\*

Tratamento	Temp. (°C)	Espécie Florestal	TMV (%)	TCZ (%)	TCF (%)	RCF (%)
1	400	Acacia ( <i>A. mangium</i> )	24,50 Aa	0,75 Ab	74,75 Ba	22,83 Aa
2	500		12,00 Ba	1,50 Aa	86,50 Aa	24,14 Aa
3	600		8,75 Ba	1,75 Aa	89,50 Aa	24,22 Aa
4	400	Guachapelle ( <i>P. guachapelle</i> )	21,00 Aa	4,50 Aa	74,50 Ca	22,36 Aa
5	500		13,00 Ba	4,00 Aa	83,00 Ba	23,13 Aa
6	600		7,00 Ca	4,00 Aa	89,00 Aa	23,34 Aa
7	400	Eucalipto ( <i>E. grandis</i> )	23,75 Aa	2,00 Ab	74,25 Ba	23,18 Aa
8	500		11,25 Ba	4,00 Aa	84,75 Aa	24,39 Aa
9	600		6,75 Ca	2,50 Aa	90,75 Aa	24,80 Aa

\*Letras maiúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferenças estatística entre as temperaturas para cada espécie; letras minúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferença estatística entre as respectivas temperaturas de cada espécie.



A análise química dos carvões demonstrou, para todas as espécies florestais analisadas, a existência de uma tendência à diminuição dos teores de matérias voláteis à medida que se aumenta a temperatura máxima de pirólise. O contrário foi observado em relação às temperaturas máximas de pirólise e os teores de carbono fixo dos carvões, ou seja, quanto maior a temperatura de pirólise, maior será o teor de carbono fixado no carvão. Não ocorreram diferenças significativas entre as espécies, dentro das respectivas temperaturas máximas de pirólise.

Os carvões da madeira de guachapelle (*P. guachapelle*) apresentaram teores de cinza ligeiramente superiores àqueles apresentados pelas duas outras espécies florestais, sobretudo à temperatura máxima de 400 °C. Segundo ANDRADE (1993), há uma tendência ao aumento no teor de cinza do carvão à medida que se diminui o rendimento gravimétrico em carvão.

Os rendimentos em carbono fixo, produto dos respectivos rendimentos em carvão e do teor de carbono fixo, apresentaram valores médios distribuídos num intervalo de 22,36 % a 24,80 %. Para ANDRADE (1989), o rendimento em carbono fixo é um dos parâmetros que melhor expressam a qualidade da matéria-prima lenhosa para a produção de carvão vegetal. Quanto maior for o rendimento em carbono fixo, melhor será a qualidade da biomassa para fins energéticos.

Em relação ao rendimento em carbono fixo, não ocorreram diferenças significativas entre as espécies dentro das respectivas temperaturas, bem como entre as temperaturas dentro das respectivas espécies.

Na Tabela 4 são apresentados os teores médios de pigmentos coloridos que foram adsorvidos/absorvidos pelos carvões das madeiras de acácia (*A. mangium*), guachapelle (*P. guachapelle*) e de eucalipto (*E. grandis*), ativados e não-ativados.

Dentre as espécies florestais analisadas, e feita a análise do desdobramento da situação do carvão vegetal (ativado e não-ativado), dentro de cada espécie e temperatura máxima de pirólise, os carvões da acácia (*A. mangium*), seguidos pelos da guachapelle (*P. guachapelle*), apresentaram os resultados mais consistentes e positivos em relação à ativação. No caso da acácia (*A. mangium*), os procedimentos estatísticos demonstraram que a ativação foi eficiente para os carvões produzidos às temperaturas de 500 °C e 600 °C sem registrar, no entanto, influência da temperatura de pirólise (Apêndice A). Para a guachapelle a ativação surtiu efeito nos carvões produzidos à temperatura máxima de 400 °C, já no eucalipto (*E. Grandis*) a ativação surtiu efeito nos carvões produzidos à temperatura máxima de 500 °C. Tais carvões, possivelmente, podem ser utilizados para a descoloração e filtragem de água e, ou, de bebidas, uma vez que as suas propriedades de adsorção/absorção foram significativamente modificadas.

Os resultados comprovaram a eficiência da ativação de carvões vegetais em vapor superaquecido, uma vez que foram detectadas diferenças significativas nas capacidades de adsorção/absorção entre os carvões ativados e não-ativados. Com base nas propriedades de adsorção/absorção dos carvões ativados das espécies florestais analisadas, equiparáveis ou superiores àquela apresentada pelo carvão ativado industrial, é possível recomendar a adoção dos mesmos, dentre outros usos, para a filtragem, purificação e descoloração de água e, ou, bebidas.

Tabela 4 - Teores médios de pigmentos coloridos que foram adsorvidos/absorvidos pelos carvões das madeiras de acacia (*A. mangium*), guachapelle (*P. guachapelle*) e de eucalipto (*E. grandis*), ativados e não ativados\*

Tratamento	Temp. (°C)	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Pigmento Retido (g)	Pigmento Retido** (%)
01	400	19,06	19,14	0,08	0,42 a
02		16,36	16,44	0,08	0,50 a
03	500	19,49	19,58	0,09	0,46 a
04		15,94	16,00	0,06	0,33 b
05	600	19,59	19,75	0,16	0,82 a
06		17,55	17,60	0,05	0,28 b
07	400	19,19	19,39	0,20	1,02 a
08		17,64	17,77	0,13	0,72 b
09	500	19,62	19,71	0,09	0,44 a
10		15,84	15,91	0,07	0,44 a
11	600	19,41	19,53	0,12	0,64 a
12		18,14	18,25	0,11	0,61 a
13	400	19,41	19,50	0,09	0,45 a
14		18,30	18,39	0,09	0,48 a
15	500	19,48	19,62	0,14	0,72 a
16		17,86	17,93	0,07	0,41 b
17	600	18,35	18,48	0,13	0,71 a
18		15,91	16,02	0,11	0,69 a
19		20,43	20,51	0,08	0,38

\*Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância; \*\*comparações para a condição ativado/não-ativado dentro de cada temperatura por espécie, em que: tratamentos ímpares = carvões ativados e tratamentos pares = carvões não-ativados; tratamentos 1 a 6 = carvões de acacia, tratamentos 7 a 12 = carvões de guachapelle, tratamentos 13 a 18 = carvões de eucalipto e tratamento 19 = carvão ativado comercial (Cromoline – Química Fina).

Na tabela 5 constam os valores percentuais de pigmentos que os carvões ativados e não-ativados absorveram/adsorveram. Foi realizada uma análise da interação entre as espécies, temperaturas máximas de pirólise e as duas condições dos carvões (ativados e não-ativados).

Estatisticamente, as variáveis analisadas para o carvão vegetal não-ativado, não apresentaram diferenças significativas em nenhum dos tratamentos, ou seja, as espécies e temperaturas máximas de pirólise não influenciaram na capacidade adsorviva/absorviva dos carvões. Analisando os carvões ativados, entre as temperaturas máximas de pirólise e as espécies vegetais, percebe-se que a guachapelle (*P. guachapelle*), pirolisada a temperatura máxima de pirólise de 400 °C, se destacou quando comparada com a acacia (*A. mangium*) e ao eucalipto (*E. grandis*).

Tabela 5 - Teores médios de pigmentos que foram adsorvidos/absorvidos pelos carvões das madeiras de acacia (*A. mangium*), guachapelle (*P. guachapelle*) e de eucalipto (*E. grandis*), ativados e não ativados, com interação entre as variáveis analisadas\*

Espécies	Condição do carvão vegetal					
	Ativado			Não ativado		
	Temperatura de carbonização					
	400 °C	500 °C	600 °C	400 °C	500 °C	600 °C
Acacia ( <i>A. mangium</i> )	0,42Ba	0,46Aa	0,82Aa	0,50Aa	0,33Aa	0,28Aa
Guachapelle ( <i>P. guachapelle</i> )	1,02Aa	0,44Ab	0,64Aab	0,72Aa	0,44Aa	0,61Aa
Eucalipto ( <i>E. grandis</i> )	0,45Ba	0,72Aa	0,71Aa	0,48Aa	0,41Aa	0,69Aa

CV(%) = 43,13

Letras maiúsculas na mesma coluna indicam diferenças estatísticas dentro de cada temperatura, condição do carvão vegetal e entre as espécies florestais; letras minúsculas diferentes na mesma linha indicam diferenças estatísticas entre as condições do carvão dentro de cada espécie e entre temperaturas.

A Figura 5 apresenta uma amostra de carvão impregnado com pigmentos coloridos, comprovando a capacidade de absorção/adsorção, principalmente dos carvões ativados.



Figura 5 - Amostra de carvão impregnado com pigmentos coloridos, comprovando a capacidade absorção/adsorção, principalmente dos carvões ativados.

## 5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados experimentais, foi possível concluir que:

A) Os maiores rendimentos médios em carvão são apresentados pelas madeiras de eucalipto (*E. grandis*) e acácia (*A. mangium*), pirolisadas à temperatura máxima de 400 °C (31,22 % e 30,54 %, respectivamente).

B) Carvões com elevados teores médios de carbono fixo (89,00 % a 90,75 %), são produzidos de todas as madeiras analisadas, pirolisadas à temperatura máxima de 600 °C.

C) A ativação dos carvões sob a ação de vapor superaquecido resultou em efeitos satisfatórios e significativos.

D) As propriedades de adsorção/absorção apresentadas pelos carvões ativados das espécies florestais analisadas foram equiparáveis ou superiores àquelas apresentadas pelo carvão ativado industrial, o que permite recomendá-los para a filtração, purificação e descoloração de água e/ou, bebidas.

## 6. RECOMENDAÇÃO

Embora o tempo de injeção de vapor de 15' tenha sido suficiente para a detecção de alterações nas propriedades de adsorção/absorção dos carvões, sugere-se a adoção de um maior tempo de ativação, contudo, sem incrementar os custos a um ponto que possa inviabilizar o processo.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRACAVE - Associação Brasileira dos Recursos Naturais Renováveis. **Anuário Estatístico** / 98. Belo Horizonte, MG, 1999. 12p.

AMS – Associação Mineira de Silvicultura. **O complexo florestal industrial (CFI) em Minas Gerais - Caracterização, dimensionamento e importância**. Belo Horizonte, Outubro 2004, 41 p.

ANDRADE, A.M.de. Efeitos da fertilização mineral e da calagem na produção e na qualidade da madeira e do carvão de eucalipto. 1993. 105 f. **Tese** (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ANDRADE, A.M.de; CARVALHO, L.M. de. Potencialidades energéticas de oito espécies florestais do Estado do Rio de Janeiro. Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, **Floresta e Ambiente**, 5(1):24-42, jan./dez., 1998.

ANDRADE, A.M.de. Influência da casca de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden no rendimento e qualidade de carvão vegetal. 1989. 86 f. **Dissertação** (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

- ASTM - American Society for Testing and Materials. **Standard method for chemical analyses of wood charcol**. Phyladelphia, 1977. 1042p.
- BALIEIRO, F.C. de; FRANCO, A. A.; CAMPELLO, E. F. C.; FARIA, S. M. de; Acúmulo de nutrientes na parte aérea, na serrapilheira acumulada sobre o solo e decomposição de filódios de *Acacia mangium* Willd. **Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 14, n. 1, p. 59-65, 2004.
- BRITO, J.O. & BARRICHELO, L.E.G. Características do Eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca. **IPEF**, Piracicaba, (16): 63-70, 1978
- BROWNE, F.L. **Theories of the combustion of wood and its control**. Madison, FPL, 1958. 70p.
- CARVALHO, A.M.M.L. Efeito da impregnação da madeira de *Eucalyptus grandis* com sais ignífugos na produção e na qualidade do carvão. 1997. 79 f. **Tese** (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- COLLET, F. Estudo comparativo, em escala de laboratório, de diversas madeiras utilizadas na fabricação de carvão vegetal. **Boletim da Associação Brasileira de Metais**, 42 (12): 5-14, 1955.
- DANIEL, O.; VITORINO, A.C.T.; ALOVISI, A.A.; MAZZOCHIN, L.; TOKURA, A.M.; PINHEIRO, E.R.; SOUZA, E.F.de. Aplicação de fósforo em mudas de *Acacia mangium* WILLD. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa - UFV, **Revista Árvore**, 21(2): 163-168, 1997.
- FERREIRA, M. Escolha de espécies de eucalipto. Circular Técnica, **IPEF**, v.47, p. 1-30, 1979. Disponível em: <http://www.ipef/identificacao/eucalyptus/#grandis>. Acesso em: 06 de janeiro de 2008.
- FONTES, P. J. P. **Aspectos Técnicos da Briquetagem do Carvão Vegetal no Brasil**. Laboratório de Produtos Florestais – LPF/IBAMA. Brasília, 1989.
- INFOTEC/PRÓ-CARVÃO - Informativo Técnico do Programa de Qualificação da Cadeia Produtiva do Carvão Vegetal do Estado de São Paulo. **Carbonização da madeira e produtos obtidos**. Piracicaba, SP, n. 1, ano 1, 2000. np
- LAMPRECHT, H. **Silvicultura nos Trópicos**, Instituto de Silvicultura. Universidade de Gottingen. Eschoborn, Alemanha, 1990. 343p.
- MARTINS, H. Madeira como fonte de energia. In: FUNDAÇÃO CETEC. **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte, 1980. p.9-26.
- MARTO, G. T.; BARRICHELO, L. E G.; MULLER, P. H. Em: **Identificação de *Acacia mangium***. Disponível em: <http://www.ipef.br/identificacao/acacia.mangium.asp>, acesso em 05 de Janeiro de 2008.

- MENDES, M. G.; GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal. In: PENEDO, W.R. **Produção e utilização do carvão vegetal**. Belo Horizonte, CETEC, 1982. p.76-89.
- NOGUEIRA, L.A.H.; LORA, E.E.S.; TROSSERO, M.A.; FRISK, T. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. Brasília, DF, 2000. 144p.
- OLIVEIRA, J.B.de; GOMES, P.A. & ALMEIDA, M.R.de. **Carvão vegetal - destilação, carvoejamento, propriedades e controle de qualidade**. Belo Horizonte, MG, CETEC - Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1982. 173p. (SPT 6)
- OLIVEIRA, J.B.de. **Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal**. Belo Horizonte, MG, CETEC - Centro Tecnológico de Minas Gerais, p.77-89, 1982 (SPT)
- PAIVA, H. N. de; JACOVINE, L. A. G.; RIBEIRO, G. T.; TRINDADE, C.; Cultivo de eucalipto em propriedades rurais. **Aprenda fácil**, Viçosa, MG, 2001. 138p.
- QUISEN, R. **Germinação e multiplicação in vitro de *Acacia mangium***. EMBRAPA Amazônia Ocidental, E-mail: rquisen@cpaa.embrapa.br, disponível em: [http://www.redbio.org/portal/encuentros/enc\\_2001/posters/01/posterpdf/01-106.pdf](http://www.redbio.org/portal/encuentros/enc_2001/posters/01/posterpdf/01-106.pdf), acesso em: 20 de maio de 2004, às 16:36 horas, 2004.
- RODRIGUEZ DELGADO, A. **Descripción e La madera de *Pseudosamanea guachapelle***. Disponível em: [http://www.herbaria.plants.ox.ac.uk/adc/downloads/capitulos\\_especies\\_y\\_anexos/pseudossamanea\\_guachapele.pdf](http://www.herbaria.plants.ox.ac.uk/adc/downloads/capitulos_especies_y_anexos/pseudossamanea_guachapele.pdf). Acesso em: 04 de janeiro de 2008.
- SANTANA, M.C.; ASSUMPÇÃO, R.M.V. Pirólise de madeira – matérias-primas, produtos, aplicações. São Paulo, SP, **IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Laboratório de Extrativos de Madeira da Divisão de Madeiras**, nd. 55p.
- SBS – Sociedade Brasileira de Silvicultura. **Fatos e Números do Brasil Florestal**, nov. 2006, 106p. Disponível em: <http://www.ipef.br/estatisticas/relatorios/SBS-2005.pdf>. Acesso em: 02 de julho de 2007.
- VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; CARVALHO, C. M.; VEIGA, R.A.A..Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* HILL EX-MAIDEN e *Acacia mangium* WILLD em diferentes níveis de adubação. Revista **CERNE**, vol. 06, n.01, p.83-88, 2000.
- VALENTE, O.F. Madeira de Eucalipto como opção energética - estudos de caso. Belo Horizonte, MG, **Informe Agropecuário**, 18(186), 1997.
- VEIGA, R.A.A.; CARVALHO, C.M.de; BRASIL, M.A.M. Determinação de equações de volume para árvores de *Acacia mangium* Willd. Lavras, MG, Universidade Federal de Lavras - UFLA, **Revista Cerne**, 6(1):103-107, 2000.

VELLA, M. M. C. F.; VALENTE, O. F.; VITAL, B. R.; LELLES, J. G. Influência da velocidade de carbonização da madeira nos rendimentos e nas propriedades do carvão produzido. **IPEF**, n. 41/42, p. 64-76, jan./ dez. 1989.

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

WENZL, H.F.J. **The chemical technology of wood**. New York, USA, Academic Press, 1970. 692p.

## **ANEXOS**



## APÊNDICE A

Tabela 1A - Teores de corantes que foram absorvidos/adsorvidos pelos carvões das madeiras de acacia (*A. mangium*), guachapelle (*P. guachapelle*) e de eucalipto (*E. grandis*), ativados e não ativados.

Trat	Temp. (°C)	Rep.	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Pigmento Retido (g)	Pigmento Retido (%)
1	400	1	19,08	19,17	0,09	0,47
		2	19,09	19,13	0,04	0,21
		3	19,00	19,11	0,11	0,58
2	400	1	15,17	15,25	0,08	0,53
		2	18,17	18,29	0,12	0,66
		3	15,74	15,79	0,05	0,32
3	500	1	19,41	19,50	0,09	0,46
		2	19,42	19,53	0,11	0,57
		3	19,64	19,71	0,07	0,36
4	500	1	16,69	16,77	0,08	0,48
		2	15,20	15,22	0,02	0,13
		3	15,94	16,00	0,06	0,38
5	600	1	19,52	19,72	0,20	1,02
		2	19,70	19,86	0,16	0,81
		3	19,54	19,66	0,12	0,61
6	600	1	15,41	15,48	0,07	0,45
		2	17,35	17,38	0,03	0,17
		3	19,90	19,94	0,04	0,20
7	400	1	19,10	19,38	0,28	1,47
		2	19,45	19,66	0,21	1,08
		3	19,02	19,12	0,10	0,53
8	400	1	19,20	19,29	0,09	0,47
		2	17,65	17,83	0,18	1,02
		3	16,07	16,18	0,11	0,68
9	500	1	19,68	19,77	0,09	0,46
		2	19,51	19,58	0,07	0,36
		3	19,68	19,78	0,10	0,51
10	500	1	15,30	15,38	0,08	0,52
		2	16,51	16,58	0,07	0,42
		3	15,72	15,78	0,06	0,38
11	600	1	19,21	19,30	0,09	0,47
		2	19,30	19,47	0,17	0,88
		3	19,72	19,83	0,11	0,56
12	600	1	17,72	17,91	0,19	1,07
		2	16,74	16,81	0,07	0,42
		3	19,95	20,02	0,07	0,35

Continuação da Tabela 1 A

Trat	Temp. (°C)	Rep.	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Pigmento Retido (g)	Pigmento Retido (%)
13	400	1	19,66	19,74	0,08	0,41
14		2	19,58	19,64	0,06	0,31
		3	19,00	19,12	0,12	0,63
		1	19,25	19,30	0,05	0,26
15		2	16,90	17,01	0,11	0,65
		3	18,76	18,86	0,10	0,53
	1	19,15	19,24	0,09	0,47	
16	500	2	19,40	19,60	0,20	1,03
		3	19,90	20,03	0,13	0,65
		1	18,88	18,97	0,09	0,48
		2	16,60	16,67	0,07	0,42
		3	18,10	18,16	0,06	0,33
		1	18,80	18,86	0,06	0,32
17	600	2	18,05	18,16	0,11	0,61
18		3	18,20	18,42	0,22	1,21
		1	15,78	15,91	0,13	0,82
		2	15,25	15,34	0,09	0,59
19		3	16,69	16,80	0,11	0,66
		1	20,54	20,62	0,08	0,39
	2	20,36	20,45	0,09	0,44	
		3	20,40	20,46	0,06	0,29

Análise de Variância das interações realizadas quanto à capacidade de absorção e adsorção de pigmentos coloridos, pelos carvões das espécies florestais analisadas

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Esp.	2	0,296137	0,148069	2,505	0,0958
Temp.	2	0,256004	0,128002	2,166	0,1294
Ativação	1	0,248067	0,248067	4,197	0,0478
Esp*Temp	4	0,546219	0,136555	2,310	0,0765
Temp*Ativação	2	0,025433	0,012717	0,215	0,8075
Temp*Ativação	2	0,040344	0,020172	0,341	0,7131
Esp*Temp*Ativação	4	0,442722	0,110681	1,872	0,1365
Erro	36	2,127933	0,059109		
Total Corrigido	53	3,982859			

CV (%) = 43,13

Média geral: 0,5637037

Observações: 54