UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE, UNICENTRO-PR

POTENCIALIDADE ENERGÉTICA DA MADEIRA DE DUAS ESPÉCIES FLORESTAIS VIA USO DIRETO E ATRAVÉS DA PIRÓLISE

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

HELOISA RANCATTI

IRATI

2012

HELOISA RANCATTI

POTENCIALIDADE ENERGÉTICA DA MADEIRA DE DUAS ESPÉCIES FLORESTAIS VIA USO DIRETO E ATRAVÉS DA PIRÓLISE

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Luciano Farinha Watzlawick
Orientador

Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva
Co-Orientador

IRATI-PR
2012

Catalogação na Fonte

Biblioteca da UNICENTRO

RANCATTI, Heloisa.

Potencialidade energética da madeira de duas espécies florestais via uso direto e através da pirólise / Heloisa Rancatti. – Irati, PR : UNICENTRO, 2012.

72f.

ISBN

Dissertação (Mestrado) – Ciências Florestais - Universidade Estadual do Centro- Oeste, PR.

Orientador: Luciano Farinha Watzlawick

Co-Orientador : Dimas Agostinho da Silva

1.Engenharia Florestal – Manejo Sustentável. 2. Madeira – carvão vegetal. 3. Bracatinga. 4. Uva – do – Japão. 5. Energia renovável. I. Watzlawick, Luciano Farinha. II. Silva, Dimas Agostinho da. III. Título.

CDD 20ª: 634.91

Universidade Estadual do Centro-Oeste

Reconhecida pelo Decreto Estadual nº 3.444, de 8 de agosto de 1997

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

PARECER

Defesa Nº 34

A Banca Examinadora instituída pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Ciências Florestais, do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, Campus de Irati, após arguir a mestranda **Heloisa Rancatti** em relação ao seu trabalho de dissertação intitulado "Potencialidade energética da madeira de duas espécies florestais via uso direto e através da pirólise", é de parecer favorável à APROVAÇÃO da estudante, habilitando-a ao título de **Mestre em Ciências Florestais**, Área de Concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais.

Irati-PR, 18 de abril de 2012.

Dr. Leif Nutto
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg / Universidade Federal do Paraná
Primeiro Examinador

Dr. Dimas Agostinho da Silva
Universidade Federal do Paraná
Segundo Examinador

Dr. Luciano Farinha Watzlawick
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Orientador e Presidente da Banca Examinadora

Dedico àqueles que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando e motivando. Que tornaram possível minha caminhada até aqui. As duas pessoas mais importantes da minha vida, donos do amor mais puro e incondicional que já recebi, meus pais Selso e Sirlei Rancatti.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida, sem o qual não estaria aqui.

Aos meus pais, pelo carinho, amor e paciência que sempre tiveram comigo.

Às minhas irmãs, Bruna e Lucimara, e meus adoráveis sobrinhos Davi e Pedro Otávio por fazerem parte da minha vida, alegrando meus dias com suas brincadeiras e confusões.

À Universidade Estadual do Centro Oeste, pela formação científica.

Aos professores Luciano Farinha Watzlawick e Dimas Agostinho da Silva, pela orientação na realização deste trabalho.

Ao professor Everton Hillig, pela colaboração no projeto e apoio nos momentos de dificuldade.

À Universidade Federal do Paraná, pela parceria e disponibilidade em contribuir com a pesquisa.

À Técnica do Laboratório de Biomassa Florestal da Universidade Federal do Paraná, Clarice de Andrade e aos estagiários Marcos Ramos Lima, Sandra Lúcia Soares Mayer e Fernanda Marchiori pelo auxílio nos ensaios de laboratório.

Às minhas amigas irmãs, Jóice Cristini Kuritza e Larissa Quartaroli pela disposição em me ajudar sempre, pela paciência que tiveram comigo, por estarem presentes nos melhores e piores momentos da minha vida, jamais esquecerei.

Às minhas amigas Dariana, Débora, Bárbara, Caciane, Letícia e Laís pelos anos de amizade, pelos inesquecíveis momentos compartilhados e pela parceria sem medida, estarão comigo sempre no meu coração.

Aos colegas de mestrado, pela amizade que descobrimos nesses dois anos de convivência. Em especial Aurélio Lourenço Rodrigues, pela ajuda com os cálculos estatísticos, pelo incentivo e por nunca deixar de acreditar em mim.

À CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

E a todos aqueles que durante esse período, colaboraram de alguma forma para o desenvolvimento desse trabalho, obrigada.

“Tropeçar também ajuda a caminhar.”

Guimarães Rosa

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS viii
LISTA DE TABELAS ix
LISTA DE ABREVEATURAS xii
1. INTRODUÇÃO 1
2. OBJETIVOS 3
2.1. Objetivo Geral 3
2.2. Objetivos Específicos 3
3. REFERENCIAL TEÓRICO 4
3.1 O uso da madeira para energia no Brasil 4
3.2 O uso da madeira para energia no Paraná 7
3.3 Composição química da madeira 9
3.4 Pirólise da madeira 10
3.4.1 Efeito da temperatura na pirólise 13
3.4.2 Efeito da velocidade de aquecimento na pirólise 14
3.4.3 Propriedades da madeira que influenciam na qualidade do carvão vegetal 15
3.4.4 Propriedades do carvão vegetal 16
3.5 Características das espécies estudadas 18
3.5.1 *Hovenia dulcis* Thunberg (uva-do-japão) 18
3.5.2 *Mimosa scabrella* Bentham (bracatinga) 20
4. MATERIAIS E MÉTODOS 22
4.1 Material 22
4.2 Caracterização da Madeira 23
4.2.1 Análise química imediata 23
4.2.2 Análise química elementar 25
4.2.3 Determinação do poder calorífico superior e inferior 26
4.3 Pirólise da madeira 27
4.3.1 Rendimento Gravimétrico e Energético em carvão vegetal 29
4.3.2 Rendimento em licor pirolenhoso e gases não condensáveis 29
4.3.3 Rendimento em carbono fixo 30
4.4 Caracterização do Carvão Vegetal 30
4.5 Delineamento Experimental 31
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 32

5.1 Caracterização energética das madeiras de bracatinga e uva-do-japão 32
5.2 Pirólise da Bracatinga 34
5.3 Propriedades do carvão vegetal da bracatinga 38
5.3.1 Análise química imediata 38
5.3.2 Análise química elementar 41
5.3.3 Poder calorífico superior e inferior 45
5.3.4 Rendimento em carbono fixo 46
5.3.5 Friabilidade 47
5.4 Pirólise da uva-do-japão 47
5.5 Propriedades do carvão vegetal da uva-do-japão 51
5.5.1 Análise química imediata 51
5.5.2 Análise química elementar 55
5.5.3 Poder calorífico superior e inferior 59
5.5.4 Rendimento em carbono fixo 61
5.5.5 Friabilidade 62
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 63
7. REFREÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 65

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Evolução do consumo da madeira e derivados em relação aos demais combustíveis no Paraná. 8

Figura 3.2 Evolução da participação do Paraná em relação ao Brasil no uso da madeira e derivados para energia..... 8

Figura 4.1 Localização geográfica do município de Irati, PR. 23

Figura 4.2 Calorímetro adiabático modelo IKA C 5000..... 26

Figura 4.3 Forno mufla utilizado na carbonização das madeiras. 28

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Oferta interna de energia. 5

Tabela 3.2 Consumo de lenha por setor. 6

Tabela 3.3 Composição média de coníferas e folhosas. 9

Tabela 3.4. Produtos da pirólise obtidos pela carbonização da madeira a 500°C. 12

Tabela 4.1 Tratamentos da carbonização da madeira. 28

Tabela 5.1. Resultados médios da caracterização energética das madeiras de bracatinga e uva-do-japão 32

Tabela 5.2 Valores de F da análise de variância ANOVA do carvão vegetal da bracatinga. .. 34

Tabela 5.3 Média dos valores dos parâmetros da pirólise da bracatinga. 35

Tabela 5.4 Rendimento gravimétrico em carvão vegetal em função da temperatura final de pirólise. 36

Tabela 5.5 Rendimento energético em carvão vegetal em função da temperatura final. 37

Tabela 5.6 Rendimento em gases não condensáveis em função da temperatura final da pirólise. 37

Tabela 5.7 Valores de F da análise de variância ANOVA para os parâmetros de qualidade do carvão vegetal da bracatinga. 38

Tabela 5.8 Resultados médios da análise química imediata do carvão vegetal da bracatinga. 39

Tabela 5.9 Teor de materiais voláteis em função da temperatura final de pirólise. 39

Tabela 5.10 Teor de carbono fixo em função da temperatura final de pirólise. 40

Tabela 5.11 Teor de cinzas em função da temperatura final de pirólise. 41

Tabela 5.12 Resultados médios da análise química elementar do carvão vegetal da bracatinga. 42

Tabela 5.13 Percentual de carbono em função da temperatura final de pirólise. 42

Tabela 5.14 Percentual de carbono em função da velocidade de aquecimento 42

Tabela 5.15 Percentual de carbono da interação entre a temperatura final e a velocidade de aquecimento. 43

Tabela 5.16 Percentual de hidrogênio em função da temperatura final de pirólise. 43

Tabela 5.17 Percentual de oxigênio em função da temperatura final de pirólise. 44

Tabela 5.18 Percentual de oxigênio em função da velocidade de aquecimento. 44

Tabela 5.19 Percentual de oxigênio da interação da temperatura final de pirólise com a velocidade de aquecimento. 44

Tabela 5.20 Poder calorífico superior em função da temperatura final de pirólise. 45

Tabela 5.21 Poder calorífico inferior em função da temperatura final de pirólise. 46

Tabela 5.22 Friabilidade (%) do carvão vegetal em função da velocidade de aquecimento. .. 47

Tabela 5.23 Valores de F da análise de variância ANOVA do carvão vegetal da uva-do-japão. 47

Tabela 5.24 Média dos valores dos parâmetros da pirólise da uva-do-japão. 48

Tabela 5.25 Rendimento gravimétrico em carvão vegetal em função da temperatura final de pirólise. 48

Tabela 5.26 Rendimento gravimétrico em carvão vegetal em função da velocidade de aquecimento. 49

Tabela 5.27 Rendimento energético em carvão vegetal em função da temperatura final. 50

Tabela 5.28 Rendimento energético em carvão vegetal em função velocidade de aquecimento. 50

Tabela 5.29 Valores de F da análise de variância ANOVA para os parâmetros de qualidade do carvão vegetal da uva-do-japão. 51

Tabela 5.30 Resultados médios da análise química imediata do carvão vegetal da uva-do-japão. 52

Tabela 5.31 Teor de materiais voláteis em função da temperatura final. 52

Tabela 5.32 Teor de materiais voláteis em função velocidade de aquecimento. 53

Tabela 5.33 Teor de materiais voláteis da interação da temperatura final de pirólise com a velocidade de aquecimento. 53

Tabela 5.34 Teor de carbono fixo em função da temperatura final. 54

Tabela 5.35 Teor de carbono fixo em função velocidade de aquecimento. 54

Tabela 5.36 Teor de carbono fixo da interação da temperatura final de pirólise com a velocidade de aquecimento. 54

Tabela 5.37 Teor de cinzas em função da temperatura final. 55

Tabela 5.38 Resultados médios da análise química elementar do carvão vegetal da uva-do-japão. 55

Tabela 5.39 Percentual de carbono em função da temperatura final de pirólise. 56

Tabela 5.40 Percentual de carbono da interação da temperatura final de pirólise com a velocidade de aquecimento. 56

Tabela 5.41 Percentual de hidrogênio em função da temperatura final de pirólise. 57

Tabela 5.42 Percentual de hidrogênio da interação da temperatura final de pirólise com a velocidade de aquecimento. 57

Tabela 5.43 Percentual de nitrogênio em função da temperatura final de pirólise. 57

Tabela 5.44 Percentual de oxigênio em função da temperatura final de pirólise. 58

Tabela 5.45 Percentual de oxigênio da interação da temperatura final de pirólise com a velocidade de aquecimento. 58

Tabela 5.46 Percentual de enxofre em função da temperatura final de pirólise. 59

Tabela 5.47 Poder calorífico superior em função da temperatura final de pirólise. 59

Tabela 5.48 Poder calorífico superior em função velocidade de aquecimento. 60

Tabela 5.49 Poder calorífico inferior em função da temperatura final de pirólise. 60

Tabela 5.50 Poder calorífico inferior em função velocidade de aquecimento. 60

Tabela 5.51 Poder calorífico inferior da interação da temperatura final de pirólise com a velocidade de aquecimento. 61

Tabela 5.52 Rendimento em carbono fixo em função da temperatura final de pirólise. 61

Tabela 5.53 Rendimento em carbono fixo em função velocidade de aquecimento. 61

LISTA DE ABREVEATURAS

°C – graus Celsius;

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

C – carbono;

CF – teor de carbono fixo;

COPEL – Companhia Paranaense de energia;

CZ – teor de cinzas;

DAP – diâmetro à altura do peito;

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária;

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentos);

Faostat – FAO Estatistical Database (Banco de dados estatísticos da FAO);

H – hidrogênio;

ha – hectare;

IAP – Instituto Ambiental do Paraná;

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis;

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;

Kcal – quilocalorias;

Kg – quilogramas;

m^3 – metros cúbicos;

mdc – metros cúbicos de carvão;

MINEROPAR – Serviço Geológico do Paraná;

MME – Ministério de Minas e Energia;

MV – teor de materiais voláteis;

N – nitrogênio;

O – oxigênio;

PCI – poder calorífico inferior;

PCS – poder calorífico superior;

S – enxofre;

SEMA – Secretaria do meio ambiente;

TA – taxa de aquecimento;

tep – toneladas equivalentes de petróleo;

Tf – teor de finos;

TF – temperatura final de carbonização;

RCF – rendimento em carbono fixo;

RE – rendimento energético em carvão vegetal;

Rg – rendimento em gases não condensáveis;

RG – rendimento gravimétrico em carvão vegetal;

RL – rendimento em licor pirolenhoso.

RESUMO

Heloisa Rancatti. Potencialidade energética da madeira de duas espécies florestais via uso direto e através da pirólise

O presente trabalho objetivou a avaliação do potencial energético da madeira e do carvão vegetal da bracatinga (*Mimosa scabrella* Bentham) e da uva-do-japão (*Hovenia dulcis* Thunberg). O carvão vegetal foi obtido em laboratório através da pirólise da madeira empregando-se combinações de três temperaturas finais (300, 400 e 500°C) e duas velocidades de aquecimento (3 e 5°C/min). Foram determinadas as propriedades das madeiras por meio de sua caracterização (análise química imediata e elementar, poder calorífico superior e inferior) e posteriormente os parâmetros de qualidade do carvão vegetal pelo cálculo do rendimento gravimétrico e energético em carvão vegetal; percentual de gases não condensáveis e licor pirolenhoso; análise química imediata e elementar; poder calorífico superior e inferior; e friabilidade. Com base nos resultados obtidos concluiu-se que: a) As madeiras de bracatinga e uva-do-japão apresentaram diferença estatística apenas para o teor de materiais voláteis, teor de cinzas e de nitrogênio; sendo iguais para os demais parâmetros avaliados; b) O rendimento gravimétrico e energético em carvão vegetal diminuíram com o aumento da temperatura final da pirólise para as duas espécies estudadas; c) O rendimento em licor pirolenhoso não sofreu influência significativa da temperatura final e da velocidade de aquecimento; d) O aumento da temperatura final diminuiu o teor de materiais voláteis e aumentou o teor de carbono fixo e de cinzas; e) A temperatura final provocou alterações dos percentuais de carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio e enxofre do carvão vegetal, enquanto que a velocidade de aquecimento não foi significativa nos seus componentes elementares; f) O poder calorífico aumentou com o aumento da temperatura final para as duas espécies estudadas; g) O rendimento em carbono fixo não foi influenciado pela temperatura final e pela velocidade de aquecimento para a bracatinga e diminuiu com o aumento da temperatura final para a uva-do-japão; h) A friabilidade do carvão vegetal da uva-do-japão não foi influenciada pelos dois fatores estudados, enquanto que a do carvão de bracatinga aumentou com o aumento da velocidade de aquecimento.

ABSTRACT

Heloisa Rancatti. Heloisa Rancatti. Potential energetic of wood from two forest species through direct use and through pyrolysis.

The present work aimed the evaluation of the energetic potential of wood and charcoal from bracatinga (Mimosa scabrella Bentham) and japanese grapes (Hovenia dulcis Thunberg). The charcoal was obtained in a laboratory by pyrolysis of wood employing combinations of three final temperature (300, 400 and 500 ° C) and two heating rates (3 e 5 ° C / min). Was determined the properties of woods through their characterization (immediate chemical analysis and elemental, higher calorific value and lower) and later the quality parameters of charcoal by calculating the gravimetric yield and energetic in charcoal; percentage of non condensable gases and pyroligneous liquor; immediate chemical analysis and elemental, upper and lower calorific value, and friability. Based on the results obtained was concluded that: a) bracatinga and japanese grapes woods showed statistical differences only for the content of volatile materials, ash content and of nitrogen, being equal to the other parameters evaluated; b) The gravimetric and energetic yield in charcoal decreased with the increase of the final temperature of pyrolysis to the two studied species; c) The yield of the pyroligneous liquor was not affected by the final temperature and heating rate; d) The increase of final temperature reduced the content of volatile materials and increased the content of fixed carbon and ash; e) The final temperature caused alterations in the percentage of carbon, hydrogen, nitrogen, oxygen, and sulfur charcoal, while the heating rate was not significant in their elementary components; f) The calorific value increased with the increase of the final temperature for the two species; g) The yield in fixed carbon was not influenced by the final temperature and heating rate for bracatinga and it decreased with increase of the final temperature to the japanese grapes; h) The friability of the grape-of-japan charcoal was not affected by two factors studied, whereas the coal of bracatinga increased with the increase in heating rate.

1. INTRODUÇÃO

O crescente aumento do consumo mundial de energia baseado principalmente no uso de fontes não renováveis, como combustíveis fósseis, por exemplo, vem acarretando uma série de problemas ambientais e de abastecimento energético, pois é sabido que num futuro não tão longe, eles podem nos faltar. Nesse contexto, é crescente também a busca por alternativas energéticas renováveis que constituem uma matriz segura e de maior equilíbrio para o meio ambiente.

Isso faz com que a humanidade seja direcionada a perseguir um novo conjunto de fontes de energia, sucedâneos ao carbono fóssil. Dentre as energias renováveis, a energia produzida a partir de biomassa poderá responder por parcela substantiva da oferta futura. Nesse contexto, a madeira e seu derivado o carvão vegetal, são produtos a serem estudados devido a sua relevante importância no suprimento de energia.

A qualidade do carvão vegetal depende basicamente da matéria prima que lhe deu origem. Suas propriedades devem ser consideradas para que a qualidade do produto final possa ser garantida (BARCELLOS, 2007). Para isso é necessário conhecer as propriedades das madeiras utilizadas na sua produção, o que é possível através de análises como a análise química imediata que quantifica o teor de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas do carvão vegetal; análise química elementar que mostra o percentual de carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio e enxofre e também o poder calorífico que expressa a quantidade de energia liberada na combustão de certa quantidade de massa de um combustível.

O carvão vegetal é produzido a partir da pirólise lenta da madeira em um ambiente com condições controladas de temperatura e atmosfera (entrada e saída de ar). A temperatura final atingida e a velocidade de aquecimento empregadas nesse processo têm grande influência sobre a quantidade e qualidade do carvão vegetal obtido. Nessa pesquisa foram testadas diferentes combinações de temperatura final e velocidade de aquecimento objetivando comparar as propriedades do combustível produzido a partir de duas espécies florestais.

A *Mimosa scabrella* Bentham, também conhecida como bracatinga é uma espécie nativa de rápido crescimento com incremento médio anual ao redor de $26 m^3$/ha.ano, recomendada à recuperação de áreas degradadas e conservação de solos. Entretanto, a sua mais relevante utilização é na produção de energia como carvão vegetal e lenha para indústrias e consumo doméstico, tendo como vantagem a baixa produção de fumaça

(BARTOSZECK, 2000). Pela necessidade de disciplinar a exploração da espécie nas áreas de ocorrência natural no estado do Paraná de modo a garantir a sua perpetuidade, foi criada uma resolução conjunta do IBAMA/SEMA/IAP nº01 de 31 de maio de 2007, que foi regulamentada no dia 13 de junho do mesmo ano pela portaria do IAP nº108 onde fica permitido o manejo de bracatinga nas regiões de ocorrência da espécie no estado do Paraná. Portanto sua escolha para essa pesquisa foi baseada na possibilidade de seu manejo apesar de ser uma espécie nativa e na sua tradicional aplicação na produção de energia.

A *Hovenia dulcis* Thunberg, popularmente conhecida como uva-do-japão, é uma espécie que ocorre naturalmente na China, Japão e Coréia, considerada uma exótica invasora para o Brasil principalmente na região sul. No estado do Paraná há registros de invasão da espécie em vários municípios. É uma planta de dispersão via zoocórica em função de seus frutos comestíveis, o que dificulta o controle da sua disseminação. (CARVALHO, 1994). Por outro lado, é uma espécie pioneira, de rápido crescimento (chegando a atingir 30 m^3/ha.ano) com características mecânicas similares às do louro-pardo (*Cordia trichotoma* (Vell.)), o que a torna potencial substituta de espécies nativas na indústria moveleira (RIGATTO et al. 2001). De acordo com Schumacher et al. (2008), que estudaram a produção de biomassa e nutrientes de um povoamento de *Hovenia dulcis* plantado na Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária em Santa Maria, RS, a espécie possui acúmulo de biomassa prioritariamente na madeira indicando comportamento típico de uma espécie promissora para a produção de madeira de forma comercial. Dentro da legislação brasileira as espécies exóticas são regulamentadas pelas portarias do IAP nº125, de 7 de agosto de 2009 e nº192, de 2 de dezembro de 2005. A primeira reconhece a lista oficial de espécies exóticas invasoras para o Paraná, estabelece normas de controle e providências a serem tomadas a respeito das espécies. A uva-do-japão está inserida nessa lista como espécie com valor comercial, que pode ser cultivada em condições controladas sob regulamentação específica. E a segunda trata da normatização do processo de eliminação e controle de espécies exóticas. Diante dessas informações escolheu-se a uva-do-japão pela necessidade de agregar a ela algum fator econômico que torne atrativo o seu uso e assim seu controle possa ser garantido, resolvendo um problema ambiental e promovendo uma fonte de renda.

O desenvolvimento de pesquisas nessa área torna-se cada vez mais necessário, frente às excelentes condições que a madeira e o carvão vegetal oferecem como eficaz alternativa energética, visando sempre aperfeiçoar a qualidade e o rendimento do produto final para melhor explorar seu potencial.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Esta pesquisa tem por objetivo avaliar o potencial da madeira das espécies bracatinga (*Mimosa scabrella* Bentham) e uva-do-japão (*Hovenia dulcis* Thunberg) e seu carvão vegetal para uso energético.

2.2. Objetivos Específicos

a) Determinar as propriedades energéticas da madeira das espécies estudadas pela sua caracterização (análise química imediata e elementar, poder calorífico superior e inferior);
b) Avaliar o comportamento das espécies a diferentes condições de pirólise, empregando-se combinações de três temperaturas finais (300, 400 e 500°C) e duas velocidades de aquecimento (3 e 5°C/min) ;
c) Comparar as propriedades do carvão produzido de cada espécie, sob diferentes marchas de pirólise não tradicionais pelo cálculo do rendimento gravimétrico e energético em carvão vegetal, percentual de gases não condensáveis e licor pirolenhoso, análise química imediata e elementar, poder calorífico superior e inferior e friabilidade;

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 O uso da madeira para energia no Brasil

Tradicionalmente desde os primórdios até os dias de hoje, a principal aplicação mundial da madeira tem sido o uso energético. Na função ambiental, este fato vem se tornando cada vez mais importante por constituir uma alternativa para os combustíveis fósseis. No Brasil, a metade da madeira utilizada possui destinação energética (CINTRA, 2009).

A lenha era utilizada desde as primeiras civilizações para obtenção de energia térmica, quando a madeira era gratuita e abundante na natureza. Com o surgimento das pequenas cidades é que a lenha começou a ser comercializada. Conforme as cidades foram crescendo, a necessidade de energia foi aumentando e as florestas começaram a ser exploradas acima da sua capacidade de regeneração, o que provocou falta de madeira em algumas regiões. No final do século XVIII, com a Revolução Industrial, houve um avanço ainda maior no uso da madeira, com aplicações nos campos da indústria e dos transportes, a partir da descoberta das máquinas movidas a vapor (UHLIG, 2008). A madeira passou então a ser utilizada como combustível sólido, líquido e gasoso, em processos de geração de energia térmica, mecânica e elétrica (BRITO, 2007).

No Brasil, o uso da madeira está presente desde o período da colonização, quando houve intensa exploração do pau-brasil em nosso litoral. Foi a principal fonte de energia primária até 1972, quando foi suplantada pelo petróleo, e somente em 1978 ela foi superada pela energia elétrica. Como conseqüência, a participação percentual da madeira no balanço energético brasileiro vem decrescendo ao longo do tempo, pois seguindo a tendência da maioria dos países desenvolvidos, para atender às novas demandas energéticas, nas últimas três décadas o Brasil vem incentivando o uso de derivados de petróleo e a eletricidade. No entanto, atualmente a madeira ainda se coloca como importante recurso energético nacional, com valores de consumo situados ao lado dos observados para os produtos da cana-de-açúcar e da eletricidade (BRITO e CINTRA, 2004).

A madeira e o carvão vegetal tem tido ao longo da história, essencial participação no abastecimento de energia, e embora os valores de consumo tenham decrescido nos últimos tempos ainda é um insumo importante para suprir a demanda energética de muitos países,

principalmente nos países em desenvolvimento onde a madeira representa a única fonte disponível e acessível de energia (FAO, 2011).

A produção de energia primária no país em 2010 foi de 52,5% para fontes não renováveis e 47,5% para fontes renováveis (sendo 13,7% energia hidráulica, 10,3% lenha, 19,3% produtos da cana e 4,3% de outras fontes). A utilização de madeira para produção de energia, tanto elétrica como em forma de vapor, em caldeiras ou fornos é expressiva no Brasil, seja sob a forma da queima direta da lenha nas padarias e cerâmicas e nas fábricas de cimento do Norte e do Nordeste como combustível alternativo, seja sob a forma da queima do carvão vegetal em fornos siderúrgicos para redução de ferro gusa (BRASIL, 2011).

De acordo com Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2009), o consumo de lenha cresceu de 13.500 10^3 tep (toneladas equivalentes de petróleo), no ano de 1999 para 16.859 10^3 tep no ano de 2008. Juntamente com a lenha, para o mesmo período, houve um aumento no consumo de carvão vegetal de 4.401 10^3 tep para 6.209 10^3 tep, o que pode parecer uma ampliação não muito significativa para um circuito de nove anos, porém se forem considerados a concorrência com outras fontes energéticas e as questões ambientais envolvidas ao desmatamento, esse crescimento pode ser visto como favorável a extensão do uso de energias mais limpas.

A Tabela 3.1 com dados do BRASIL (2011), apresenta os valores percentuais da oferta interna de energia nos anos de 2009 e 2010. Pode-se observar uma significativa participação de fontes renováveis no abastecimento interno de energia (45,4%), dos quais cerca de 10% correspondem a lenha e carvão vegetal.

Tabela 3.1 Oferta interna de energia.

	2010 %	**2009 %**
Energia Não Renovável	**54,6**	**52,7**
Petróleo e derivados	38	37,8
Gás natural	10,2	8,7
Carvão mineral e derivados	5,1	4,7
Urânio (U_3U_8) e derivados	1,4	1,4
Energia Renovável	**45,4**	**47,3**
Energia hidráulica e eletricidade	14,2	15,2
Lenha e carvão vegetal	9,6	10,1
Produtos da cana-de-açúcar	17,7	18,2
Outras renováveis	3,9	3,8

Fonte: BRASIL (2011).

O suprimento regular de energia é um dos grandes desafios para a humanidade, tanto pela redução das reservas de petróleo, quanto pelos impactos negativos causados pelo uso intensivo das fontes fósseis, em especial o aumento das emissões líquidas de gases causadores do efeito estufa (BRASIL, 2005).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas da ONU (IPCC, 2011) pediu com urgência aos países que elaborem planos para uma reação a desastres, visando a adaptação ao crescente risco de eventos climáticos extremos ligados às mudanças climáticas provocadas pelo ser humano. Representantes de 193 países se reuniram na África do Sul, para a 17ª Conferência das Partes das Nações Unidas sobre o Clima (COP-17). A Organização das Nações Unidas (ONU) e outras entidades alertam que as promessas globais para cortar as emissões de CO_2 e os demais gases de efeito estufa são insuficientes para impedir um aumento na temperatura do planeta em até 2°C. De acordo com o relatório do IPCC (2011), existe uma confiança média de que as secas irão se intensificar no século XXI devido à menor precipitação ou um aumento na evapotranspiração.

Há, com isso, a atratividade para a diversificação das fontes de abastecimento, valorizando alternativas mais limpas e renováveis, garantindo segurança no fornecimento energético. Nesse contexto, a lenha possui um papel importante, a Tabela 3.2, expõe o consumo de lenha por setor no Brasil para o ano de 2010.

Tabela 3.2 Consumo de lenha por setor.

SETOR	2010 (10^3t)	%
Transformação*/Produção de carvão vegetal	29095	34,6
Geração elétrica	1235	1,5
Residencial	23471	27,9
Comercial	287	0,3
Agropecuário	8140	9,7
Industrial	23108	27,5
Consumo total	84101	100

*Produção de carvão vegetal para uso no setor siderúrgico.

Fonte: (BRASIL, 2011).

O setor residencial consome madeira para cocção de alimentos e também para o aquecimento domiciliar, estima-se que trinta milhões de pessoas no país são dependentes da madeira como fonte de energia domiciliar. No setor agropecuário o consumo de madeira se destaca na secagem de produtos agrícolas, principalmente grãos. Já o setor industrial utiliza a

madeira em indústrias no ramo do cimento, químico, alimentos, bebidas, cerâmico, papel e celulose (BRITO E CINTRA, 2004).

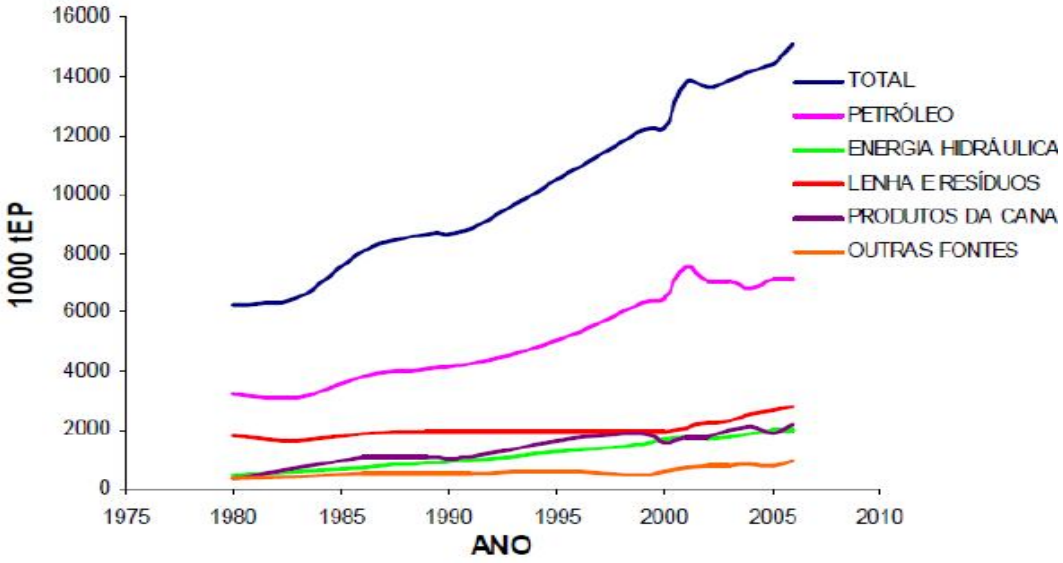
O Brasil é o maior produtor e consumidor mundial de carvão vegetal. O consumo total chegou a 29.202 milhões de mdc (metro cúbico de carvão) no ano de 2003 (VALVERDE, 2006). Este insumo energético é utilizado, em grande parte, pelo segmento na produção de ferro-gusa, totalizando um consumo de 23.608 milhões de mdc (metro cúbico de carvão) no ano de 2003 (GUIMARÃES NETO et al., 2007).

3.2 O uso da madeira para energia no Paraná

De acordo com o Balanço Energético do Paraná, realizado pela Companhia Paranaense de Energia (2009), o Paraná consumiu 17.363 tep (toneladas equivalentes de petróleo) de energia primária, sendo que 52,1% deste consumo são oriundos de energias renováveis e 47,9% de energias não renováveis. Das fontes renováveis os produtos da cana detêm a maior participação com 18,7%, pelo fato do Paraná ser o segundo maior produtor de cana do país. O consumo de lenha e seus derivados correspondem a 3.201 mil tep, de energia hidráulica a 2.267 mil tep e de outras fontes primárias que englobam os resíduos agrícolas e a lixívia a 333 mil tep. Estes dados mostram que a madeira tem 18,4% de participação na matriz energética do Paraná.

A maior parte da madeira energética do Paraná é usada na forma de lenha e cavaco para abastecer fornos e caldeiras e na forma de carvão vegetal. A metade do material vegetal empregado para produzir energia no estado vem de florestas nativas (COPEL, 2009).

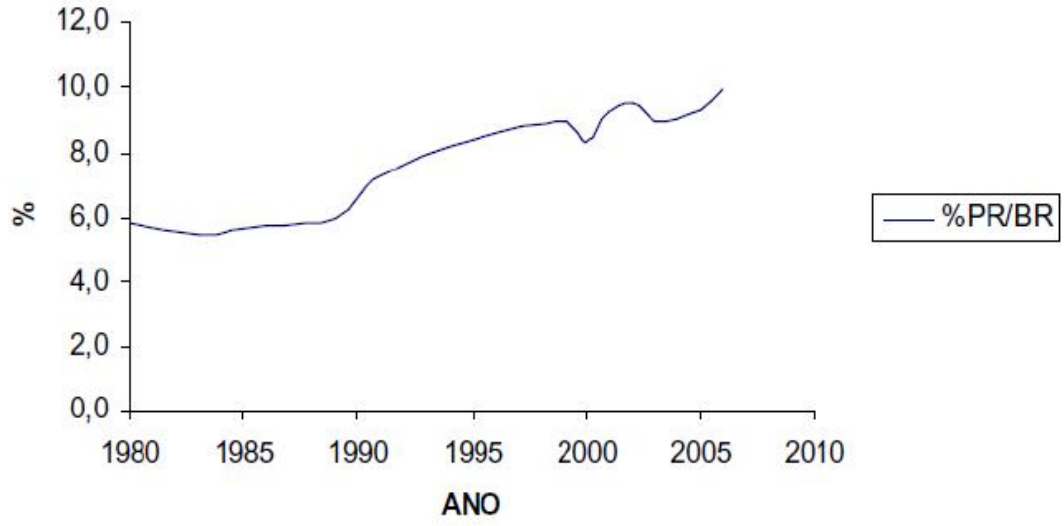
No gráfico 3.1 podemos observar diversas fontes de energia no Paraná e sua evolução ao longo dos anos. A lenha, inicialmente teve um decréscimo, passando a estabilizar a partir de 1985 e voltando a crescer a partir do ano de 2000.



Fonte: SILVA et al. (2010).

Figura 3.1 Evolução do consumo da madeira e derivados em relação aos demais combustíveis no Paraná.

Na figura 3.2 se destaca o crescimento da madeira como fonte de energia no Paraná em relação ao Brasil nas últimas décadas.



Fonte: SILVA et al. (2010).

Figura 3.2 Evolução da participação do Paraná em relação ao Brasil no uso da madeira e derivados para energia.

3.3 Composição química da madeira

A madeira, em sua composição química elementar é constituída aproximadamente de 50% de carbono, 6% de hidrogênio, 44% de oxigênio e em torno de 0,1 – 1% de nitrogênio e enxofre, valores que permanecem quase que constantes de espécie para espécie. Também se encontram pequenas quantidades de cálcio, potássio e magnésio sendo estes compostos minerais da madeira. Quanto a sua composição macromolecular, tem como constituintes da parede celular a celulose, polioses e lignina. E como substâncias de baixa massa molar além das cinzas, matéria inorgânica, têm-se os extrativos, matéria orgânica (KLOCK et al., 2005). Os extrativos são geralmente formados por terpenos, óleos essenciais, resinas, fenóis, taninos, ácidos graxos e corantes (PHILLIPP e D'ALMEIDA, 1988).

De acordo com Rendeiro et al. (2008), madeira, assim como petróleo, é um hidrocarboneto, mas, diferentemente dos combustíveis fósseis, ela possui átomos de oxigênio na sua composição química. A presença desse átomo de oxigênio faz com que a biomassa requeira menos oxigênio do ar. De maneira geral, a madeira possui a seguinte fórmula química empírica: $C_{3,3\ -\ 4,9}\ H_{5,1\ -\ 7,2}\ O_{2,0\ -\ 3,1.}$

Ainda segundo os mesmos autores, a biomassa vegetal é uma composição estruturada de três famílias de compostos químicos chamados substâncias macromoleculares: hemicelulose, celulose e lignina que estão presentes em todas as madeiras, além de compostos alifáticos e fenólicos que são minoritários e de baixo peso molecular. A hemicelulose ($C_6\ H_{10}\ O_5$), e a celulose ($C_5H_8O_4$), estão agrupadas formando a holocelulose, a qual compõe as paredes das fibras da madeira (celulose é a parede e a hemicelulose ocupa os espaços vazios). A lignina ($C_9H_{10}\ (OCH_3)_{0,9–1,7}$) é um polímero tridimensional com a finalidade de manter as fibras juntas. As proporções e composição química da lignina e polioses diferem em coníferas e folhosas, enquanto que a celulose é um componente uniforme da madeira. A Tabela 3.3 mostra a composição média de coníferas e folhosas (KLOCK et al., 2005).

Tabela 3.3 Composição média de coníferas e folhosas.

CONSTITUINTE	CONÍFERAS %	FOLHOSAS %
Celulose	42 ± 2	45 ± 2
Polioses	27 ± 2	30 ± 5
Lignina	28 ± 2	20 ± 4
Extrativos	5 ± 3	3 ± 2

Fonte: KLOCK et al.(2005).

A madeira é também composta por carbono fixo, material volátil e cinzas, o que denominamos composição imediata da madeira. A análise da composição imediata de um combustível nos dá os valores percentuais de materiais voláteis (condensáveis e não condensáveis), carbono fixo e cinzas. Quando a madeira é queimada, vapores de água e gases são liberados conforme a temperatura do processo vai aumentando. Parte desses gases é combustível e corresponde a queima na fração gasosa, são chamados de materiais voláteis e emitem energia na forma de luz e calor (CINTRA, 2009). Segundo Carmo (1988), os fatores que influenciam na quantidade de materiais voláteis no carvão são a temperatura de carbonização, a taxa de aquecimento e a composição química da madeira. A temperatura é o principal parâmetro que regula os teores de voláteis e carbono fixo do carvão, o efeito dos materiais voláteis pode causar modificações estruturais no carvão, a eliminação desses voláteis pode alterar significativamente a sua porosidade, o diâmetro médio dos poros, e a densidade (BARCELLOS, 2007).

O carbono fixo pode ser definido como a quantidade de carbono presente na biomassa após degradação térmica, seu rendimento apresenta uma relação diretamente proporcional aos teores de lignina, e inversamente proporcional ao teor de holocelulose (BARCELLOS, 2007). A proporção entre os componentes voláteis e o carbono fixo influencia as características de queima do combustível, pois os voláteis quando aquecidos, saem do material e queimam rapidamente, produzindo uma chama espalhada, enquanto que o carbono fixo se queima vagarosamente numa chama localizada (BRITO e BARRICHELO, 1979).

A cinza é um resíduo mineral proveniente dos componentes minerais do lenho e da casca, quanto maior for a proporção de materiais minerais na madeira, maior será a produção de cinzas do carvão (COTTA, 1996). Seu conhecimento é muito importante, pois, após a queima, as cinzas se comportam como resíduo e precisam de um sistema para sua retirada, caso contrário podem causar corrosão em equipamentos metálicos (BRITO, 1979).

3.4 Pirólise da madeira

Quando a madeira é submetida à ação do calor em temperaturas relativamente elevadas, da ordem de 300 a 700ºC, na ausência de oxigênio, ela sofre um processo de transformação na qual todos os seus componentes são extensivamente modificados (SANTOS, 2008). O carvão vegetal é produzido a partir da pirólise lenta da madeira, material predominantemente orgânico, em um ambiente onde a temperatura e a atmosfera (entrada de

ar) são devidamente controladas, para que haja a remoção da maior parte dos componentes voláteis (BARROSO, 2007). A temperatura final atingida tem grande influência sobre a quantidade e qualidade do carvão produzido (PINHEIRO e SÉYE, 1998).

O resultado desse tratamento é a obtenção de uma parte de carvão vegetal e, de outra parte, subprodutos voláteis, condensáveis ou não. Esses outros produtos da carbonização são formados através da condensação dos gases emitidos durante o processo de transformação ocorrido pelas reações termo-químicas da madeira. Os gases condensados formam o licor pirolenhoso, que é formado por uma mistura de vários produtos químicos. Além dos gases condensados o processo apresenta uma parte de gases não condensáveis (CO, CO_2, N_2, CH_4, H_2, entre outros), liberados na atmosfera (KLITZKE, 1998).

Quando se busca o líquido proveniente dos vapores condensáveis a pirólise é conhecida como destilação seca da madeira, quando se deseja obter essencialmente carvão o processo é a carbonização, que nada mais é que a concentração de carbono na madeira pela eliminação de hidrogênio e oxigênio, quando se deseja obter um produto intermediário entre a madeira seca e o carvão o processo chama-se torrefação (BRITO, 1990).

A pirólise é um processo físico-químico no qual a biomassa é aquecida a temperaturas relativamente baixas (500-800°C) em atmosfera não oxidante, dando lugar à formação de um resíduo sólido rico em carbono (carvão) e uma fração volátil composta de gases e vapores orgânicos condensáveis (licor pirolenhoso). As proporções destes compostos dependem do método de pirólise empregado, dos parâmetros do processo e das características do material a ser tratado (BRITO, 1990).

Sistemas mais recentes de pirólise (pirólise a vácuo e flash pirólise) conduzem à formação de produtos bem diferentes. Distinguem-se, assim, diferentes processos de pirólise, segundo a taxa de aquecimento e o tempo de residência. Desta forma, têm-se desde o processo de carbonização clássico, que tem um tempo de duração que pode atingir dias, com uma taxa de aquecimento lento à temperatura de 400 ºC, produzindo neste caso, o carvão vegetal, até a metanólise, cujo tempo de residência é de 0,5 a 1,5 segundo, com uma taxa de aquecimento elevada e com uma temperatura de 1.050 ºC, cujos resultados são os produtos químicos (BENABDALLAH, 1996, *apud* COUTO et al., 2004).

A fonte de calor do processo de carbonização pode ser interna ou externa. Sistemas com fonte interna de calor são aqueles onde o calor é oriundo da combustão de parte da carga destinada à carbonização. Cerca de 10% a 20% do peso da madeira enfornada como matéria-prima é queimada para gerar o calor necessário, dentro do próprio forno. O rendimento

gravimétrico nesse caso (relação massa carvão/massa madeira) não ultrapassa os 40%. Nos sistemas com fonte externa de calor, esse é fornecido a partir da queima de resíduos florestais e restos de madeira não aproveitáveis no processo em uma câmara de combustão externa ao forno (BRITO, 1990).

Dessa forma, toda a madeira é, teoricamente, convertida em carvão vegetal elevando a produtividade em 30% (BARROSO, 2007). O comportamento da madeira frente ao processo de pirólise é o somatório do comportamento de seus elementos principais: celulose, hemiceluloses e lignina (OLIVEIRA et al. 1982).

A lignina é o composto químico que mais influencia nas propriedades físico-químicas e energéticas do carvão vegetal (ANDRADE, 1998). Para Oliveira et al. (1982), madeiras que possuem maior teor de lignina geram produtos energéticos com maior poder calorífico. Embora a lignina comece a se degradar a baixas temperaturas, em torno de 150ºC, a sua decomposição é mais lenta, se comparada à celulose e hemiceluloses. Enquanto que a lignina continua a perder peso em temperaturas superiores a 500ºC restando ainda, cerca de 40% de sua massa original, a celulose se degrada rapidamente perdendo cerca de 80% da sua massa em temperaturas de 300 a 350ºC e as hemiceluloses por sua vez, iniciam a perda de peso por volta dos 225ºC tendo se degradado completamente ao chegar a 500ºC.

De acordo com Briane e Doat (1985), através da pirólise da madeira em laboratório com temperatura de 500°C, vários produtos são obtidos como se pode observar na tabela 3.4.

Tabela 3.4 Produtos da pirólise obtidos pela carbonização da madeira a 500°C.

PRODUTOS DA PIRÓLISE **Madeira seca ao ar (20% de ummidade)**	**RENDIMENTO** **(%)**
Carvão vegetal	**31,0**
Água	**28,0**
FRAÇÃO AQUOSA	**22,0**
Ácido acético	6,0
Metanol	2,5
Diversos Não Aromáticos	3,5
Furfural	1,0
Alcatrão	6,0
Derivados Fenólicos	3,0
GASES NÃO CONDENSÁVEIS	**19,0**
TOTAL	**100,0**

Fonte: BRIANE e DOAT (1985) – Guide Techinique de La Carbonisisation.

No uso direto da madeira em processo de combustão aspectos importantes devem ser levados em conta, principalmente com relação às propriedades físicas e químicas da mesma, associadas às suas propriedades combustíveis. Destaque-se a composição química elementar, poder calorífico, teor de umidade e densidade (BRITO e BARRICHELO, 1979).

3.4.1 Efeito da temperatura na pirólise

Vários autores verificaram que a temperatura final da pirólise da madeira altera as propriedades do carvão, influenciando na sua qualidade. Barbosa (1986), para avaliar o efeito da temperatura final da pirólise na qualidade do carvão de *Prosopis juliflora* (Sw.) DC., utilizou quatro temperaturas finais: 350, 450, 550 e 650 ºC. Observou que com o aumento na temperatura final houve uma redução no rendimento gravimétrico. A densidade aparente diminuiu até a temperatura de 550 ºC, voltando a crescer. Enquanto que o poder calorífico subiu até os 550 ºC diminuindo depois.

Para avaliar o efeito da temperatura no comportamento dimensional entre cerne e alburno de jatobá (*Hymeneae coubaril* L.), Silva e Trugilho (2003) utilizaram temperaturas finais de pirólise de 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 e 900 ºC, verificando que o cerne teve maior resistência a ação térmica da temperatura, no entanto sua decomposição térmica foi mais acentuada que a do alburno com temperaturas na faixa de 200 e 300 ºC.

Estudando o efeito da temperatura final da pirólise na qualidade do carvão de *Eucalyptus saligna*, com nove anos de idade, Coutinho (1984) estabeleceu temperaturas finais de 400, 500, 600, 700, 800, 900 e 1000ºC e ajustou modelos relacionando a temperatura final atingida com as características do carvão vegetal. Observou que o seu aumento afetou diretamente todas as características do carvão vegetal. Ocorrendo um decréscimo na densidade aparente, rendimento gravimétrico, e um acréscimo no poder calorífico do carvão.

Avaliando o efeito da temperatura final da pirólise de resíduos de macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Martius), Vilas Boas *et al*. (2010) estabeleceram temperaturas finais de 450, 550 e 650°C, observaram que a temperatura final é responsável pela qualidade do produto. O rendimento gravimétrico em carvão foi reduzido com o aumento da temperatura final.

Andrade et al. (2004), realizaram a pirólise de resíduos de coco-da-baía (*Cocos nucifera* Linn) com temperaturas máximas de 350, 450 e 550 °C, e posteriormente fizeram a análise imediata do carvão produzido. Submeteram-se à pirólise o coco inteiro e o seu

endocarpo (verde e maduro). Os maiores teores de carbono fixo foram apresentados pelos carvões derivados do endocarpo do coco maduro, pirolisados nas temperaturas máximas de 450 e 550°C. O rendimento gravimétrico do carvão do coco inteiro, pirolisado na temperatura máxima de 350 °C foi estatisticamente superior aos dos demais tratamentos.

Visando analisar a influência da temperatura final sobre as propriedades físico-químicas do carvão vegetal de três espécies de eucalipto: *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, *cloeziana* F. Muell. e *citriodora* Hook., Pinheiro e Séye (1998) realizaram testes com temperaturas finais na faixa de 200 a 650°C, com passos de 50 em 50°C. Observaram que a produção de carvão vegetal diminui com o aumento da temperatura, enquanto que o teor de voláteis diminuiu e o teor de carbono fixo aumentou. A resistência à compressão do carvão vegetal decresceu com o aumento da temperatura.

3.4.2 Efeito da velocidade de aquecimento na pirólise

Vella et al. (1989), estudou a influência da velocidade de aquecimento na pirólise da madeira de *Eucalyptus terenticornis* Sm. nos rendimentos e nas propriedades do carvão produzido, utilizou temperatura final de 450°C e velocidades de carbonização de 0,42; 0,63; 0,84; 1,05 e 1.25°/min. Observou que o rendimento em carvão diminuíram com o aumento da velocidade de aquecimento e o teor de cinzas e teor de carbono fixo aumentaram em proporções diferentes, o aumento do teor de cinzas foi quase desprezível.

Oliveira et al. (2010), estudaram a influência do tempo e temperatura finais de carbonização de clones de *Eucalyptus pellita* F. Muell. nas propriedades físicas e químicas do carvão vegetal. Utilizaram em seu trabalho, 6 diferentes marchas de carbonização variando o tempo, temperatura e taxa de aquecimento. Observaram que a taxa de aquecimento de 1,25°C/min com temperatura final de 450°C e tempo total de carbonização de 6 horas foi a que apresentou maior rendimento gravimétrico em carvão, elevado teor de carbono fixo e poder calorífico superior.

Brito (1992), estudou a influência da taxa de aquecimento e da temperatura da pirólise de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus* citriodora sobre a perda de massa e sobre as características do resíduo sólido obtido da pirólise (densidade, composição química elementar e química imediata). Os resultados indicaram a existência de influências da temperatura e da taxa de aquecimento sobre tais fatores. As mais importantes transformações durante a pirólise ocorreram acima de 240 °C e, na maior parte dos resultados, o *Eucalyptus maculata* (menor

densidade) foi mais afetado pela temperatura e pela taxa de aquecimento, comparativamente ao *Eucalyptus citriodora* (maior densidade). Observou-se que quanto maior a taxa de aquecimento empregada durante a pirólise, maior a redução de massa em função do aumento da temperatura.

3.4.3 Propriedades da madeira que influenciam na qualidade do carvão vegetal

A qualidade do carvão vegetal, medida pelas suas propriedades físico-químicas (análise química, granulométrica e densidade), depende em linhas gerais da madeira utilizada como matéria-prima e do método de carbonização (BARROSO, 2007).

As propriedades do carvão vegetal estão diretamente relacionadas às características físicas, químicas e anatômicas da madeira utilizada na sua produção. Entre todas as características físicas da madeira, a densidade é a que tem maior influência sobre a qualidade do carvão (TRUGILHO e SILVA, 2001). Segundo Burger e Richter (1991), a densidade é uma das propriedades físicas da madeira mais importante, podendo variar de 0,13 a 1,40g/cm^3. Madeiras mais densas produzem carvão vegetal mais denso e madeiras mais leves produzem carvões mais leves e porosos (MOREIRA, 1964).

Brito e Barrichelo (1977), afirmaram que madeiras com maior densidade possuem uma maior concentração de massa por volume, o que é interessante durante aplicação energética desse material. A constatação de características anatômicas que se correlacionem com densidades elevadas, pela ocorrência de paredes celulares mais espessas e diâmetro de lumes reduzidos, indica a possibilidade da produção de carvão vegetal denso, com menor volume de poros e por isso, menos higroscópico. Ao contrário, madeiras com altos teores de vasos, com dimensões demasiadamente elevadas, apresentam características indesejáveis para a produção de carvão vegetal. Deve-se, portanto optar por madeiras que deverão produzir carvão com características adequadas ao seu uso final (ANDRADE, 1989).

A densidade da madeira de uma mesma espécie pode variar em função da idade da árvore, genótipo, índice de sítio, clima, localização geográfica e tratos culturais. Os efeitos, em geral, são interativos e difíceis de serem avaliados isoladamente (VITAL, 1984).

A taxa de crescimento, para a maioria das espécies, não afeta de maneira uniforme a densidade da madeira. Para as folhosas o aumento da taxa de crescimento dentro de certos limites, promove o aumento da densidade da madeira. As coníferas aparentemente sofrem uma queda na densidade quando ocorre elevação na taxa de crescimento. A densidade da

madeira apresenta tendência de valores maiores à medida que as latitudes avançam para os trópicos, quando, na maioria das vezes, a situação está associada a zonas de baixa altitude, baixa precipitação, baixa umidade relativa, altas temperaturas e clima seco (SILVA, 2002).

Andrade et al. (1998), recomendaram o uso de árvores de menor diâmetro para uma melhor qualidade do carvão vegetal, isto porque regiões da casca e medula de árvores de maior diâmetro possuem elevado gradiente de densidade o que ocasiona maior presença de fissuras e trincas no carvão produzido.

As composições química e imediata da madeira também são importantes parâmetros que devem ser considerados quando se objetiva o uso da madeira na produção do carvão vegetal. O carvão vegetal consegue reter, em média 57% do carbono inicial presente na madeira. O carbono restante está contido nos gases enriquecidos e no líquido pirolenhoso condensado. A lignina, rica em carbono, é, portanto o fator químico mais importante na produção de insumos energéticos sólidos (ANDRADE, 1989).

Quanto ao teor de umidade, é uma propriedade que varia na madeira e na casca de maneira bastante ampla. A energia oriunda na queima da madeira é gasta no aquecimento e vaporização da água, portanto quanto maior o teor de umidade da madeira menor será seu poder calorífico (FARINHAQUE, 1981).

3.4.4 Propriedades do carvão vegetal

O carvão vegetal é composto de três frações distintas: carbono fixo, materiais voláteis e cinzas (OLIVEIRA, 2003). O rendimento em carbono fixo é a quantidade de carbono presente no carvão vegetal. Apresenta uma relação diretamente proporcional aos teores de lignina, extrativos e densidade da madeira, e inversamente proporcional ao teor de holocelulose. Possui uma correlação direta com o teor de carbono fixo presente na madeira e com o rendimento gravimétrico (OLIVEIRA, 1988).

Os materiais voláteis podem ser definidos como as substâncias que se desprendem da madeira em forma de gases durante a carbonização ou queima do carvão (OLIVEIRA, 2003). Os fatores que influenciam o teor de materiais voláteis no carvão vegetal são a temperatura de carbonização, a taxa de aquecimento e a composição química da madeira (CARMO, 1988). A temperatura é o principal parâmetro que regula os teores de materiais voláteis e carbono fixo do carvão. O efeito dos materiais voláteis ocorre na modificação estrutural do carvão. A porosidade, diâmetro médio dos poros, massa específica e outras características físicas do

carvão podem ser significativamente alteradas pela eliminação dos voláteis (BARCELLOS, 2007).

A cinza é um resíduo mineral proveniente dos componentes minerais do lenho e da casca. Quanto maior a proporção de materiais minerais na madeira, maior a produção de cinzas no carvão (COTTA, 1996). Quando comparado com o coque mineral o carvão vegetal geralmente apresenta baixo teor de cinzas (CARMO, 1988).

O teor de cinzas refere-se aos constituintes inorgânicos da madeira e o seu conhecimento é muito importante, pois, após a queima, as cinzas comportam-se como a porção residual da madeira e exigem um sistema próprio para sua retirada, e por serem um material abrasivo podem causar problemas de corrosão em equipamentos metálicos, os principais minerais encontrados nas cinzas são cálcio, magnésio, fósforo e silício. (BRITO, 1979). Altos teores de cinzas podem prejudicar a produção de ferro-gusa, ferro-ligas e metais não ferrosos. No uso industrial em siderurgia, o carvão vegetal deve possuir baixo teor de minerais, pois causa problemas sérios na qualidade do aço produzido (BARCELLOS, 2007).

O rendimento gravimétrico é a relação percentual de peso entre o produto e a matéria prima, expresso em porcentagem (BARCELLOS, 2007). Para Oliveira (1988), o rendimento gravimétrico possui correlação positiva com o teor de lignina total, teor de extrativos e com a densidade da madeira. Correlação negativa entre largura e diâmetro do lúmen das fibras. Para o aumento do rendimento gravimétrico é importante o uso de temperatura máxima média, na faixa dos 400°C, e taxa de aquecimento lenta (OLIVEIRA et al., 1982).

O rendimento em carbono fixo apresenta uma relação diretamente proporcional aos teores de lignina, extrativos e densidade da madeira e inversamente proporcional ao teor de holocelulose. É uma função direta do rendimento gravimétrico e do teor de carbono fixo presente na madeira (OLIVEIRA, 1988).

O poder calorífico é uma propriedade muito importante, principalmente quando se pensa na utilização do carvão vegetal como fonte de energia, em substituição de combustíveis derivados do petróleo. Existem duas maneiras de quantificar o poder calorífico: poder calorífico superior e poder calorífico inferior. O poder calorífico superior é o resultado da combinação entre o teor de carbono fixo e o teor de materiais voláteis (OLIVEIRA, 2003). É o número de calorias liberadas na combustão completa de uma unidade de massa do combustível, sendo expresso em kcal/kg. Existe uma correlação positiva entre o teor de carbono fixo e o poder calorífico, e uma correlação negativa entre o poder calorífico e o teor de materiais voláteis (BARCELLOS, 2007). No poder calorífico superior, a água formada

durante a combustão, na reação entre o hidrogênio elementar da madeira e o oxigênio, é condensada e seu calor latente é recuperado e somado a energia mensurada. No poder calorífico inferior, o calor de condensação da água não é considerado, pois ele é perdido na forma de vapor (CINTRA, 2009).

Friabilidade é a propriedade do carvão vegetal relacionada a suscetibilidade do produto em formar finos quando submetido a abrasão e choques mecânicos. Está relacionada com a umidade, o diâmetro e o comprimento da madeira a ser carbonizada. Altos teores de umidade estão associados a altas velocidades de expansão de gases durante a carbonização, o que provoca rupturas generalizadas na estrutura do carvão resultante, aumentando sua friabilidade. Grandes diâmetros na madeira a ser carbonizada também tendem a gerar carvão mais quebradiço (OLIVEIRA, 2003).

O teor de umidade contido no carvão vegetal exerce grande influência no rendimento dos processos em que ele é utilizado. O carvão absorve umidade da atmosfera, principalmente em períodos de chuva, perdendo-a parcialmente quando exposto ao sol (OLIVEIRA et al., 1982).

3.5 Características das espécies estudadas

3.5.1 *Hovenia dulcis* Thunberg (uva-do-japão)

A Uva-do-Japão (*Hovenia dulcis* Thunberg) conhecida vulgarmente por uva-do-japão (PR), banana-do-japão (SC), caju-do-japão (RJ), mata-fome (SP), pau-doce (MG) e chico-magro (SP), pertence à família Rhamnaceae e ocorre naturalmente entre 25º e 41º N e 100º e 142º L. É uma espécie florestal que ocorre naturalmente na China, Japão e Coréia, tendo sido introduzida no Nepal, Índia, Paraguai, Argentina e na região Sul do Brasil, onde é largamente cultivada na região Sul, de forma isolada ou em pequenos talhões. A árvore possui de 10 a 15m de altura com 20 a 40 cm de diâmetro, a 1,30 m do solo (DAP), e chega a atingir 25 m de altura e 50 cm de DAP no sul do Brasil. O tronco geralmente é reto e cilíndrico, apresentando fuste com até 8 m de comprimento (RIGATTO et al., 2001).

A uva-do-japão é uma árvore caducifólia com copa globosa e ampla. A textura da casca é lisa a levemente fissurada de coloração pardo-escura a cinza-escura. Suas folhas são simples, alternas, curto-pecíoladas, ovadas, acuminadas, glabras na parte superior e ligeiramente pubescentes na parte inferior. As flores são hermafroditas, pequenas, branco-

esverdeadas a creme, numerosas. O fruto forma uma pequena cápsula globosa seca com 2 a 4 sementes, preso a um pedúnculo carnoso cor de canela com sabor doce e agradável. Sementes alaranjadas ou avermelhadas quando recém colhidas e passando para marrom e preta com o tempo. A polinização é feita principalmente por abelhas e o florescimento ocorre, no Brasil, de agosto a fevereiro com frutificação entre março e outubro. A queda das folhas ocorre desde abril até o final de agosto. Começa a frutificar entre o 3º e 4º ano. A dispersão das sementes é zoocórica, por aves e pequenos animais (CARVALHO, 1994).

Além de apresentar tolerância a geadas e multiplicidade de usos, esta espécie tornou-se importante para a região Sul, onde é recomendada para arborização de culturas e de represas, pastagens e como cerca-viva. Além disso, pode ser utilizada para geração de energia, já que sua madeira é considerada de boa qualidade. É uma planta apícola, apresentado bom potencial melífero; tendo também importância medicinal, ornamental e como planta forrageira. Na culinária pode ser utilizada para fazer geléia (CARVALHO, 1994).

Ainda segundo o mesmo autor, a uva-do-japão apresenta características físico-mecânicas similares às do louro pardo (*Cordia trichotoma* (Vell.) Steud.), o que permite seu uso na indústria moveleira. Na região de Caxias do Sul, RS, já existem alguns plantios em pequena escala com essa finalidade que estão obtendo bons resultados. Também são comuns pequenos plantios de uva-do-japão, em propriedades agrícolas, implantados por mudas ou, eventualmente, por semeadura a lanço no terreno bacia do Rio Uruguai, nos Estados de Santa Catarina e no sudoeste do Paraná. No Brasil, seu crescimento é bastante variável, atingindo até 30 m³/ha.ano.

É considerada uma planta invasora, por ocupar áreas de floresta competindo por espaço, luz e nutrientes com espécies nativas. Em longo prazo, este processo tende a diminuir a quantidade de espécies nativas da floresta a ponto de haver uma homogeneidade da flora com sua predominância. Ocorre no Brasil na Floresta Ombrófila Mista Montana (Floresta com Araucária) e na Floresta Estacional Semidecidual, em geral compondo o segundo estrato e clareiras de florestas seletivamente exploradas. Nas florestas com araucária ocupa o estrato abaixo do dossel, tomando gradativamente o espaço das espécies características da fase madura dos pinhais, como cedro, canelas, canjerana, ipê, miguel-pintado e outras (RIGATTO et al., 2001).

Sua madeira, moderadamente pesada (0,50 a 0,72 g/cm3), apresenta alburno amarelo e cerne amarelo a castanho-escuro ou vermelho; brilho opaco a mediano, sem cheiro; textura fina a homogênea; grã direita. É resistente, mediamente tenaz e elástica, apresenta pouca

durabilidade quando em contato com o solo e trabalhabilidade boa, dando superfícies lisas e brilhantes. Quanto a sua composição química apresenta teor de extrativos em torno de 7%, lignina 24% e holocelulose 69%. Seu poder calorífico superior em torno de 4534 kcal/kg permite sua recomendação para produção de energia (RIGATTO et al., 2001).

3.5.2 *Mimosa scabrella* Bentham (bracatinga)

Também conhecida como bracaatinga, abracatinga e bracatinho, a *Mimosa scabrella* Bentham, é uma espécie arbórea nativa exclusivamente do Brasil, na Floresta Ombrófila Mista, aonde chega a formar povoamentos puros. Destaca-se como espécie pioneira, associada às florestas com *Araucaria angustifolia*, em campos originados depois das explorações florestais (KLEIN, 1981). Ocorre desde o estado de São Paulo até o Rio Grande do Sul. Em geral, é uma espécie de clima frio com temperaturas médias anuais não superiores a 18,5°C, sem déficit hídrico. O período de vida máximo de uma árvore de bracatinga é estimado em torno de 30 anos e sua mortalidade ocorre gradualmente ao longo dos anos podendo ser observada no perpassar da primeira década (EMBRAPA, 1997).

Pela sua característica heliófila possui grande aptidão para a colonização de áreas abertas, bem iluminadas, como terrenos queimados e margens de estradas. As sementes de bracatinga apresentam dormência mecânica que pode ser quebrada pelo aquecimento através do fogo ou mesmo pelo sol. Assim, sua expansão depende de fatores que quebrem a dormência das sementes, sendo o fogo um grande aliado na sua propagação e ocupação de novas áreas (FARINHAQUE, 1981).

A bracatinga pertence à família Mimosaceae, sua altura varia de 5-15m, podendo as árvores mais altas atingir até 25 m, com tronco de 30-40 cm de diâmetro na altura do peito. É uma planta semidecídua, heliófila, pioneira, bastante indiferente quanto às condições do solo. Sua madeira é considerada moderadamente pesada com densidade aproximada de 0,67 g/cm^3, dura ao corte, medianamente resistente e de baixa durabilidade natural. (LORENZI, 2002; LISBÃO JÚNIOR 1981). Sua composição química é de aproximadamente 25% de lignina, 59% de celulose, 21% de carbono fixo, 78% de materiais voláteis e cerca de 0,5% de cinzas (BARRICHELO e FOELKEL, 1975).

Esta espécie vem sendo cultivada no sul Brasil desde o início do século XX. O incentivo ao seu plantio iniciou-se a partir de 1909, devido à intensa propaganda que visava atender a demandas energéticas (HOEHNE, 1930 *apud* BARTOSZECK, 2000). No estado do

Paraná, região metropolitana de Curitiba, os bracatingais cobrem uma área de aproximadamente 60.000 ha, garantindo uma fonte de renda fundamental para pequenos produtores rurais da região (LAURENT et al., 1990).

A madeira é utilizada na construção civil, madeira serrada, peças torneadas, compensados, celulose, para acabamentos internos, além de ser empregada como planta apícola e forrageira. É uma planta de rápido crescimento com incremento médio anual ao redor de $26m^3$/ha.ano, recomendada à recuperação de áreas degradadas e conservação de solos, pois através da deposição de biomassa e nutrientes, fertiliza o solo. Entretanto, a sua mais relevante utilização é na produção de energia como carvão vegetal e lenha para indústrias e consumo doméstico, tendo como vantagem a baixa produção de fumaça (BARTOSZECK, 2000).

Conhecida como espécie indicada para utilização como lenha e carvão, é usada principalmente na alimentação de fornos caseiros dos centros rurais e pequenas indústrias. Ao seu reconhecido potencial energético, alia-se o potencial silvicultural, tendo em vista ser uma espécie heliófita rústica de rápido crescimento, frutificando regularmente e em abundância. Favorece, com isto, a produção de mudas, sendo que as sementes não apresentam problemas de germinação (ROTTA e OLIVEIRA, 1981).

É uma espécie que pode ser consorciada com outras culturas como milho e feijão, gerando renda para os produtores rurais pela atividade florestal e agricultura. A agrossilvicultura da bracatinga vem sendo desenvolvida há mais de 80 anos, norteada no mercado de lenha para queima direta, inicialmente para consumo domiciliar e estradas de ferro; e mais recentemente, para abastecer as indústrias regionais. As lavouras são estabelecidas durante o primeiro e terceiro ano de idade do plantio e o corte comercial da bracatinga pode se feito entre o quinto e oitavo ano, tendo um papel importante nas propriedades rurais chegando a responder por mais de 70% da renda líquida (LAURENT et al., 1990).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Material

Este trabalho foi desenvolvido no laboratório de Energia de Biomassa Florestal, da Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

O material utilizado neste trabalho foi cedido pelo professor Éverton Hillig do laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, de acordo com a seguinte metodologia: as árvores foram abatidas da regeneração natural em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista, localizado no *campus* da Universidade Estadual do Centro Oeste – UNICENTRO, no município de Irati, Paraná (Figura 4.1). A composição da flora local caracteriza-se como Floresta Ombrófila Mista (Floresta com Araucária) em estágios iniciais e secundários de sucessão, com alto grau de interferência antrópica (IBGE, 1992).

O local encontra-se nas coordenadas 25º27'56" de latitude Sul com interseção com o meridiano 50º37'51" de longitude Oeste. O clima do município é classificado como “Cfb” (método de Köppen), clima subtropical úmido mesotérmico, apresentando estações climáticas bem definidas, com chuvas distribuídas durante todo o ano e com geadas severas. Em geral, com umidade relativa do ar acentuada e moderado índice pluviométrico. A temperatura média anual é de aproximadamente 18 °C, com mínima de 2°C e máxima de 32°C. O limiar médio das temperaturas varia aproximadamente entre 13 e 23,5°C. A média mensal de precipitação pluviométrica é de aproximadamente 190 mm e da umidade relativa do ar de 80% (SIMEPAR, 2006).

Geologicamente o local está inserido no Segundo Planalto do Paraná, que constitui a faixa de afloramento dos sedimentos paleozóicos da bacia do Paraná. O solo pertence ao permiano carbonífero, com topografia ondulada e acidentada; solos acinzentados/vermelhos ao Norte e castanhos ao Sul. A Geologia e Paleontologia asseguram que a região há mais de 250 milhões de anos foi fundo de mar (MINEROPAR, 2009).

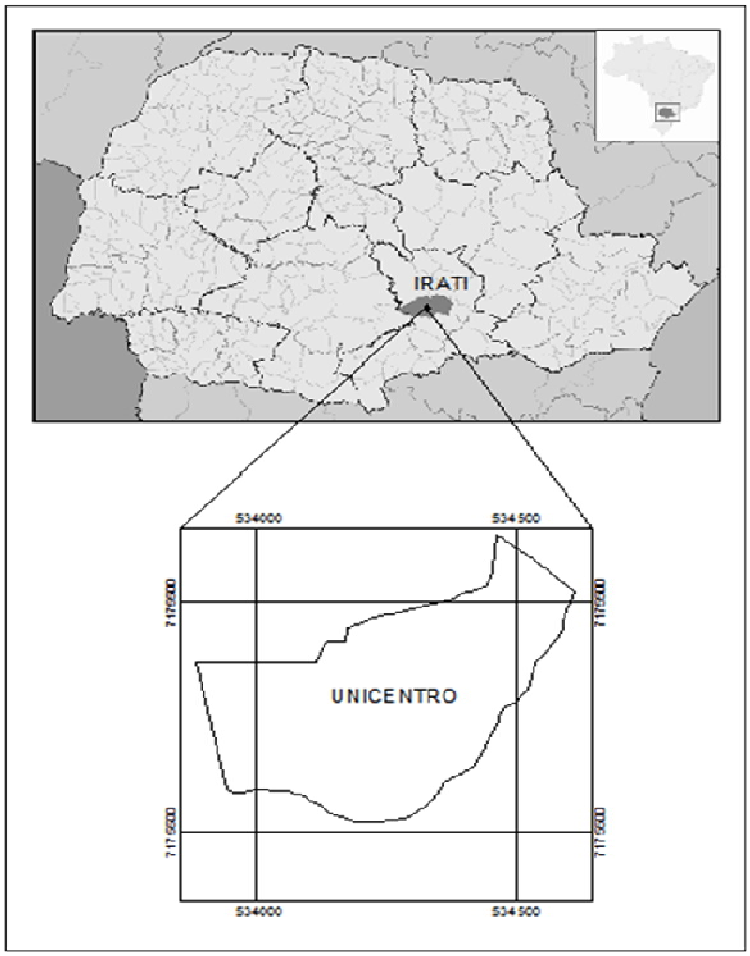


Figura 4.1 Localização geográfica do município de Irati no Estado do Paraná**.**

As amostras de madeira de bracatinga e de uva-do-japão foram obtidas de árvores abatidas no Campus da UNICENTRO, Irati-PR, sendo derrubados quatro e seis exemplares, respectivamente. As árvores foram escolhidas aleatoriamente no campus, com diâmetros médios em torno de 25 cm, foram retirados cerca de 250 corpos-de-prova (240 para os ensaios de pirólise e 10 para as análises químicas da madeira) em várias posições no tronco constituindo uma amostra composta para os ensaios.

4.2 Caracterização da Madeira

4.2.1 Análise química imediata

Os procedimentos utilizados para a análise química imediata da madeira foram executados segundo a norma ABNT NBR 8112 (1983), com determinações de materiais

voláteis, teor de carbono fixo e teor de cinzas, em base seca. A madeira foi transformada em cavacos e seca em estufa a 103 ± 2°C até peso constante. O material seco foi moído em moinho de facas tipo Willey e peneirado para depois efetuar-se a análise. O carvão vegetal foi moído manualmente e levado para a estufa a 103 ± 2°C para sua completa secagem e em seguida foi feita a análise.

Determinação do teor de materiais voláteis

O teor de voláteis é quantificado medindo-se a fração de massa da madeira que volatiliza durante o aquecimento de uma amostra padronizada e previamente seca, em atmosfera inerte, até temperaturas de aproximadamente 900°C num forno mufla por 10 minutos. Após a extração dos voláteis, fica como resíduo o carbono fixo e as cinzas. O teor de voláteis é então determinado conforme a equação 4.1.

$$MV = (m1-m2) / (m1-m3) * 100 \qquad \text{Equação 4.1}$$

em que:

MV = teor de materiais voláteis (%);

m1 = massa da amostra seca + cadinho (g);

m2 = massa da amostra após mufla a 900°C + cadinho (g), sem materiais voláteis;

m3 = massa do cadinho sem material (g).

Determinação do teor de carbono fixo

O valor do carbono fixo é obtido por diferença de massa após submissão da amostra a 900°C e 700°C em mufla conforme a equação 4.2.

$$CF\ (\%) = (m2-m4) / (m1-m3) * 100 \qquad \text{Equação 4.2}$$

em que:

CF = carbono fixo;

m1 = massa da amostra seca + cadinho (g);

m2 = massa da amostra após mufla a 900°C + cadinho (g), sem materiais voláteis;

m3 = massa do cadinho sem material (g).

m4 = massa de cinzas + cadinho após 6 horas na mufla (g);

Determinação do teor de cinzas

As cinzas são resultantes da combustão dos componentes orgânicos e oxidação dos inorgânicos em um forno mufla sob rígido controle de massa, temperatura, tempo e atmosfera. Três gramas de serragem de madeira, já sem umidade e voláteis, são colocadas num cadinho e levadas ao interior da mufla. Sua temperatura é então elevada para 700°C, e nessa condição, fica por 6 horas. Ao final, dentro do cadinho ficam somente as cinzas. O teor de cinzas é calculado utilizando a equação 4.3.

$$CZ = (m4-m3) / (m1-m3) * 100 \qquad \text{Equação 4.3}$$

em que:

CZ = teor de cinzas (%);

m1 = massa da amostra seca + cadinho (g);

m3 = massa do cadinho sem material (g).

m4 = massa de cinzas + cadinho após 6 horas na mufla (g);

4.2.2 Análise química elementar

A análise química elementar foi realizada na Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais. Por meio dessa análise determinou-se o teor de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e, por diferença, o teor de oxigênio do material.

Os resíduos foram peneirados e a alíquota utilizada foi a que passou pela peneira de 60 mesh. Após peneiramento, os resíduos foram secos em estufa convencional à temperatura de (105±2)°C.

Inicialmente, utilizando uma balança com precisão de 0,005 mg, pesaram-se, aproximadamente, 2 mg de resíduo em um porta-amostra de estanho. Em seguida, o conjunto (resíduo + porta amostra) foi depositado no carrossel do equipamento da marca Elementar®. A análise foi realizada em uma amostra por vez. Os gases necessários para a operação foram o hélio, que é o gás de arraste, e o oxigênio, gás de ignição. A temperatura do tubo de combustão, localizado no interior do equipamento, no momento da queda da amostra do carrossel, foi de 1.150°C. Após a combustão os gases foram transportados por arraste para o tubo de redução e dele seguiram para a coluna de detecção. Os elementos foram determinados

por meio de um detector de termocondutividade, em que cada elemento fez sua interação e teve seu pico específico. O computador que estava acoplado ao equipamento fez o cálculo dessa integração e obtiveram-se os valores dos elementos em porcentagem.

4.2.3 Determinação do poder calorífico superior e inferior

A determinação do poder calorífico superior foi realizada segundo a norma ABNT NBR 8633 (1984) em bomba calorimétrica modelo IKA C5000 (figura 4.3), com objetivo de quantificar o calor liberado na combustão desses materiais. As amostras foram preparadas pelo mesmo procedimento descrito no item da análise química imediata.

Fonte: Laboratório de Energia de Biomassa Florestal - Universidade Federal do Paraná, 2011.

Figura 4.2 Calorímetro adiabático modelo IKA C 5000.

O poder calorífico inferior é aquele em que não se considera o calor de condensação da água porque ele é perdido na forma de vapor durante o processo de combustão. É a maneira mais usual de se calcular poder calorífico, pois na maioria dos processos de geração de energia não há condições de recuperação do calor latente do vapor d'água (CINTRA, 2009). Neste trabalho o poder calorífico inferior foi calculado segundo Dumont (1980) e Brito (1993) conforme a equação 4.4:

PCI= PCS-600*(9*H/100) Equação 4.4

em que:

PCI = poder calorífico inferior (kcal/kg);

PCS = poder calorífico superior (kcal/kg);

H= teor de hidrogênio obtido na análise química elementar (%).

4.3 Pirólise da madeira

A madeira foi transformada em corpos de prova de dimensões 3x2x2,5 cm. Antes da carbonização os corpos de prova foram completamente secos em estufa a 103°C ± 2°C. Para os cálculos foi considerada a massa de madeira equivalente a 20 corpos-de-prova utilizados em cada ensaio de carbonização. As espécies estudadas foram carbonizadas em laboratório num forno tipo mufla adaptado para recuperar o licor pirolenhoso (figura 4.4), utilizando velocidades de aquecimento (3 e 5°C/min) sendo realizadas duas repetições para casa ensaio. Quando se objetiva a produção de carvão vegetal é indicado o uso de taxas de aquecimento mais lentas, o que melhora a qualidade do produto final obtido. Como taxas lentas já são bastante estudadas, nessa pesquisa optou-se por testar duas velocidades mais rápidas que proporcionarão maior produção de licor pirolenhoso, um composto com potencial a aplicação energética.

Depois de atingir a temperatura final o material permaneceu na mufla por 180 minutos. A Tabela 4.1 mostra as marchas de carbonização para as duas espécies estudadas (VA= velocidade de aquecimento e TF= Temperatura final de carbonização).

Tabela 4.1 Tratamentos da carbonização da madeira.

Tratamentos	Espécie	VA (°C/min)	TF (°C)
1	*Hovenia dulcis* (uva-do-japão)	3	300
2	*Hovenia dulcis* (uva-do-japão)	3	400
3	*Hovenia dulcis* (uva-do-japão)	3	500
4	*Hovenia dulcis* (uva-do-japão)	5	300
5	*Hovenia dulcis* (uva-do-japão)	5	400
6	*Hovenia dulcis* (uva-do-japão)	5	500
7	*Mimosa scabrella* (bracatinga)	3	300
8	*Mimosa scabrella* (bracatinga)	3	400
9	*Mimosa scabrella* (bracatinga)	3	500
10	*Mimosa scabrella* (bracatinga)	5	300
11	*Mimosa scabrella* (bracatinga)	5	400
12	*Mimosa scabrella* (bracatinga)	5	500

Fonte: Laboratório de Energia de Biomassa Florestal - Universidade Federal do Paraná, 2011.

Figura 4.3 Forno mufla utilizado na carbonização das madeiras.

4.3.1 Rendimento Gravimétrico e Energético em carvão vegetal

O rendimento gravimétrico da carbonização é a relação percentual entre a massa do carvão obtido e a madeira seca usada na carbonização, expresso em porcentagem. Após o esfriamento, o carvão obtido será pesado e determinado também o seu rendimento gravimétrico com o emprego da equação 4.5.

$$RG = (M_c/M_m) * 100 \qquad \text{Equação 4.5}$$

em que:

RG = Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%);

M_c = Massa de carvão vegetal seco (g);

M_m = Massa de madeira seca (g).

O rendimento energético em carvão vegetal é calculado pela equação 4.6.

$$RE = RG*(PCS\ carvão/PCS\ madeira) \qquad \text{Equação 4.6}$$

em que:

RE = rendimento energético em carvão vegetal (%);

RG = rendimento gravimétrico (%);

PCS = poder calorífico superior (kcal/kg).

4.3.2 Rendimento em licor pirolenhoso e gases não condensáveis

O processo de carbonização terá a recuperação de voláteis através de uma adaptação ao forno mufla para recolher esses materiais e quantificá-los. Os gases condensáveis quando atingirem a temperatura ambiente vão se liquefazer, esse líquido, composto por ácido acético, fórmico, metanol e alcatrão solúvel é o chamado licor pirolenhoso e a parte mais densa que fica no fundo do recipiente é o alcatrão insolúvel. O rendimento em licor pirolenhoso pode ser calculado pela equação 4.7.

$$RL = Ml/Mm *100 \qquad \text{Equação 4.7}$$

em que:

RL = rendimento em licor pirolenhoso (%);

Ml = massa do líquido pirolenhoso (g);

Mm = massa de madeira utilizada na carbonização (g).

O rendimento em gases não condensáveis é calculado por diferença pela equação 4.8.

$$Rg = 100 - (RG+RL) \qquad \text{Equação 4.8}$$

em que:

Rg = rendimento em gases não condensáveis (%);

RG = rendimento em carvão vegetal (%);

RL = rendimento em líquido pirolenhoso (%).

4.3.3 Rendimento em carbono fixo

O rendimento em carbono fixo foi obtido pelo produto entre o teor de carbono fixo e o rendimento gravimétrico da carbonização pela equação 4.9.

Equação 4.9

$$RCF = CF * RG/100$$

em que:

RCF = rendimento em carbono fixo (%);

CF = carbono fixo (%);

RG = rendimento gravimétrico (%).

4.4 Caracterização do Carvão Vegetal

A caracterização do carvão vegetal seguiu as mesmas normas, parâmetros e procedimentos do item 4.2 em caracterização de madeiras. Foi acrescido o parâmetro friabilidade.

A friabilidade, maior ou menor resistência do carvão vegetal a geração de finos, está relacionada basicamente com o condicionamento da madeira antes da carbonização como umidade, diâmetro e comprimento. Para determinação da friabilidade do carvão vegetal utilizou-se o teste de tamboramento, onde carvão vegetal foi dividido em três amostras de massa conhecida, as quais foram submetidas a um tambor rotativo por 14 minutos e 28 segundos (OLIVEIRA et al., 1982). O teor de finos é então calculado pela equação 4.10.

$$Tf = (m1-m2) / m1 * 100 \qquad \text{Equação 4.10}$$

em que:
Tf= teor de finos gerados no carvão vegetal (%);
m1= massa de carvão vegetal inicial; antes do tambor (g);
m2= massa de carvão depois do teste (g).

4.5 Delineamento Experimental

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado com arranjo fatorial, com 12 tratamentos e 2 repetições. Considerando dois fatores: temperatura e velocidade de aquecimento, as espécies foram analisadas separadamente. Para verificar a homogeneidade das variâncias foi feito o teste de Bartlett, seguido da ANOVA para verificar se existe ou não diferença entre as médias dos tratamentos e por último o teste de Tukey para comparar as médias, o software utilizado nessas análises foi o Assistat 7.6 beta.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos testes realizados para as madeiras, bem como dos ensaios de pirólise e análises do carvão vegetal produzido. Os resultados são apresentados na seguinte sequência: caracterização da madeira por meio da análise química imediata, análise química elementar, poder calorífico superior e inferior; resultados dos ensaios de pirólise da madeira pelo rendimento gravimétrico e energético em carvão vegetal, rendimento em gases não condensáveis e licor pirolenhoso, rendimento em carbono fixo, e, por último, a caracterização do carvão vegetal produzido com base na análise química imediata, análise química elementar, poder calorífico superior e inferior e friabilidade do carvão vegetal.

Para todos os parâmetros analisados pelo teste de Bartlett as variâncias foram homogêneas. Seguiu-se então para a ANOVA e posteriormente para o teste de Tukey para comparação das médias, os resultados desses testes serão discutidos a seguir.

5.1 Caracterização energética das madeiras de bracatinga e uva-do-japão

Na tabela 5.1 podem-se observar os resultados das análises feitas para as madeiras de bracatinga e uva-do-japão.

Tabela 5.1 Resultados médios da caracterização energética das madeiras de bracatinga e uva-do-japão.

Parâmetros	Unidade	Bracatinga	Uva-do-japão
Materiais Voláteis	%	78,96 a	77,03 b*
Carbono Fixo	%	20,76 a	21,42 a
Cinzas	%	0,28 a	1,54 b**
Carbono	%	47,25 a	46,90 a
Hidrogênio	%	6,49 a	6,14 a
Nitrogênio	%	1,23 a	1,06 b
Enxofre	%	0,0505 a	0,0350 a
Oxigênio	%	44,99 a	45,87 a
Relação C/N	%	38,58 a	44,48 a
Relação C/H	%	7,28 a	7,64 a
Poder Calorífico Superior	kcal/kg	4640 a	4638 a
Poder Calorífico Inferior	kcal/kg	4290 a	4306 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey , * 5% de probabilidade, ** 1% de probabilidade.

Pela análise ANOVA foi observado que o teor de materiais voláteis das madeiras tem diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade. O teste de Tukey mostrou que houve diferença entre as médias. Para a bracatinga o teor de materiais voláteis foi maior, com valor médio de 78,96%, enquanto que o valor médio da uva-do-japão foi 77,03%.

A análise de variância ANOVA indicou que o teor de carbono fixo das madeiras não tem diferença significativa entre as duas espécies estudadas. As médias das espécies não se diferiram significativamente pelo teste de Tukey. O valor médio calculado para o teor de carbono fixo da bracatinga foi de 20,76% e para a uva-do-japão 21,43%.

A análise de variância mostrou que o teor de cinzas diferiu significativamente entre as duas espécies estudadas ao nível de 5% de probabilidade. Pelo teste de Tukey houve diferença entre as médias, para a bracatinga o valor médio encontrado foi de 0,28% bem abaixo do valor encontrado para a uva-do-japão 1,54%.

Os teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas da madeira de bracatinga mostraram-se semelhantes com os valores encontrados por Barrichelo e Fonseca (1979), que foram respectivamente 78,3%, 21,% e 0,5%.

A análise química elementar das madeiras foi realizada com duas repetições. Pela análise de variância observou-se que os teores de carbono, hidrogênio, enxofre e oxigênio não tiveram diferença significativa entre as espécies, isso pode ser justificado pelo fato de que a composição elementar da madeira possui valores que permanecem quase constantes entre diferentes espécies. Pelo teste de Tukey as médias não diferiram significativamente entre si. Para o teor de carbono o valor médio encontrado para a bracatinga foi 47,25% e para a uva-do-japão 46,9% O teor de hidrogênio foi 6,49% para a bracatinga e 6,14% para a uva-do-japão. O teor de enxofre foi de 0,05 e 0,04 para bracatinga e uva-do-japão respectivamente. O teor de oxigênio foi de 44,99% para a bracatinga e 45,87% para a uva-do-japão. Apenas o teor de nitrogênio diferiu significativamente ao nível de 5% de probabilidade. Pelo teste de Tukey o valor médio encontrado para a bracatinga o foi 1,23%, maior que para a uva-do-japão que foi 1,05%.

Os valores obtidos nesse trabalho estão em conformidade com a literatura que diz que o teor de carbono na madeira gira em torno de 50%, o teor de hidrogênio é de aproximadamente 6%, o enxofre está contido na madeira em porções muito pequenas, o teor de oxigênio é de aproximadamente 44% e o nitrogênio também aparece em quantidades ínfimas, 0,1 a 1% (KLOCK et al., 2005).

Ramos e Paula et al. (2011) encontraram em resíduos de madeira valores percentuais de 47% para o carbono, 6,5% para o hidrogênio, 0,2% para o enxofre, 45% para o oxigênio, 0,1% para o nitrogênio. Manalula e Meincken (2009), avaliando cinco espécies: *Acacia cyclops, Acacia erioloba, Eucalyptus cladocalyx, Pinus patula* e *Vitis vinifera,* encontraram 0,34%, 0,30%, 0,18%, 0,24%, 0,51% de nitrogênio para cada espécie respectivamente.

A análise de variância mostrou que o poder calorífico superior das duas espécies não sofreu variação significativa e pelo teste de Tukey não houve diferença entre as médias. Os valores encontrados para o poder calorífico superior foram: 4638 kcal/kg para a uva-do-japão, e 4640 kcal/kg para a bracatinga. Rigatto et al. (2001), encontraram poder calorífico superior de 4534 kcal/kg para uva-do-japão, valor próximo do obtido nesse trabalho. Quirino et al., (2005) calcularam o poder calorífico da bracatinga e encontraram um valor de 4589 kcal/kg e Farinhaque (1981) encontrou 4890 kcal/kg valores que também estão de acordo com os obtidos nesse trabalho. Essas pequenas diferenças se devem ao fato de que existem muitas variações dentro de uma mesma espécie, inclusive dentro de uma mesma árvore nas diferentes partes do tronco.

Pela análise de variância observou-se que o poder calorífico inferior não apresentou diferença significativa entre a madeira das duas espécies estudadas pelo teste de Tukey. A bracatinga obteve um valor médio para o poder calorífico inferior de 4290 kcal/kg enquanto que a uva-do-japão atingiu 4306 kcal/kg.

5.2 Pirólise da Bracatinga

A pirólise das madeiras foi feita no laboratório de Energia de biomassa florestal da Universidade Federal do Paraná, num forno do tipo mufla adaptado para recuperação do licor pirolenhoso. Os ensaios de pirólise foram realizados em duplicata, utilizando 20 corpos-de-prova previamente secos em estufa a 103 ± 2°C. Foram empregadas três temperaturas finais (300, 400 e 500°C) e duas velocidades de aquecimento (3 e 5°C/min), após atingir a temperatura final o forno permaneceu ligado por 180 minutos. Na tabela 5.2 se podem observar os valores de F da análise de variância da bracatinga.

Tabela 5.2 Valores de F da análise de variância ANOVA do carvão vegetal da bracatinga.

	1) Temperatura final	2) Velocidade de aquecimento	3) Interação 1 x 2
RGCV	136,8152 **	0,0085 ns	2,4932 ns
RECV	66,8825 **	0,0457 ns	1,6056 ns
RL	5,4292 *	0,0952 ns	1,4807 ns
RG	5,1718 *	0,0978 ns	0,7423 ns

Onde: RGCV (rendimento em carvão vegetal), RECV (rendimento energético em carvão vegetal), RL (rendimento em licor pirolenhoso), RG (rendimento em gases não condensáveis).

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 =< p < 0,05$)

ns não significativo ($p >= 0,05$)

Na tabela 5.3 são expostos os resultados da pirólise da bracatinga para as diferentes combinações de temperatura final e velocidade de aquecimento estudadas.

Tabela 5.3 Média dos valores dos parâmetros da pirólise da bracatinga.

Parâmetros	Temperatura	Velocidade	Bracatinga
Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%)	300°C	3°C/min	45,19
	400°C	3°C/min	33,62
	500°C	3°C/min	29,35
	300°C	5°C/min	48,22
	400°C	5°C/min	32,24
	500°C	5°C/min	27,95
Rendimento energético em carvão vegetal (%)	300°C	3°C/min	59,10
	400°C	3°C/min	45,21
	500°C	3°C/min	45,04
	300°C	5°C/min	62,22
	400°C	5°C/min	43,12
	500°C	5°C/min	43,15
Rendimento em licor pirolenhoso (%)	300°C	3°C/min	40,57
	400°C	3°C/min	46,11
	500°C	3°C/min	44,54
	300°C	5°C/min	34,32
	400°C	5°C/min	45,52
	500°C	5°C/min	49,02
Rendimento em gases não condensáveis (%)	300°C	3°C/min	14,24
	400°C	3°C/min	20,27
	500°C	3°C/min	26,11
	300°C	5°C/min	17,46
	400°C	5°C/min	22,24
	500°C	5°C/min	23,03

A análise de variância mostrou que o rendimento gravimétrico em carvão vegetal foi influenciado apenas pela temperatura final, não houve variação significativa no rendimento

gravimétrico em carvão vegetal com a variação da velocidade de aquecimento e com a interação desses dois fatores. Na tabela 5.4 podemos observar o teste de comparação de médias do rendimento gravimétrico em carvão vegetal em função da temperatura final de pirólise.

Tabela 5.4 Rendimento gravimétrico em carvão vegetal em função da temperatura final de pirólise.

Temperatura final	Rendimento gravimétrico (%)
300°C	46,70 a
400°C	32,93 b
500°C	28,65 c

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

Com o aumento da temperatura final de carbonização a degradação da madeira tende a ser maior, e com isso o seu rendimento gravimétrico tende a diminuir. Para a temperatura final de 300°C obteve-se um valor médio de 46,70%, enquanto que a temperatura final de 400°C apresentou um valor médio de rendimento gravimétrico de 32,93% e a temperatura final de 500°C, um valor médio de 28,65% (tabela 5.4). Pereira e Lavoranti (1986) encontraram rendimento gravimétrico em carvão vegetal médio de 33% no carvão produzido com temperatura final máxima de 500°C em um ciclo total de carbonização de três horas, Brito, Barrichelo e Fonseca (1979) encontraram rendimento gravimétrico em carvão vegetal da bracatinga de 28,2%, valores inferiores ao obtido nesse trabalho que foi de 36%.

Barbosa (1986), também observou uma queda no rendimento gravimétrico com o aumento da temperatura final de carbonização quando estudou a qualidade do carvão de *Prosopis juliflora* (Sw.) DC. utilizando diferentes temperaturas finais de carbonização. O mesmo aconteceu com Vilas Boas et al. (2010) que estudaram a qualidade do carvão vegetal de resíduos de macaúba com diferentes temperaturas finais de carbonização. Pinheiro e Séye (1998), trabalharam com espécies de eucalipto e diferentes temperaturas finais de carbonização e encontraram resultado semelhante aos demais, que com o aumento da temperatura final de carbonização ocorre uma diminuição no rendimento gravimétrico.

A análise de variância indicou que o rendimento energético em carvão vegetal foi influenciado pela temperatura final da pirólise e não foi significativo para a velocidade de aquecimento e para a interação dos dois fatores. Na tabela 5.5 são apresentados os valores médios do rendimento energético do carvão vegetal em função da temperatura final de

pirólise. Observou-se que com o aumento da temperatura final houve um declínio no rendimento energético do carvão.

Tabela 5.5 Rendimento energético em carvão vegetal em função da temperatura final.

Temperatura final	Rendimento energético (%)
300°C	60,66 a
400°C	44,16 b
500°C	44,09 b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

A análise de variância indicou que o teor de licor pirolenhoso não foi influenciado pela temperatura final da pirólise e pela velocidade de aquecimento. Pelo teste de comparação de médias observou-se que não houve diferença na produção de licor nas diferentes condições de pirólise. Oliveira et al. (2010) avaliaram os parâmetros da qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. com diferentes marchas de carbonização, (combinações de velocidades de aquecimento e temperaturas finais), e observaram que o rendimento em licor pirolenhoso não foi afetado pela marcha de carbonização. O valor médio obtido para o rendimento em licor pirolenhoso da bracatinga (43,35%), está próximo ao valor encontrado por Lima et al. (2007), em um trabalho da Embrapa, onde caracterizaram o *Eucalyptus benthamii*. Em seu trabalho variaram a velocidade de aquecimento até uma temperatura final de 500°C e observaram valor médio de rendimento em licor pirolenhoso de 39,64%.

De acordo com a análise de variância o percentual de gases da carbonização foi influenciado pela temperatura final ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Não houve diferença significativa para a velocidade de aquecimento e para a interação desses dois fatores. A tabela 5.6 mostra os valores médios do rendimento em gases em função da temperatura final da pirólise. Esses valores estão abaixo dos encontrados por Pereira et al. (2000), que encontraram 25,4% e 25,7% para *Eucalyptus dunii* e *Eucalyptus grandis* respectivamente. Observou-se que com o aumento da temperatura final houve um aumento no rendimento em gases, devido ao maior tempo de permanência no forno.

Tabela 5.6 Rendimento em gases não condensáveis em função da temperatura final da pirólise.

Temperatura final	Rendimento em gases não condensáveis (%)
300°C	15,85 b
400°C	21,25 ab
500°C	24,57 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade

5.3 Propriedades do carvão vegetal da bracatinga

Na tabela 5.7 estão expostos os valores de F da análise de variância ANOVA para os parâmetros de qualidade do carvão vegetal avaliados nesse estudo, com base nos valores da análise química imediata, análise química elementar, poder calorífico superior e inferior e friabilidade.

Tabela 5.7 Valores de F da análise de variância ANOVA para os parâmetros de qualidade do carvão vegetal da bracatinga.

Parâmetros	1-Temperatura final	2- Velocidade de aquecimento	Interação 1 x 2
MV (%)	106,3780 **	0,3435 ns	4,4015 ns
CF (%)	115,0114 **	0,3163 ns	4,1619 ns
CZ (%)	20,1715 **	0,5435 ns	12,7291 **
C (%)	200,2687 **	15,9518 **	26,6951 **
H (%)	277,0788 **	0,1183 ns	3,3444 ns
N (%)	2,0691 ns	4,4076 ns	0,4100 ns
S (%)	3,3538 ns	O,2769 ns	4,5231 ns
O (%)	126,6934 **	11,3499 *	20,2396 **
C/N (%)	3,6361 ns	6,0037 *	0,3066 ns
C/H (%)	1245,6116 **	0,2204 ns	38,1283 **
PCS (kcal/kg)	650,5974 **	0,8266 ns	1,6224 ns
PCI (kcal/kg)	142,1819 **	0,0062 ns	510,4743 **
RCF (%)	1,7119 ns	0,3176 ns	6,1555 *
Friabilidade (%)	0,8246 ns	15,1230 **	9,3182 **

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 =< p < 0,05$)

ns não significativo ($p >= 0,05$)

Em que: MV (materiais voláteis), CF (carbono fixo), CZ (cinzas), C (carbono), H (hidrogênio), N (nitrogênio), S (enxofre), O (oxigênio), C/N (relação carbono/nitrogênio), C/H (relação carbono/hidrogênio), PCS (poder calorífico superior), PCI (poder calorífico inferior), RCF (rendimento em carbono fixo do carvão vegetal).

5.3.1 Análise química imediata

Na tabela 5.8 são apresentados os resultados da análise química imediata, com base nos valores médios obtidos para materiais voláteis, carbono fixo e cinzas.

Tabela 5.8 Resultados médios da análise química imediata do carvão vegetal da bracatinga.

Pirólises	Materiais Voláteis (%)	Carbono fixo (%)	Cinzas (%)
300°C 3°/min	44,37	52,97	2,66
400°C 3°/min	35,26	62,40	2,34
500°C 3°/min	22,87	73,99	3,15
300°C 5°/min	49,09	49,08	1,83
400°C 5°/min	34,17	62,67	3,16
500°C 5°/min	16,58	79,95	3,47
Média	33,72	63,51	2,77

A análise de variância indicou que o teor de materiais voláteis sofreu influência da temperatura final de pirólise, e não foi significativo para a velocidade de aquecimento e para a interação entre esses dois fatores ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Pereira e Lavoranti (1986) que estudaram a qualidade de três procedências de bracatinga com fins energéticcos e encontraram valores médios para teor de materiais voláteis em torno de 12,8%. Barrichelo e Fonseca (1979), encontraram teor de materiais voláteis de 23% para o carvão vegetal de bracatinga, ambos os resultados estão abaixo dos obtidos nesse trabalho (tabela 5.8).

Observou-se que o teor de materiais voláteis diminuiu com o aumento da temperatura final e a espécie revelou situação oposta quando se analisou o teor do carbono fixo do carvão, resultados que estão em conformidade com a literatura, que diz que o teor de carbono fixo possui correlação negativa com o teor de materiais voláteis. Comportamento similar aconteceu com Trugilho e Silva (2001), que estudaram a influência da temperatura final de carbonização no carvão vegetal de jatobá (*Himenea coubaril* L.). Pinheiro e Séye (1998), também observaram decréscimo no teor de materiais voláteis com o aumento da temperatura, tal comportamento se justifica pelo fato de que durante o processo de carbonização, quanto maior a exposição da madeira a elevadas temperaturas, maior é a intensidade com que as substâncias voláteis se desprendem do carvão, refletindo diretamente na redução do teor de materiais voláteis (BARCELLOS, 2007). A tabela 5.9 mostra o teste de comparação de médias para o teor de materiais voláteis do carvão vegetal da bracatinga em função da temperatura final de pirólise.

Tabela 5.9 Teor de materiais voláteis em função da temperatura final de pirólise.

Temperatura final	Teor de materiais voláteis (%)
300°C	46,73 a
400°C	34,71 b
500°C	19,72 c

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

A análise de variância mostrou que o teor de carbono fixo do carvão vegetal foi afetado pela temperatura final de carbonização pelo teste de Tukey ao nível de 1% de probabilidade. Não houve efeito significativo da velocidade de aquecimento e da interação da temperatura final com a velocidade de aquecimento.

O valor médio do teor de carbono fixo da bracatinga foi de 63,51%. Pereira e Lavoranti (1986), encontraram valor médio do teor de carbono fixo para a bracatinga de 85,4%. Barrichelo e Fonseca (1979), observaram um valor de 75,1% de carbono fixo no carvão de bracatinga. É sabido que ocorrem variações na madeira, não somente considerando uma mesma espécie, como também em diferentes posições no interior de uma mesma árvore, uma possível explicação para que o valor médio obtido nesse trabalho tenha sido inferior ao da literatura. Os valores obtidos para as espécies avaliadas na pesquisa são abaixo dos valores obtidos para algumas espécies de eucalipto por Pereira et al. (2000) *Eucalyptus alba* Reinw. Ex Blume (87%), *Eucalyptus dunii* Maiden (82,2%), *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden (84,4%).

Na tabela 5.10 pode-se observar o teste de comparação de médias do teor de carbono fixo do carvão vegetal da bracatinga em função da temperatura final de pirólise.

Tabela 5.10 Teor de carbono fixo em função da temperatura final de pirólise.

Temperatura final	Teor de carbono fixo (%)
300°C	51,02 c
400°C	62,54 b
500°C	76,97 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

O aumento da temperatura final causa o aumento da concentração de carbono no carvão vegetal, isso explica a elevação do teor de carbono fixo com o aumento da temperatura final de pirólise. Na tabela 5.10, constatou-se que com o acréscimo na temperatura final de pirólise houve uma elevação no teor de carbono fixo do carvão vegetal. Andrade e Carvalho (1998), Trugilho e Silva (2001) e Barcellos (2007) entre outros autores, observaram o mesmo comportamento no carvão vegetal produzido a partir de diferentes temperaturas.

A análise de variância indicou que o teor de cinzas do carvão vegetal foi influenciado pela temperatura final e pela interação dessa com a velocidade de aquecimento ao nível de 1% de probabilidade. O valor médio observado para o teor de cinzas do carvão vegetal da bracatinga foi 2,77%, esse valor está próximo ao encontrado por Pereira e Lavoranti (1986), para bracatinga da região de Colombo - Paraná, que observaram teor de cinzas de 2,5%, os

mesmos autores observaram valores inferiores de cinzas no carvão vegetal da bracatinga de outras duas regiões: 1,9% no carvão com madeira proveniente de Concórdia - SC e 1,4% da região de Caçador - SC. Barrichelo e Fonseca (1979), observaram para o teor de cinzas um valor de 1,9%, também inferior ao obtido nesse trabalho. Pereira et al. (2000), encontraram para o *Eucalyptus dunii* Maiden teor de cinzas de 2,5% e para o *Eucalyptus grandis* Hill Maiden 0,8%. Na tabela 5.11 estão expostos os resultados encontrados para o teor de cinzas em função da temperatura final de pirólise.

Tabela 5.11 Teor de cinzas em função da temperatura final de pirólise.

Temperatura final	Teor de cinzas (%)
300°C	2,24 b
400°C	2,75 b
500°C	3,31 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

Observou-se que quando houve um aumento no teor de cinzas com o acréscimo na temperatura final de pirólise; e que esse aumento não foi significativo quando se passou de 300°C para 400°C, porém foi significativo de 400°C para 500°C. Uma possível explicação pode ser devido ao efeito do aumento da concentração de minerais pela perda de massa (BARCELLOS, 2007).

O aumento no teor de cinzas do carvão vegetal com o aumento da velocidade não foi significativo, passou de 2,72% na velocidade de 3°C/min, para 2,82% a 5°C/min. Vella et al. (1989), observaram aumento significativo no teor de cinzas com o *Eucalyptus tereticornis*, o teor de cinzas do carvão vegetal aumentou com o aumento da velocidade de pirólise.

5.3.2 Análise química elementar

Na tabela 5.12 são apresentados os resultados da análise química elementar, com base nos valores médios obtidos para carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio.

Tabela 5.12 Resultados médios da análise química elementar do carvão vegetal da bracatinga.

Pirólises	C(%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)	C/N (%)	C/H(%)
300°C 3°/min	66,23	4,66	1,04	0,0015	28,07	63,99	14,20
400°C 3°/min	70,73	3,75	0,95	0,0130	24,57	74,84	18,88
500°C 3°/min	75,69	3,28	1,06	0,0040	19,97	71,74	23,05
300°C 5°/min	58,08	4,84	1,13	0,0035	35,96	51,63	12,01
400°C 5°/min	71,69	3,69	1,06	0,0040	23,57	67,95	19,43
500°C 5°/min	76,06	3,12	1,29	0,0080	19,54	59,19	24,42
Média	69,74	3,89	1,08	0,01	25,28	64,89	18,66

A análise química elementar tem relevante importância em um combustível, pois influencia no seu poder calorífico em função da concentração dos elementos combustíveis carbono e hidrogênio, os valores observados para diferentes espécies possuem uma marcante uniformidade (Brito e Barrichelo, 1978).

A análise de variância indicou que a porcentagem de carbono no carvão vegetal foi afetada pela temperatura final de pirólise, pela velocidade de aquecimento e pela interação desses dois fatores ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de Tukey. Como pode ser observado na tabela 5.13, com o aumento da temperatura final houve um incremento no percentual de carbono do carvão vegetal. Na tabela 5.14 pode-se concluir que com o aumento da velocidade de aquecimento houve um decréscimo no percentual de carbono do carvão vegetal, uma possível justificativa é que com o aumento da velocidade o tempo de exposição da madeira as altas temperaturas diminui e com isso a concentração de carbono no combustível é menor.

Tabela 5.13 Percentual de carbono em função da temperatura final de pirólise.

Temperatura final	Carbono (%)
300°C	62,15 c
400°C	71,21 b
500°C	75,87 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

Tabela 5.14 Percentual de carbono em função da velocidade de aquecimento.

Velocidade de aquecimento	Carbono (%)
3°C/min	70,88 a
5°C/min	68,61 b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

A análise da interação dos dois fatores (tabela 5.15) mostrou que para a temperatura final de 300°C o aumento da velocidade de aquecimento causou uma queda no percentual de carbono do carvão vegetal, enquanto que para as demais temperaturas finais não houve

variação significativa no percentual de carbono com o aumento da velocidade de aquecimento. Verificou-se também que para as duas velocidades estudadas o aumento da temperatura final de pirólise ocasionou um aumento no percentual de carbono do combustível.

Tabela 5.15 Percentual de carbono da interação da temperatura final com a velocidade de aquecimento.

Temperatura final	Velocidade de aquecimento	
	3°C/min	5°C/min
300°C	66,22 c A	58,08 c B
400°C	70,72 b A	71,68 b B
500°C	75,69 a A	76,05 a A

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade. Para colunas letras maiúsculas e para linhas letras minúsculas.

A análise de variância indicou que o percentual de hidrogênio no carvão vegetal foi influenciado apenas pela temperatura final de carbonização. Observou-se um decréscimo do percentual de hidrogênio com o aumento da temperatura final de carbonização. Na tabela 5.16 estão expostos os valores do teste de comparação de médias para o percentual de hidrogênio em função da temperatura final de pirólise.

Tabela 5.16 Percentual de hidrogênio em função da temperatura final de pirólise.

Temperatura final	Hidrogênio (%)
300°C	4,75 a
400°C	3,72 b
500°C	3,20 c

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

A análise de variância indicou que não houve influência significativa da velocidade de aquecimento e da temperatura final de pirólise no percentual de nitrogênio do carvão vegetal. O valor médio do percentual de nitrogênio encontrado para a bracatinga foi de 1,08%. Isso se deve ao fato de que se levando em conta as madeiras de diferentes espécies, não há diferenças consideráveis na sua composição elementar (KLOCK et al. 2005). Altos percentuais de nitrogênio em um combustível são indesejáveis, pois quanto maior seu valor, mais provável é a formação de óxidos de nitrogênio e ácido nítrico, que tem impacto negativo no meio ambiente pela formação de gases residuais (MANALULA E MEINCKEN, 2009).

A análise de variância mostrou que o teor de enxofre do carvão vegetal não foi influenciado pela temperatura final de pirólise e velocidade de aquecimento. O valor médio do teor de enxofre no carvão vegetal de bracatinga foi 0,01%.

A presença de enxofre em um combustível é indesejável devido a problemas de erosão e liberação de SO_2 após a combustão. Ramos e Paula et al. (2011) caracterizaram resíduos de biomassa vegetal para utilização energética e encontraram valores percentuais de enxofre na faixa de 0,1% a 0,4%, sendo superiores aos valores encontrados nessa pesquisa.

A análise de variância indicou que o teor de oxigênio do carvão vegetal foi influenciado pela temperatura final de pirólise e pela interação dos dessa com a velocidade de aquecimento ao nível de 1% de probabilidade. Também foi influenciado pela velocidade de aquecimento ao nível de 5% de probabilidade.

As tabelas 5.17 e 5.18 mostram o teste de comparação de médias para o teor de oxigênio em função da temperatura final de pirólise e da velocidade de aquecimento.

Tabela 5.17 Percentual de oxigênio em função da temperatura final de pirólise.

Temperatura final	Oxigênio (%)
300°C	32,01 a
400°C	24,07 b
500°C	19,75 c

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

Tabela 5.18 Percentual de oxigênio em função da velocidade de aquecimento.

Velocidade de aquecimento	Oxigênio (%)
3°C/min	24,20 b
5°C/min	26,35 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Verificou-se que com o aumento da temperatura final de pirólise ocorreu um decréscimo no percentual de oxigênio do carvão vegetal. Comportamento semelhante ocorreu quando se aumentou a velocidade de aquecimento. A tabela 5.19 mostra o teste de comparação de médias do percentual de oxigênio da interação entre a temperatura final e a velocidade de aquecimento.

Tabela 5.19 Percentual de oxigênio da interação da temperatura final de pirólise com a velocidade de aquecimento.

Temperatura final	Velocidade de aquecimento	
	3°C/min	5°C/min
300°C	28,07 a B	35,96 a A
400°C	24,57 b A	23,57 b A
500°C	19,97 c A	19,54 c A

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade. Para colunas letras maiúsculas e para linhas letras minúsculas.

Não houve efeito significativo do aumento da velocidade de aquecimento para as temperaturas de 400 e 500°C, enquanto que para a temperatura final de 300°C o aumento da velocidade causou um incremento no percentual de oxigênio do carvão vegetal. Observou-se também que para as duas velocidades estudadas o aumento da temperatura final causou uma queda no percentual de oxigênio do carvão vegetal.

5.3.3 Poder calorífico superior e inferior

O poder calorífico tem alto grau de dependência com o teor de umidade, o teor de carbono fixo, lignina, materiais voláteis e composição química elementar da madeira (KLITZKE, 1998). A análise de variância indicou que o poder calorífico superior do carvão vegetal sofreu influência temperatura final. O valor médio observado nesse trabalho foi de 6464 kcal/kg, um pouco abaixo dos valores obtidos por Klitzke (1998) que encontrou um valor médio de 7523 kcal/kg para carvão vegetal de bracatinga produzido a 450 e 550°C. O poder calorífico superior aumentou com o aumento da temperatura final da carbonização. Na tabela 5.20 pode-se observar os valores do teste de comparação de médias para o poder calorífico do carvão vegetal.

Tabela 5.20 Poder calorífico superior em função da temperatura final de pirólise.

Temperatura final	Poder calorífico superior (%)
300°C	6027 c
400°C	6223 b
500°C	7142 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

Esse comportamento aqui relatado está de acordo com Petroff e Doat (1978), Barbosa (1986) e Coutinho (1984). Observou-se uma correlação positiva entre carbono fixo e poder calorífico do carvão, essa correlação foi encontrada também por Trugilho e Silva (2001) no carvão vegetal de jatobá (*Hymeneae coubaril* L.). Segundo Barcellos (2007), taxas maiores de carbonização produzirão carvões com maiores valores médios de poder calorífico, devido ao aumento da quantidade de carbono na estrutura do carvão, composto que quando convertido em dióxido de carbono durante a combustão, produz energia. Quanto maior a concentração de carbono, maior é a energia contida por unidade de peso, aumentando-se o poder calorífico.

Em todos os processos técnicos interessa o poder calorífico inferior, pois este revela o verdadeiro potencial de energia do combustível já que o calor de condensação do vapor

d'água contida nos gases de combustão não é utilizável (KLITZKE, 1998). O valor médio obtido nesse trabalho foi de 6254 kcal/kg. Klitzke (1998) calculou o poder calorífico inferior do carvão vegetal de bracatinga produzido a 450 e 550°C, utilizando a fórmula descrita por Farinhaque (1981) que calcula o poder calorífico inferior pelo hidrogênio elementar, e obteve um valor superior ao encontrado nesse trabalho 7073 kcal/kg.

A análise de variância indicou que o poder calorífico inferior do carvão vegetal foi influenciado pela temperatura final de pirólise e pela interação desta com a velocidade de aquecimento ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de Tukey. A tabela 5.21 mostra os valores do teste de comparação de médias para o poder calorífico inferior do carvão vegetal da bracatinga.

Tabela 5.21 Poder calorífico inferior em função da temperatura final de pirólise.

Temperatura final	Poder calorífico inferior (%)
300°C	5926 c
400°C	6336 b
500°C	6500 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

O comportamento do poder calorífico inferior é o mesmo observa do para o superior, aumentou com o aumento da temperatura final de pirólise, tal fato está de acordo com Klitzke (1998) em sua pesquisa em que analisou o carvão vegetal de bracatinga.

5.3.4 Rendimento em carbono fixo

O valor médio do rendimento em carbono fixo do carvão vegetal calculado para a bracatinga foi de 22,14%, Pereira e Lavoranti (1986), observaram rendimento em carbono fixo de 28%, Klitzke (1998), encontrou rendimento de 24,72% ambos os resultados estão acima dos observados nessa pesquisa. A análise de variância mostrou que não houve influência significativa da temperatura final e da velocidade de aquecimento no rendimento em carbono fixo do carvão vegetal. Klitzke (1998), Silva (2007) e Oliveira et al. (1982) também não encontraram nenhuma influência da temperatura final sobre o rendimento em carbono fixo, justificando que o rendimento gravimétrico diminui proporcionalmente ao crescimento do teor de carbono fixo do mesmo.

5.3.5 Friabilidade

A análise de variância indicou que pelo teste de Tukey ao nível de 1 % de probabilidade, a friabilidade do carvão vegetal é influenciada pela velocidade de aquecimento. O valor médio de friabilidade observado para a bracatinga foi de 2,54%. A tabela 5.22 mostra o teste de comparação de médias para a friabilidade do carvão vegetal em função da velocidade de aquecimento.

Tabela 5.22 Friabilidade (%) do carvão vegetal em função da velocidade de aquecimento.

Velocidade de aquecimento	Friabilidade (%)
3°C/min	2,25 b
5°C/min	2,83 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

Verificou-se que com o aumento da velocidade de aquecimento houve também um aumento na friabilidade do carvão vegetal, tal fato foi observado por Coutinho (1988).

5.4 Pirólise da uva-do-japão

Nesse item serão apresentados os resultados da pirólise da madeira da uva-do-japão, os ensaios foram realizados de acordo com as condições descritas no item 5.2. Pela falta de dados sobre a espécie na literatura, alguns resultados aqui encontrados foram comparados com dados de outras espécies. Na tabela 5.23 estão expostos os valores de F da análise de variância ANOVA do carvão vegetal da uva-do-japão.

Tabela 5.23 Valores de F da análise de variância ANOVA do carvão vegetal da uva-do-japão.

	1) Temperatura final	**2) Velocidade de aquecimento**	**3) Interação 1 x 2**
RGCV	560,0234 **	18,9379 **	4.0252 ns
RECV	18,0489 **	20,4630 **	3,7146 ns
RL	2,2882 ns	1,2140 ns	1,0406 ns
RG	2,5460 ns	0,6658 ns	0,9720 ns

Onde: RGCV (rendimento em carvão vegetal), RECV (rendimento energético em carvão vegetal), RL (rendimento em licor pirolenhoso), RG (rendimento em gases não condensáveis).

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 =< p < 0,05$)

ns não significativo ($p >= 0,05$)

Na tabela 5.24 são expostos os resultados da pirólise da uva-do-japão para as diferentes combinações de temperatura final e velocidade de aquecimento estudadas.

Tabela 5.24 Média dos valores dos parâmetros da pirólise da uva-do-japão.

Parâmetros	Temperatura	Velocidade	Bracatinga
Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%)	300°C	3°C/min	36,35
	400°C	3°C/min	32,46
	500°C	3°C/min	28,83
	300°C	5°C/min	35,28
	400°C	5°C/min	31,34
	500°C	5°C/min	28,77
Rendimento energético em carvão vegetal (%)	300°C	3°C/min	54,11
	400°C	3°C/min	51,87
	500°C	3°C/min	49,39
	300°C	5°C/min	50,50
	400°C	5°C/min	49,37
	500°C	5°C/min	48,73
Rendimento em licor pirolenhoso (%)	300°C	3°C/min	43,44
	400°C	3°C/min	36,28
	500°C	3°C/min	46,35
	300°C	5°C/min	42,97
	400°C	5°C/min	44,15
	500°C	5°C/min	47,30
Rendimento em gases não condensáveis (%)	300°C	3°C/min	20,21
	400°C	3°C/min	31,26
	500°C	3°C/min	24,82
	300°C	5°C/min	21,75
	400°C	5°C/min	24,50
	500°C	5°C/min	23,93

A análise de variância mostrou que o rendimento gravimétrico em carvão vegetal foi influenciado apenas pela temperatura final e pela velocidade de aquecimento ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de Tukey, não houve variação significativa no rendimento gravimétrico em carvão vegetal na interação desses dois fatores. Na tabela 5.25 podemos observar o teste de comparação de médias do rendimento gravimétrico em carvão vegetal em função da temperatura final de pirólise.

Tabela 5.25 Rendimento gravimétrico em carvão vegetal em função da temperatura final de pirólise.

Temperatura final	Rendimento gravimétrico (%)
300°C	35,81 a
400°C	31,90 b
500°C	28,80 c

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

Observou-se que com o aumento da temperatura final da pirólise, houve uma redução no rendimento gravimétrico em carvão vegetal, esse resultado já era esperado pois com a elevação da temperatura, ocorre a decomposição dos constituintes químicos das madeira, provocando perda de massa e consequentemente redução no rendimento do carvão. O rendimento gravimétrico do carvão produzido a 300°C foi significativamente superior ao rendimento do carvão produzido nas demais temperaturas finais. O rendimento gravimétrico médio obtido para a uva-do-japão foi 32,17%, esse valor está próximo aos encontrados por outros autores em estudos sobre carvão vegetal. Vlilas Boas et al. (2010) produziu carvão com resíduos de macaúba (*Acrocomia aculata* (Jacq.) Lodd ex Martins) e alcançou rendimento médio de 35,13%. Andrade (2004), teve rendimento médio de 30,87% no carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla*. Lima et al. (2007), observou rendimento médio de 34,86% para o carvão vegetal de *Eucalyptus benthamii*. Todos esses autores verificaram uma queda no rendimento do carvão vegetal com o aumento da temperatura final.

Outra informação importante é que o rendimento em carvão está alinhado ao teor de carbono fixo do mesmo. Quanto maior a temperatura final, menor o rendimento e maior o seu teor de carbono fixo. Na tabela 5.26 estão os valores do teste de comparação de médias para o rendimento gravimétrico em carvão vegetal da uva-do-japão em função da velocidade de aquecimento. Observou-se que com o aumento da velocidade de aquecimento houve uma diminuição do rendimento do carvão.

Tabela 5.26 Rendimento gravimétrico em carvão vegetal em função da velocidade de aquecimento.

Velocidade de aquecimento	Rendimento Gravimétrico (%)
3°C/min	32,54 a
5°C/min	31,80 b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

A análise de variância indicou que o rendimento energético em carvão vegetal foi influenciado pela temperatura final da pirólise e pela velocidade de aquecimento. Na tabela 5.27 e 5.28 são apresentados os valores médios do teste de comparação de médias do rendimento energético do carvão vegetal em função da temperatura final de pirólise e velocidade de aquecimento.

Tabela 5.27 Rendimento energético em carvão vegetal em função da temperatura final.

Temperatura final	Rendimento energético (%)
300°C	52,31 a
400°C	50,27 b
500°C	49,06 b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

Tabela 5.28 Rendimento energético em carvão vegetal em função velocidade de aquecimento.

Velocidade de aquecimento	Rendimento energético(%)
3°C/min	51,55 a
5°C/min	49,53 b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

O aumento da temperatura final da pirólise causou um decréscimo no rendimento energético do carvão vegetal. Esse comportamento é justificado pelo fato de o rendimento energético ser calculado a partir do rendimento gravimétrico do carvão. A velocidade de aquecimento também interferiu no rendimento energético do carvão vegetal, seu aumento diminuiu o rendimento do carvão.

A análise de variância indicou que o teor de licor pirolenhoso não foi influenciado pela temperatura final da pirólise e pela velocidade de aquecimento. O mesmo comportamento foi observado por Oliveira et al. (2010). Pelo teste de comparação de médias observou-se que não houve diferença na produção de licor nas diferentes condições de pirólise. O valor médio observado para o teor de licor da uva-do-japão foi de 43,42%. Brito e Filho (1987), encontraram um valor próximo ao aqui descrito para o carvão vegetal de variedades de bambu (43,6%), e um pouco acima desses valores para o rendimento em licor do *Eucalyptus urophylla* (49,9%).

O rendimento em gases não condensáveis não foi influenciado pela temperatura final e pela velocidade de aquecimento, pelo teste de Tukey as médias foram iguais estatisticamente. O valor obtido para o carvão vegetal da uva-do-japão foi de 24,41%. Lima et al. (2007), encontraram 25,56% de gases não condensáveis no carvão de *Eucalyptus benthamii*, Andrade (2004), 26,1% para o carvão de endocarpos de coco (*Cocos nucifera* Linn.) e 26,57% para o carvão de *Eucalyptus urophylla* e Oliveira et al. (2010), 10,76% de gases não condensáveis para o carvão vegetal de *Eucalyptus pellita*. Com exceção desse último, os demais autores encontraram valores próximos aos dessa pesquisa.

5.5 Propriedades do carvão vegetal da uva-do-japão

Na tabela 5.29 estão expostos os valores de F da análise de variância ANOVA para os parâmetros de qualidade do carvão vegetal avaliados nesse estudo, com base nos valores da análise química imediata, análise química elementar, poder calorífico superior e inferior e friabilidade.

Tabela 5.29 Valores de F da análise de variância ANOVA para os parâmetros de qualidade do carvão vegetal da uva-do-japão.

Parâmetros	1-Temperatura final	2- Velocidade de aquecimento	Interação 1 x 2
MV (%)	1731,8404 **	192,8116 **	128,7785 **
CF (%)	1237,5236 **	160,5626 **	105,0226 **
CZ (%)	17,9511 **	3,6522 ns	1,4243 ns
C (%)	44,071 **	0,4277 ns	9,1134 *
H (%)	260,3910 **	1,0462 ns	13,3930 **
N (%)	11.0669 **	2,6614 ns	1,1850 ns
S (%)	9,6483 *	1,5575 ns	4,4554 ns
O (%)	29,6016 **	0,2624 ns	7,3492 *
C/N (%)	22,0757 **	1,9967 ns	1,4266 ns
C/H (%)	5835,5067 **	3,1034 ns	397,3514 **
PCS (kcal/kg)	349,9805 **	11,8681 *	4,8409 ns
PCI (kcal/kg)	75,9024 **	11,3119 **	345,8247 **
RCF (%)	69,7399 **	68,9058 **	140,9796 **
Friabilidade (%)	1,3568 ns	0,6069 ns	0,7955 ns

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 =< p < 0,05$)

ns não significativo ($p >= 0,05$)

Em que: MV (materiais voláteis), CF (carbono fixo), CZ (cinzas), C (carbono), H (hidrogênio), N (nitrogênio), S (enxofre), O (oxigênio), C/N (relação carbono/nitrogênio), C/H (relação carbono/hidrogênio), PCS (poder calorífico superior), PCI (poder calorífico inferior), RCF (rendimento em carbono fixo do carvão vegetal).

5.5.1 Análise química imediata

Na tabela 5.30 são apresentados os resultados da análise química imediata, com base nos valores médios obtidos para materiais voláteis, carbono fixo e cinzas.

Tabela 5.30 Resultados médios da análise química imediata do carvão vegetal da uva-do-japão.

Pirólises	Materiais Voláteis (%)	Carbono fixo (%)	Cinzas (%)
300°C 3°/min	32,33	65,27	2,41
400°C 3°/min	23,11	73,93	2,96
500°C 3°/min	12,05	84,44	3,51
300°C 5°/min	45,85	51,23	2,92
400°C 5°/min	23,93	72,99	3,08
500°C 5°/min	13,10	83,34	3,57
Média	25,06	71,87	3,07

A análise de variância indicou que o teor de materiais voláteis sofreu influência da temperatura final de pirólise, da velocidade de aquecimento e da interação entre esses dois fatores ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de Tukey.

O valor médio observado para a uva-do-japão foi 25,06%. Andrade et al. (1998), encontraram valores próximos ao da uva-do-japão para abricó macaco (*Coroupita guianensis* Aubl.) e andiroba (*Carapa guianensis* Aubl.) 23,69% e 26,64% respectivamente. Pereira et al. (1986), estudando três precedências de *Eucalyptus dunnii* calcularam um valor médio para o teor de materiais voláteis de 15,67% e Pereira et al. (2000), observaram para *Grevillea robusta* 16,6% de materiais voláteis, ambos os resultados são inferiores ao dessa pesquisa.

As tabelas 5.31 a 5.33, mostram respectivamente os valores do teste de comparação de médias para o teor de materiais voláteis da uva-do-japão em função da temperatura final de pirólise, da velocidade de aquecimento e da interação desses dois fatores.

Tabela 5.31 Teor de materiais voláteis em função da temperatura final.

Temperatura final	Teor de materiais voláteis (%)
300°C	39,09 a
400°C	23,52 b
500°C	12,57 c

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

O aumento da temperatura final causou um decréscimo no teor de materiais voláteis do carvão vegetal. Tal comportamento é justificado pelo falto de que quanto maior é a exposição da madeira a altas temperaturas, maior será a intensidade com que as substâncias voláteis se desprendem do carvão, o que reflete diretamente na redução do teor de materiais voláteis. Esse comportamento foi observado por vários autores (Barcellos, 2007; Andrade et al., 1998; Pinheiro e Séye, 1998; Vilas Boas, 2010).

Tabela 5.32 Teor de materiais voláteis em função velocidade de aquecimento.

Velocidade de aquecimento	Teor de materiais voláteis (%)
3°C/min	22,49 b
5°C/min	27,63 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

O aumento da velocidade de pirólise causou um aumento no teor de materiais voláteis do carvão vegetal. Oliveira et al. (2010), observaram para o carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* que o teor de materiais voláteis passou de 11,15% para 14,65% quando se aumentou a velocidade de 1,19°C/min para 1,36°C/min.

Tabela 5.33 Teor de materiais voláteis da interação da temperatura final de pirólise com a velocidade de aquecimento.

Temperatura final	Velocidade de aquecimento	
	3°C/min	5°C/min
300°C	32,33 aB	45,85 aA
400°C	23,11 bA	23,93 bA
500°C	12,05 cA	13,09 cA

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade. Para colunas letras maiúsculas e para linhas letras minúsculas.

Para as duas velocidades de aquecimento estudadas houve incremento no teor de voláteis com o aumento da temperatura final. Na temperatura final de 300°C o aumento da velocidade causou um aumento significativo no teor de voláteis do carvão vegetal, situação que não ocorreu nas demais temperaturas, onde o aumento da velocidade não provocou variação significativa o teor de voláteis do carvão vegetal.

A análise de variância mostrou que o teor de carbono fixo do carvão vegetal foi afetado pela temperatura final de carbonização, pela velocidade de aquecimento e pela interação da temperatura final com a velocidade de aquecimento ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de Tukey. O valor médio do teor de carbono fixo do carvão vegetal da uva-do-japão foi 71,87%. Andrade et al. (1998), observaram para o carvão vegetal de abricó macaco (*Coroupita guianensis* Aubl.) e andiroba (*Carapa guianensis* Aubl.) 71,31% e 69,37% respectivamente, valores muito próximos aos da uva-do-japão. Brito et al. (1983), estudando algumas espécies de eucalipto encontraram valores de 86%, 86,9% e 71,2% de materiais voláteis para *E. triantha, E. microcorys e E. pellita* respectivamente. Pereira et al. (2000), verificaram para o carvão vegetal de *Grevillea robusta* teor de materiais voláteis de 81,1% valores acima dos encontrados nessa pesquisa para o carvão de uva-do-japão.

As tabelas 5.34 a 5.36, mostram respectivamente os valores do teste de comparação de médias para o teor de carbono fixo da uva-do-japão em função da temperatura final de pirólise, da velocidade de aquecimento e da interação desses dois fatores.

Tabela 5.34 Teor de carbono fixo em função da temperatura final.

Temperatura final	Teor de carbono fixo (%)
300°C	58,25 c
400°C	73,46 b
500°C	83,89 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

O aumento da temperatura final de carbonização ocasionou um aumento no carbono fixo do carvão vegetal, comportamento contrário ao do teor de materiais voláteis. Esses resultados estão em consonância com a literatura, onde o teor de carbono fixo possui correlação negativa com o teor de materiais voláteis.

Tabela 5.35 Teor de carbono fixo em função velocidade de aquecimento.

Velocidade de aquecimento	Teor de carbono fixo (%)
3°C/min	74,56 a
5°C/min	69,18 b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

Com o aumento da velocidade de aquecimento houve uma queda no teor de carbono fixo do carvão vegetal, uma possível explicação seria que o aumento da velocidade diminui o tempo total da pirólise, isso faz com que haja menos tempo de exposição da madeira as altas temperaturas e menor concentração de carbono fixo no combustível.

Tabela 5.36 Teor de carbono fixo da interação da temperatura final de pirólise com a velocidade de aquecimento.

Temperatura final	Velocidade de aquecimento	
	3°C/min	5°C/min
300°C	65,26 cA	51,23 cB
400°C	73,93 bA	72,98 bA
500°C	84,44 aA	83,34 Aa

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade. Para colunas letras maiúsculas e para linhas letras minúsculas.

A análise da interação mostra que para as duas velocidades de aquecimento estudadas o seu aumento causou elevação no teor de carbono fixo do carvão vegetal. Na temperatura

final de 300°C o aumento da velocidade causou decréscimo significativo no teor de carbono fixo do carvão, nas demais temperaturas essa diminuição não foi significativa.

A análise de variância indicou que o teor de cinzas do carvão vegetal foi influenciado pela temperatura final ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de Tukey, e não foi significativo para a velocidade de aquecimento e para a interação dos dois fatores. O valor médio do teor de cinzas do carvão vegetal de uva-do-japão foi 3,07%. Andrade et al. (1998), encontraram para o carvão vegetal de abricó de macaco (*Coroupita guianensis* Aubl.) e andiroba (*Carapa guianensis* Aubl.) 5% de cinzas, valor superior ao da uva-do-japão. Pereira et al. (1986), estudando três procedências de *Eucalyptus dunnii* observaram uma valor médio para o teor de cinzas de 2,22%. Pereira et al. (2000), calcularam para o teor de cinzas do carvão vegetal de *Grevillea robusta* um valor de 2,3% ambos inferiores ao da uva-do-japão. Na tabela 5.37 estão os valores do teste de comparação de médias para o teor de cinzas em função da temperatura final de pirólise.

Tabela 5.37 Teor de cinzas em função da temperatura final.

Temperatura final	Teor de cinzas (%)
300°C	2,66 b
400°C	3,02 b
500°C	3,54 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

5.5.2 Análise química elementar

Na tabela 5.38 são apresentados os resultados da análise química elementar do carvão vegetal da uva-do-japão, com base nos valores médios obtidos para carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio.

Tabela 5.38 Resultados médios da análise química elementar do carvão vegetal da uva-do-japão.

Pirólises	C(%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)	C/N (%)	C/H(%)
300°C 3°/min	67,24	4,46	1,15	0,0180	27,13	58,72	15,06
400°C 3°/min	72,94	3,75	1,27	0,0460	21,99	57,43	19,44
500°C 3°/min	80,04	2,92	1,07	0,0190	15,95	74,80	27,42
300°C 5°/min	72,67	4,11	1,12	0,0105	22,09	64,88	17,68
400°C 5°/min	71,36	3,75	1,17	0,0270	23,69	60,99	19,02
500°C 5°/min	77,79	3,13	1,07	0,0300	17,98	73,04	24,83
Média	73,67	3,69	1,14	0,0251	21,47	64,98	20,57

A análise de variância indicou que a porcentagem de carbono no carvão vegetal foi afetada pela temperatura final de pirólise ao nível de 1% de probabilidade, e pela interação desses dois fatores ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey, não houve efeito significativo da velocidade de aquecimento no teor de carbono. Como pode ser observado na tabela 5.39, com o aumento da temperatura final houve um incremento no percentual de carbono do carvão vegetal. Comportamento semelhante ao do carvão vegetal da bracatinga.

Tabela 5.39 Percentual de carbono em função da temperatura final de pirólise.

Temperatura final	Carbono (%)
300°C	69,95 b
400°C	72,15 b
500°C	78,91 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

Na tabela 5.40 podem-se observar os valores do teste de comparação de médias do percentual de carbono do carvão vegetal da uva-do-japão. Na velocidade de 3°C/min o aumento da temperatura final de aquecimento provocou um aumento no percentual de carbono, na velocidade de 5°C/min esse aumento foi não significativo quando se passou de 300 para 400° C e foi significativo de 400 para 500°C. Na temperatura final de 300°C a maior velocidade gerou carvão com maior percentual de carbono, nas demais temperaturas finais não houve efeito significativo do aumento da velocidade no percentual de carbono do carvão.

Tabela 5.40 Percentual de carbono da interação da temperatura final de pirólise com a velocidade de aquecimento.

Temperatura final	Velocidade de aquecimento	
	3°C/min	5°C/min
300°C	67,24 cB	72,66 bA
400°C	72,94 bA	71,36 bA
500°C	80,04 aA	77,79 aA

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Para colunas letras maiúsculas e para linhas letras minúsculas.

A análise de variância indicou que o percentual de hidrogênio no carvão vegetal foi influenciado pela temperatura final de carbonização e pela interação desses dois fatores. Observou-se um decréscimo do percentual de hidrogênio com o aumento da temperatura final de carbonização. Na tabela 5.41 estão expostos os valores do teste de comparação de médias para o percentual de hidrogênio em função da temperatura final de pirólise.

Tabela 5.41 Percentual de hidrogênio em função da temperatura final de pirólise.

Temperatura final	Hidrogênio (%)
300°C	4,29 a
400°C	3,75 b
500°C	3,03 c

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

Na tabela 5.42 podem-se observar os valores do teste de comparação de médias do percentual de hidrogênio do carvão vegetal da uva-do-japão. Para a temperatura de 300°C a menor velocidade gerou carvão com maior teor de hidrogênio, na temperatura final de 400°C não houve variação no teor de hidrogênio com o aumento da velocidade de aquecimento; e na temperatura final de 500°C o maior teor de hidrogênio foi do carvão vegetal produzido na maior velocidade. Para as duas velocidades de aquecimento estudadas o percentual de hidrogênio diminuiu com o aumento da temperatura final da pirólise.

Tabela 5.42 Percentual de hidrogênio da interação da temperatura final de pirólise com a velocidade de aquecimento.

Temperatura final	Velocidade de aquecimento	
	3°C/min	5°C/min
300°C	4,46 aA	4,11 aB
400°C	3,75 bA	3,75 bA
500°C	2,92 cB	3,13 cA

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade. Para colunas letras maiúsculas e para linhas letras minúsculas.

A análise de variância indicou que o percentual de nitrogênio foi influenciado apenas pela temperatura final da pirólise e não foi significativo para a velocidade de aquecimento e para a interação desses dois fatores. Na tabela 5.43 estão expostos os valores do teste de comparação de médias para o percentual de nitrogênio em função da temperatura final de pirólise.

Tabela 5.43 Percentual de nitrogênio em função da temperatura final de pirólise.

Temperatura final	Nitrogênio (%)
300°C	1,13 ab
400°C	1,22 a
500°C	1,06 b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

O percentual de oxigênio foi influenciado pela temperatura final da pirólise e pela interação dessa com a velocidade de aquecimento pelo teste de Tukey aos níveis de probabilidade de 1 e 5% respectivamente. Na tabela 5.44 estão expostos os valores do teste de

comparação de médias para o percentual de oxigênio em função da temperatura final de pirólise.

Tabela 5.44 Percentual de oxigênio em função da temperatura final de pirólise.

Temperatura final	Oxigênio (%)
300°C	24,61 a
400°C	22,84 a
500°C	16,97 b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

O aumento da temperatura final da pirólise causou um decréscimo no percentual de oxigênio do carvão, sendo que esse não foi significativo quando se passou de 300°C para 400°C e foi sigificativo de 400 para 500°C.

Na tabela 5.45 podem-se observar os valores do teste de comparação de médias do percentual de oxigênio do carvão vegetal da uva-do-japão. Para as temperaturas de 400 e 500°C não houve variação no teor de oxigênio com o aumento da velocidade de aquecimento, para a temperatura final de 300°C o maior teor de oxigênio foi do carvão vegetal produzido na menor velocidade. Para as duas velocidades de aquecimento estudadas o percentual de oxigênio diminuiu com o aumento da temperatura final da pirólise.

Tabela 5.45 Percentual de oxigênio da interação da temperatura final de pirólise com a velocidade de aquecimento.

Temperatura final	Velocidade de aquecimento	
	3°C/min	5°C/min
300°C	27,13 aA	22,09 abB
400°C	21,99 bA	23,69 aA
500°C	15,95 cA	17,98 bA

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Para colunas letras maiúsculas e para linhas letras minúsculas.

A análise de variância mostrou que o percentual de enxofre do carvão vegetal da uva-do-japão foi significativo apenas para a temperatura final da pirólise. Na tabela 5.46 estão os valores do teste de comparação de médias do percentual de enxofre do carvão da uva-do-japão. É possível observar que o percentual de enxofre aumentou quando se passou de 300 para 400°C voltando a cair de 400 para 500°C.

Tabela 5.46 Percentual de enxofre em função da temperatura final de pirólise.

Temperatura final	Enxofre (%)
300°C	0,01 b
400°C	0,03 a
500°C	0,02 ab

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

5.5.3 Poder calorífico superior e inferior

A análise de variância indicou que o poder calorífico superior do carvão vegetal sofreu influência temperatura final e da velocidade de aquecimento. O valor médio observado nesse trabalho foi de 7326 kcal/kg, um pouco abaixo dos valores obtidos por Oliveira et al. (2010), para o carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* 8223 kcal/kg e Vilas Boas et al. (2010), encontraram poder calorífico superior de 7819 kcal/kg para o carvão vegetal dos resíduos da macaúba (*Acrocomia aculeata*). Já Barcellos (2007), observou para o carvão vegetal de *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus urophylla* 7497 e 7216 kcal/kg respectivamente, valores muito próximos aos do carvão vegetal da uva-do-japão. O poder calorífico superior aumentou com o aumento da temperatura final da carbonização. Na tabela 5.47 pode-se observar os valores do teste de comparação de médias para o poder calorífico do carvão vegetal.

Tabela 5.47 Poder calorífico superior em função da temperatura final de pirólise.

Temperatura final	Poder calorífico superior (%)
300°C	6771 c
400°C	7308 b
500°C	7900 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

O aumento da temperatura final da pirólise provocou aumento no poder calorífico do carvão vegetal. Taxas maiores produzirão carvões com maiores valores médios de poder calorífico devido ao aumento da quantidade de carbono na estrutura do carvão, composto que quando convertido em dióxido de carbono, durante a combustão, produz energia (BARCELLOS, 2007).

A velocidade de aquecimento foi significativa ao nível de 5% de probabilidade, na tabela 5.48 podemos observar os valores do teste de comparação de médias do poder calorífico superior do carvão vegetal da uva-do-japão. O aumento da velocidade de aquecimento diminuiu o poder calorífico superior.

Tabela 5.48 Poder calorífico superior em função velocidade de aquecimento.

Velocidade de aquecimento	Poder calorífico superior (%)
3°C/min	7386 a
5°C/min	7266 b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

O valor médio do poder calorífico inferior obtido nesse trabalho foi de 7127 kcal/kg. A análise de variância indicou que o poder calorífico inferior do carvão vegetal foi influenciado pela temperatura final de pirólise e pela interação desta com a velocidade de aquecimento ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de Tukey; e pela velocidade de aquecimento ao nível de 5% de probabilidade. As tabelas 5.49 a 5.51 mostram respectivamente os valores do teste de comparação de médias para o poder calorífico inferior do carvão vegetal da uva-do-japão em função da temperatura final, da velocidade de aquecimento e a interação desses dois fatores.

Tabela 5.49 Poder calorífico inferior em função da temperatura final de pirólise.

Temperatura final	Poder calorífico inferior (%)
300°C	6886 c
400°C	7101 b
500°C	7394 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

O aumento da temperatura final da pirólise causou um aumento no poder calorífico inferior do carvão vegetal, o contrário aconteceu com a velocidade de aquecimento, seu aumento provocou a diminuição do poder calorífico inferior.

Tabela 5.50 Poder calorífico inferior em função velocidade de aquecimento.

Velocidade de aquecimento	Poder calorífico inferior (%)
3°C/min	7184 a
5°C/min	7070 b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 5.51 Poder calorífico inferior da interação da temperatura final de pirólise com a velocidade de aquecimento.

Temperatura final	Velocidade de aquecimento	
	3°C/min	5°C/min
300°C	6663 cB	7108 bA
400°C	7786 aA	6417 cB
500°C	7103 bB	7686 aA

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade. Para colunas letras maiúsculas e para linhas letras minúsculas.

5.5.4 Rendimento em carbono fixo

A análise de variância mostrou que o rendimento em carbono fixo do carvão vegetal da uva-do-japão foi influenciado pela temperatura final da pirólise e pela velocidade de aquecimento. O valor médio do rendimento em carbono fixo do carvão vegetal calculado para a uva-do-japão foi de 22,83%, Andrade et al. (1998), encontraram para abricó de macaco (*Coroupita guianensis* Aubl.), andiroba (*Carapa guianensis* Aubl.) e angico branco (*Piptadenia peregrina* (L.) Benth) 27,15; 25,43 e 25,76% de rendimento em carbono fixo respectivamente, valores um pouco acima do aqui calculado. Nas tabelas 5.52 e 5.53 estão os valores do teste de comparação de médias do poder calorífico inferior do carvão vegetal da uva do Japão em função da temperatura final e da velocidade de aquecimento.

Tabela 5.52 Rendimento em carbono fixo em função da temperatura final de pirólise.

Temperatura final	Rendimento em carbono fixo (%)
300°C	23,85 a
400°C	21,20 b
500°C	23,43 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

Observou-se que com o aumento da temperatura final de 300 para 400°C houve uma queda no rendimento em carbono fixo, porém voltou a crescer de 400 para 500°C. Com relação a velocidade de aquecimento, seu aumento provocou uma pequena diminuição do rendimento em carbono fixo do carvão.

Tabela 5.53 Rendimento em carbono fixo em função velocidade de aquecimento.

Velocidade de aquecimento	Rendimento em carbono fixo (%)
3°C/min	23,65 a
5°C/min	22,01 b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 1% de probabilidade.

5.5.5 Friabilidade

Pela análise de variância verificou-se que a friabilidade do carvão vegetal da uva-do-japão não sofreu influencia dos fatores estudados. O valor médio Observado nesse trabalho foi de 4,40% acima do valor obtido para a bracatinga.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados do presente trabalho, considerando os objetivos específicos permitem concluir que:

a) As madeiras de bracatinga e uva-do-japão apresentaram diferença estatística apenas para o teor de materiais voláteis, teor de cinzas e de nitrogênio; sendo iguais para os demais parâmetros avaliados.

b) O rendimento gravimétrico e energético em carvão vegetal diminuíram com o aumento da temperatura final da pirólise para as duas espécies estudadas.

c) O rendimento em licor pirolenhoso não sofreu influência significativa da temperatura final e da velocidade de aquecimento.

d) O rendimento em gases não condensáveis da bracatinga diminuiu com o aumento da temperatura final e não sofreu influência da velocidade de aquecimento, enquanto que o da uva-do-japão não foi alterado por nenhum dos fatores estudados.

e) Pela análise química imediata da bracatinga verificou-se que o aumento da temperatura final diminuiu o teor de materiais voláteis e aumentou o teor de carbono fixo e de cinzas, e a velocidade não causou variação nesses parâmetros.

f) Pela análise química imediata da uva-do-japão observou-se que o teor de materiais voláteis diminuiu com o aumento da temperatura final e aumentou com o aumento da velocidade de aquecimento; o teor de carbono fixo aumentou com o aumento da temperatura final e diminuiu com o aumento da velocidade de aquecimento e o teor de cinzas aumentou com o aumento da temperatura final e não sofreu influência da velocidade.

g) O percentual de carbono da bracatinga aumentou com o aumento da temperatura final e diminuiu com o aumento da velocidade de aquecimento; o percentual de hidrogênio diminuiu com o aumento da temperatura final e não sofreu alteração com o aumento da velocidade de aquecimento; os percentuais de nitrogênio e enxofre não sofreram influência dos fatores estudados e o percentual de oxigênio diminuiu com o aumento da temperatura final e aumentou com o aumento da velocidade.

h) O percentual de carbono da uva-do-japão aumentou com o aumento da temperatura final; os percentuais de hidrogênio e oxigênio diminuíram com o aumento da temperatura final; os percentuais de nitrogênio e enxofre cresceram com o aumento da

temperatura final de 300 para 400°C voltando a cair de 400 para 500°C; e nenhum deles sofreu alteração com o aumento da velocidade de aquecimento.

i) O poder calorífico aumentou com o aumento da temperatura final para as duas espécies estudadas.

j) O rendimento em carbono fixo não foi influenciado pela temperatura final e pela velocidade de aquecimento para a bracatinga e diminuiu com o aumento da temperatura final para a uva-do-japão.

k) A friabilidade do carvão vegetal da uva-do-japão não foi influenciada pelos dois fatores estudados, enquanto que a do carvão de bracatinga aumentou com o aumento da velocidade de aquecimento.

Com base no presente trabalho, especialmente devido às velocidades de aquecimento usadas, recomenda-se:

a) Analisar a qualidade do licor pirolenhoso, especialmente a fração densa, para fins energéticos para uso direto e adicionar em óleos combustíveis.

b) Estudar a fração volátil (gases não condensáveis e licor pirolenhoso) para uso direto em caldeiras visando geração de energia elétrica.

7. REFREÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR - 7190/97 - Projeto de Estrutura de Madeira.** Rio de Janeiro, 1997.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR – 8112/83 – Carvão vegetal – Análise imediata.** Rio de Janeiro, 1983.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR – 8633/84 – Carvão vegetal: determinação do poder calorífico,** 1984.

ANDRADE, A. M. **Influência da casca de Eucalyptus grandis W. HILL ex MAIDEN no Rendimento e Qualidade do Carvão Vegetal.** 1989. 86p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ANDRADE, A. M.; CARVALHO, L. M. Potencialidades energéticas de oito espécies florestais do estado do Rio de Janeiro. **Floresta e Ambiente**, v.5, n.1, p.24-42, jan./dez., 1998.

ANDRADE, A. M., PASSOS, P. R. A., MARQUES, L. G. C., OLIVEIRA, L. B., VIDAURRE, G. B., ROCHA, J. D. S. Pirólise de resíduos do coco-da-baía (*cocos nucifera* linn) e análise do carvão vegetal. **Revista Árvore,** Viçosa, v.28, n.5, p.707-714, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7190:* projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

BARBOSA, J. A. **Avaliação qualitativa e quantitativa do carvão e dos condensados produzidos na carbonização da madeira de Algaroba *(Prosopis juliflora DC.).*** 1986. 47 p. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

BARCELLOS, D. C. **Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo.** 2007. 162 p. Tese (Pós-graduação em Ciência Florestal - Doctor Scientiae) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

BARRICHELO, L.E.G. & FOELKEL, C.E.B. Utilização de madeiras de essências florestais nativas na obtenção de celulose: bracatinga **(Mimosa scabrella),** embaúba (Cecropia sp.), caixeta **(Tabebuia cassinioides)** e boleira **(Joanesia princeps). IPEF,** Piracicaba, p. 43-56, 1975.

BARROSO, R. C. **Redução do teor de cinzas dos finos de carvão vegetal por concentração gravítica a seco.** 2007. 111p. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

BARTOSKECK, A. C. P. S. **Evolução da relação hipsométrica e da distribuição diamétrica em função dos fatores idade, sítio, e densidade inicial em bracatingais da região metropolitana de Curitiba.** 2000. 214 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)- Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

BRASIL - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Diretrizes de política de agroenergia 2006-2011**. Disponível em: <http://www.riosvivos.org.br/arquivos/147795697.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2010.

BRASIL - Ministério de Minas e Energia. **Balanço energético Nacional 2009:** ano base 2008. Rio de Janeiro. 276 p. 2009.

BRASIL - Ministério de Minas e Energia. **Balanço Energético Nacional 2011***:* ano base 2010: Resultados preliminares. Rio de Janeiro: EPE, 2011. Disponível em:< https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2011.pdf> Acesso em: 22 out. 2011.

BRASIL. Portaria IAP n°108, de 13 de junho de 2007. Estabelece os procedimentos administrativos para o manejo da bracatinga nas regiões de ocorrência da espécie no estado do Paraná, Curitiba. Disponível em:< http://www.ambienteduran.eng.br/system/files/publicador/LEGISLACAO/ESTADUAL/PORTARIA_2007_108.pdf> Acesso em: 23 nov. 2011.

BRASIL. Portaria IAP n°125 de 7 de agosto de 2009. Reconhece a Lista Oficial de Espécies Exóticas. Curitiba, Paraná. Disponível em: <C:\Users\Heloisa R\Desktop\Hovenia dulcis\Consulta de Atos Normativos 3.mht> Acesso em: 23 nov. 2011.

BRASIL. Portaria IAP n° 192 de 2 de dezembro de 2005. Normatiza o processo de eliminação e controle de espécies vegetais exóticas. Curitiba, Paraná. Disponível em:< C:\Users\Heloisa R\Desktop\Hovenia dulcis\2.mht> Acesso em: 23 nov. 2011.

BRASIL. Resolução conjunta IBAMA/SEMA/IAP n° 01, de 31 de maio de 2007. Curitiba, Paraná. Disponível em:< http://www.ambienteduran.eng.br/system/files/publicador/LEGISLACAO/ESTADUAL/RESOLUCAO_CONJUNTA_IBAMA_SEMA_IAP_001_2007.pdf> Acesso em: 23 nov. 2011.

BRIANE, D., DOAT, J. **Guide technique de la carbonisation.** Agence Française pour la Maîtrise de l'Énergie – Association Bois de Feu –Centre technique forestIer tropical, 1985. 180p.

BRITO, J. O. **Estudo das influências da temperatura, taxa de aquecimento e densidade da madeira de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus citriodora* sobre os resíduos sólidos da pirólise.** 1992. 88 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, SP.

BRITO, J. O. O uso energético da madeira. **Estudos avançados**. Piracicaba, n.21, v. 59, 9 p. 2007.

BRITO, J. O. **Queima ou combustão da madeira para fins energéticos**. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Departamento de Silvivultura, Piracicaba, 36 p. 1979.

BRITO, J. O. Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira. **Documentos florestais.** Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz. Piracicaba, 14p. 1990.

BRITO, J. O.; CINTRA, T. C. Madeira para energia no Brasil: Realidade, visão estratégica e demandas de ações. **Biomassa e energia**. v.1, n.2, p.157-163, 2004.

BRITO, J.O. & BARRICHELO, L.E.G. Características do eucalipto com combustível: Análise química imediata da madeira e da casca. **IPEF,** Piracicaba, p. 63-70, jun. 1978.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L. E. G. Comportamentos isolados da lignina e da celulose da madeira frente à carbonização**. Circular técnica** IPEF, Piracicaba, n. 28, p. 1-4, 1977.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L. E. G. Usos diretos e propriedades da madeira para geração de energia. **Circular Técnica.** IPEF, Piracicaba, n. 52, p. 1-7, 1979.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L. E. G. Considerações sobre a produção de carvão vegetal com madeiras da Amazônia. **Série Técnica.** IPEF, Piracicaba, v. 2, n. 5, p. 1-25, 1981.

BRITO, S. S. Tópicos atuais. Energia, economia, meio ambiente: as fontes renováveis de energia no Brasil. **Revista Brasileira de Energia**, v. l, n. 3, p. 15-22, 1990.

BRITO, J. O. Expressão da produção florestal em unidades energéticas. **Anais.** Sétimo Congresso Florestal Brasileiro. Curitiba, 19 – 24, set, 1993. v.3 p. 280-282.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G.; SEIXAS, F. Análise da Produção Energética e de Carvão Vegetal de Espécies de Eucalipto. **IPEF**, Piracicaba, n.23, p.53-56, abr.1983.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 157 p.

CARMO, J. S. **Propriedades Físicas e Químicas do carvão vegetal destinado a sederurgia e metalurgia.** 1988. (Monografia) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 1988.

CARVALHO, P. E. R. **Ecologia, silvicultura e usos da Uva-do-Japão**. Colombo: EMBRAPA- CNPFloresta, 1994. 24 p. (Circular Tecnica, 23).

CINTRA, T. C**. Avaliações energéticas de espécies florestais nativas plantadas na região do Médio Paranapanema, SP.** 2009. 85 p. Tese (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, SP.

COPEL. Companhia Paranaense de Energia. **Balanço Energético do Paraná 2009.** Sumário executivo ano base 2008. Disponível em: <http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2FC824D47B05308F650325740C00438020> Acesso em: 10 out. 2011.

COUTO, L. C., COUTO, L., WATZLAWICK, L. F., CÂMARA, D. Vias de valorização energética da biomassa. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 1, p.71-92, 2004.

COUTINHO, A. R. **Qualidade do Carvão Vegetal Correlacionada com as Características da Madeira de Eucalyptus saligna e Temperatura de Carbonização.** 1984. 76 p. Tese (Mestrado)- Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

COUTINHO, A. R.; FERRAZ, E. S. B. Determinação da friabilidade do carvão vegetal em função do diâmetro das árvores e temperatura de carbonização. **IPEF**, n.38, p.33-37, abr. 1988.

COTTA, A. M. G. **Qualidade do carvão vegetal para siderurgia.** 1996. (Monografia) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa- MG.

CUNHA, M. P. S. C.; PONTES, C. L. F.; CRUZ, I. A.; CABRAL, M. T. F. D.; CUNHA NETO, Z. B.; BARBOSA, A. P. R. Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras. In: 3° Encontro brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira: **Anais...** São Carlos, 1989 v.2, p.93-121.

DUMONT, R. La forêt – Source d' energie et d'adjectivée nouvelles. Masson.1980.

EMBRAPA. **Curso de manejo florestal sustentável:** Tópicos em manejo florestal sustentável, 1., 1997, Curitiba. Embrapa.

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Highlights on wood charcoal: 2004-2009** Disponível em: <http://faostat.fao.org/Portals/_Faostat/documents/pdf/Wood%20charcoal.pdf> Acesso em: 26 out 2011.

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Wood energy**. Disponível em:<http://www.fao.org/forestry/energy/en/> Acesso em: 26 out. 2011.

FARINHAQUE, R. Influência da umidade no poder calorífico da madeira de Bracatinga (*Mimosa scabrella, Benth.)* e aspectos gerais de combustão. **FUPEF**, Curitiba, Paraná, 1981, 14p.

GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. Teoria da carbonização da madeira. In: PENEDO, W. R. (Ed.) **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: CETEC, p. 27-41, 1982.

GUIMARÃES NETO, R. M.; PIMENTA, A. S.; SILVA, M. L.; SOARES, N. S.; VITAL, B. R.; SILVA, J. C. - Avaliação Econômica e Financeira de Projetos de Fornos dos tipos *CONTAINER* industrial e retangular de 40 estéreos. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.31, n.4, p.709-715, 2007.

IBGE. **Manual Técnico da vegetação brasileira.** Rio de Janeiro. 1992. 92 p. Disponível em: <http://www.labogef.iesa.ufg.br/labogef/arquivos/downloads/Manual_Tecnico_da_Vegetacao_Brasileira_n_48361.pdf> Acesso em: 01 nov 2011.

INSTITUO HÓRUS. **Uva-do-japão (*Hovenia dulcis* Thunb.)** Disponível em: < http: //www.institutohorus.org.br> Acesso em: 20 out. 2011.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. 17ª Conferência das Partes das Nações Unidas sobre o Clima (COP-17). Disponível em: <http://www.ecodesenvolvimento.org.br/posts/2011/novembro/climas-extremos-vao-piorar-devido-aquecimento-da> Acesso em: 21 mar. 2012.

KLEIN, R. M. Aspectos fitossociológicos da bracatinga (*Mimosa scabrella Benth*) In: SEMINÁRIO SOBRE ATUALIDADES E PERSPECTIVAS FLORESTAIS: BRACATINGA UMA ALTERNATIVA PARA REFLORESTAMENTO, v. 4. 1981. **Anais...** Curitiba: EMBRAPA- URPFCS, 1981. p. 145-148.

KLITZKE, R. J. **Avaliação do carvão da bracatinga (*Mimosa scabrella* Bentham) em função da idade, do teor de umidade da madeira e da temperatura final de carbonização.** 1998. 123 p. Dissertação (Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba – PR.

KLOCK, U. **Qualidade da madeira juvenil de *Pinus maximinoi* H. E. MOORE.** 2000. 324 p. Tese (Doutorado Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba-PR.

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

LAURENT, J. M. E.; PEDREIRA, M. R. R.; CARPANEZZI, O. T. B.; BITTENCOURT, S. M. **Melhoramento do Sistema Agroflorestal da Bracatinga**. 1990. 106p. EMATER, Curitiba, Paraná.

LIMA, E. A., SILVA, H. D., MAGALHÃES, W. L. E., LAVORANTI, O. J. Caracterização individual de árvores de *Eucalyptus benthamii* para uso energético. **Boletim de pesquisa e desenvolvimento 35.** Embrapa Florestas. Colombo – Paraná. 2007.

LISBÃO JÚNIOR, L. Bracatinga como fonte energética. In: SEMINÁRIO SOBRE ATUALIDADES E PERSPECTIVAS FLORESTAIS, 4.: bracatinga uma alternativa para reflorestamento, Curitiba, 1981. **Anais. . .** Curitiba, EMBRAPAURPFCS, 1981 p.133-43.

LORENZI, H. **Árvores Brasileiras:** Manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 2ª ed. Nova Odessa-SP, Instituto Plantarum, 2002. 368 p. v. 1 e 2.

MUNALULA, F.; MEINCKEN, M. An evaluation of South African fuelwood with regards to calorifi c value and environmental impact. **Biomass and Bioenergy**, Cambridge, v. 33, n. 3, p. 415-420, Mar. 2009.

MINEROPAR, **Geologia do Paraná.** Disponível em: <http://www.mineropar.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=106> Acesso em: 01 nov 2011.

MEIRA, A. M., **Diagnóstico sócio-ambiental e tecnológico da produção de carvão vegetal no município de Pedra Bela, estado de São Paulo**. 2002. 105 p. Tese (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba.

MOREIRA, C. S. **Contribuição ao estudo da eficiência de pequenos fornos na produção de carvão vegetal destinado a alto forno**. 1964. 110 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba.

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

OLIVEIRA, E. **Correlação entre parâmetros de qualidade da madeira e do carvão de Eucalypstus grandis (W. Hill ex-Maiden).** 1988. 47p. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG.

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

OLIVEIRA, J.B.; GOMES, P.A. & ALMEIDA, M.R.: Caracterização e otimização do processo de fabricação de carvão vegetal em fornos de alvenaria. In: CETEC. **Carvão vegetal.** Belo Horizonte. 1982. p. 64-102.

OLIVEIRA, J.B.; VIVACQUA FILHO, A.; MENDES, M.G.; GOMES, P. A. Caracterização e otimização do processo de fabricação de carvão vegetal em fornos de alvenaria. In: PENEDO, W.R. **Carvão Vegetal**. Belo Horizonte, MG, CETEC – Centro Tecnológico de Minas Gerais, p.63-102, 1982.

PEREIRA, J.C.D. & LAVORANTI, O.J. Comparação da qualidade da madeira de três procedências de *Mimosa scabrella* Benth. para fins energéticos. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Curitiba, (12):30-4, 1986.

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. 113 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 38).

PETROFF, G. & DO AT, J.: Pirolyse des bois tropicaus - Influence de la composition chimique de bois sur les produits de distillation. **Revue Bois et Forêts des tropique.** Nojent sur Marne/France. Centre Technique Forestier Tropical - CTFT. 177:51-64. Já./fev., 1978.

PHILIPP, P.; D'ALMEIDA, M. L. O. **Celulose e papel:** Tecnologia de fabricação da pasta celulósica. 2. ed. São Paulo: IPT, 1988.

PINHEIRO, P. C. C., SÉYE, O. Influência da temperatura final de carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. In: **Congresso anual da ABM**, 53., 1998, Belo Horizonte. p. 2032-2042.

PREFEITURA MUNICIPAL DE IRATI. **Localização geográfica.** Disponível em: <http://www.irati.pr.gov.br/municipio/localizacaogeografica.asp> Acesso em: 01 nov 2011.

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

RAMOS e PAULA, L. E., TRUGILHO, P. F. NAPOLI, A., BIANCHI, M. L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Revista Cerne**, v. 17, n. 2, p. 237-246, abr-jun, 2011.

RENDEIRO, G.; NOGUEIRA, M. F. M.; BRASIL, A. C. M.; CRUZ, D. O. .; GUERRA, D. R. S.; MACÊDO, E. N.; ICHIHARA, J. A**. Combustão e gaseificação de biomassa sólida:** Soluções energéticas para a Amazônia. Ed. 1. Brasília. 2008.

RIGATTO, P. A.; PEREIRA, J. C. D.; MATTOS, P. P.; SCHAITZA, E. G. **Características físicas, químicas e anatômicas da madeira de *Hovenia dulcis.*** Colombo: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA FLORESTAS (Comunicado Técnico nº66). Disponível em: < http: //WWW.cnpf.embrapa.br> Acesso em: 20 out. 2011.

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 dee cinco espécies lenhosas do cerrado**. 2008. 57 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília.

SCHUMACHER, M. V.; BRUN, E. J.; ILLANA, V. B.; DISSIUTA, S. I.; AGNE, T. L. Biomassa e nutrientes em um povoamento de *Hovenia dulcis* Thunb., plantado na FEPAGRO FLORESTAS, Santa Maria, RG. **Ciência Florestal**, jan-mar, v. 18. n. 1. p. 27-37. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RG. 2008.

SILVA, J. C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* HILL ex. MAIDEN, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira.** 2002. 160 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba-PR.

SILVA, D. A., TEIXEIRA, T. V. R., MAYER, S. L. S. Participação da dendroenergia na matriz energética do Paraná. In: XII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, v.1. 2010. **Anais...** Lavras. 25-28 jul. 9p.

SILVA, D. A., TRUGILHO, P. F. Comportamento dimensional da madeira de cerne e alburno utilizando-se a metodologia de análise de imagem submetida a diferentes temperaturas. **Revista Cerne**, v. 9, n. 1, p. 056-065, 2003.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himenea coubaril* L.). **Scientia Agrária**, v. 2, n. 1-2, 2001.

UHLIG, A. **Lenha e carvão vegetal no Brasil: balanço oferta-demanda e métodos para estimação do consumo.** 2008. 156p. Tese (Doutorado do Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia) – Universidade de São Paulo, SP.

VALVERDE, S. R. Aspectos de relevância econômica no fomento florestal a partir da percepção dos produtores rurais envolvidos, **Scientific Commons**, v. 21, n. 7, p. 1 - 24, 2006.

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**, Viçosa, n. 41, p.64-76, jan./dez. 1989.

VILAS BOAS, M. A.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; CARVALHO, A. M. M. L.; MARTINS, M. A. Efeito da temperatura de carbonização e dos residues de macaúba na produção de carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 481-490, set. 2010.

VITAL, B. R. Métodos para determinação da densidade da madeira. Viçosa, MG. Documento SIF. 21 p. 1984.

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