

DANIEL CAMARA BARCELLOS

CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO VEGETAL ATRAVÉS DO USO
DE ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2007

DANIEL CAMARA BARCELLOS

CARACTERIZAÇÃO DO CARVÃO VEGETAL ATRAVÉS DO USO
DE ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO

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

APROVADA: 26 de fevereiro de 2007

Prof. Ricardo Marius Della Lucia
(Co-Orientador)

Prof. Benedito Rocha Vital
(Co-Orientador)

Prof. José Tarcísio da Silva Oliveira

Prof. Ana Márcia M. L. Carvalho

Prof. José de Castro Silva
(Orientador)

Dedico esta tese a minha filha,
Samara Carvalho Barcellos
nascida em 11 de outubro de 2003.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Florestal, pela formação científica.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela concessão de bolsa de doutorado por dois anos.

Ao Professor José de Castro Silva, pela orientação e apoio dado no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Benedito Rocha Vital e Ricardo Marius Della Lucia, pelos conselhos e orientações.

Aos Professores José Tarcísio da Silva Oliveira e Ana Márcia Carvalho, pelas sugestões apresentadas.

à professora e amiga Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, pelo apoio e sugestões apresentadas.

Ao Eng. Christóvão Pereira Abrahão, pelas orientações, principalmente, nos assuntos relacionados à espectroscopia e análise estatística.

Ao Professor Alexandre Santos Pimenta, pela orientação no início do doutorado.

Ao professor Laércio Couto, pelo apoio dado.

Ao Engenheiro Florestal, Alessandro Francisco dos Santos, que colaborou na preparação e execução do experimento.

Ao funcionário do Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, José Aristeu da Silva, e funcionários do Laboratório de Propriedades da Madeira, Oswaldo, Gilberto, pela colaboração nos trabalhos.

Aos meus pais, Paulo Sérgio Alves Barcellos e Ilma Camara Barcellos, por todo apoio dado ao longo da minha vida e formação profissional.

As minhas cinco irmãs, Diana, Denise, Débora, Daphne e Deise e ao meu irmão caçula, Judá.

A todos que colaboraram, de maneira direta e indireta, com este trabalho.

BIOGRAFIA

DANIEL CAMARA BARCELLOS, filho de Paulo Sérgio Alves Barcellos e Ilma Camara Barcellos, nasceu em 24 de setembro de 1976, na cidade de Niterói Estado do Rio de Janeiro.

Em março de 1999, concluiu o curso de Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Viçosa.

Em fevereiro de 2000, concluiu o curso de Especialização em Fontes Alternativas de Energia, pela Universidade Federal de Lavras.

Em abril de 2002, concluiu o Programa de Pós-graduação, em nível de mestrado, em Ciência Florestal, na área de concentração Tecnologia da Madeira, pela Universidade Federal de Viçosa.

Em abril de 2002, iniciou o programa de pós-graduação em Ciência Florestal, em nível de doutorado, na área de concentração Tecnologia da Madeira, pela Universidade Federal de Viçosa.

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xiii
RESUMO.....	xviii
ABSTRACT.....	xx
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 O setor florestal no Brasil	4
2.2 Uso da madeira para energia no Brasil	5
2.3 Carvão vegetal.....	6
2.4 O Cerrado brasileiro e a produção de carvão vegetal	12
2.5 O gênero <i>Eucalyptus</i>	13
2.5.1 <i>Eucalyptus grandis</i>	14
2.5.2 <i>Eucalyptus cloeziana</i>	15
2.5.3 <i>Eucalyptus urophylla</i>	16
2.5.4 <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	17
2.5.5 “Eucaliptos clonados”	18
2.6 Madeiras provenientes de florestas nativas	19
2.6.1 <i>Caryocar brasiliense</i> (pequi).....	20
2.6.2 <i>Qualea grandiflora</i> (pau terra).	20
2.6.3 <i>Magonia pubescens</i> (tingui)	21

2.6.4	<i>Inga laurina</i> (ingá).....	21
2.6.5	<i>Bowdichia virgiloides</i> (sucupira)	22
2.6.6	<i>Piptadenia gonoacantha</i> (pau-jacaré)	22
2.6.7	<i>Dipteryx alata</i> (baru).....	22
2.7	Propriedades da madeira e sua influencia no carvão vegetal	23
2.7.1	Massa Específica da Madeira	23
2.7.2	Composição Química da Madeira	25
2.8	Efeito da temperatura na carbonização	28
2.9	Propriedades do carvão.....	30
2.9.1	Rendimento gravimétrico.....	30
2.9.2	Carbono fixo	30
2.9.3	Matérias voláteis.....	30
2.9.4	Cinzas.....	31
2.9.5	Massa específica aparente.....	32
2.9.6	Poder calorífico.....	33
2.10	Espectroscopia.....	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
3.1	Amostragem da madeira	42
3.2	Caracterização da madeira.....	43
3.3	Preparação das amostras para carbonização	43
3.3.1	Análise química imediata.....	44
3.3.1.1	Teor de matérias voláteis	44
3.3.1.2	Teor de cinzas.....	45
3.3.1.3	Teor de carbono fixo	45
3.3.2	Poder Calorífico do Carvão	46
3.3.3	Massa Específica Aparente do Carvão	46
3.3.4	Delineamento experimental.....	46
3.4	Registro dos espectros do carvão	47
3.5	Metodologia de configuração do software para aquisição dos espectros	48
3.5.1	Calibração do aparelho	49
3.5.2	Estimativa das propriedades do carvão com NIR	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1	Massa específica básica.....	53
4.2	Carbono fixo	54
4.3	Matérias Voláteis	57

4.4	Cinzas.....	59
4.5	Poder calorífico.....	61
4.6	Massa específica aparente do carvão.....	63
4.7	Rendimento gravimétrico do carvão.....	65
4.8	Umidade do carvão.....	68
4.9	Previsão de propriedades com a utilização de espectroscopia com infravermelho próximo.....	68
4.9.1	Estimativa do carbono fixo utilizando NIR.....	70
4.9.1.1	Média dos espectros na faixa entre 1500-2000 nm.....	70
4.9.1.1.1	Modelos de calibração por Espécie.....	71
4.9.1.2	Média dos espectros entre 1500-1600 nm.....	72
4.9.1.2.1	Modelos de Calibração por Espécie.....	74
4.9.1.3	Média dos espectros entre 1700-1800 nm.....	75
4.9.1.3.1	Calibração por espécie.....	76
4.9.1.4	Média dos espectros entre 1900-2000 nm.....	77
4.9.1.4.1	Modelos de Calibração por Espécie.....	78
4.9.2	Estimativa do teor de matérias voláteis utilizando NIR.....	80
4.9.2.1	Média dos espectros na faixa entre 1500-2000 nm.....	80
4.9.2.1.1	Modelos de Calibração por Espécie.....	81
4.9.2.2	Média dos espectros entre 1500-1600 nm.....	82
4.9.2.2.1	Modelos de Calibração por Espécie.....	83
4.9.2.3	Média dos espectros entre 1700-1800 nm.....	85
4.9.2.3.1	Modelos de Calibração por Espécie.....	86
4.9.2.4	Média dos espectros entre 1900-2000 nm.....	87
4.9.2.4.1	Calibração por espécie.....	88
4.9.3	Estimativa do Poder Calorífico Utilizando NIR.....	90
4.9.3.1	Média dos espectros entre 1500-2000 nm.....	90
4.9.3.1.1	Modelos de Calibração por Espécie.....	91
4.9.3.2	Média dos espectros entre 1500-1600 nm.....	92
4.9.3.2.1	Modelos de Calibração por Espécie.....	94
4.9.3.3	Média dos espectros entre 1700-1800 nm.....	95
4.9.3.3.1	Modelos de Calibração por Espécie.....	96
4.9.3.4	Média dos espectros entre 1900-2000 nm.....	97
4.9.3.4.1	Modelos de Calibração por Espécie.....	99
4.9.4	Previsão das cinzas e massa específica aparente do carvão utilizando NIR100	

5	CONCLUSÕES	101
6	RECOMENDAÇÕES	104
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
8	ANEXOS	117
8.1	Propriedades do carvão organizadas por temperatura final de carbonização.....	117
8.2	Propriedades do carvão organizadas por espécies.....	121
8.3	Análises de variância.....	127

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1 - Área anual reflorestada no Brasil por segmento, em hectare	5
Figura 2 – Cadeia Produtiva de Uso da Madeira em Toras	7
Figura 3 – Espectro Eletromagnético	36
Figura 4 – Diagrama esquemático de espectrômetro.....	38
Figura 5 – Esquema de realização das leituras nas amostras de carvão	48
Figura 6 – Médias das curvas espectrais por marcha de carbonização.....	69
Figura 7 – Calibração para o teor de carbono fixo do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 2000 nm).....	70
Figura 8 – Validação para o teor de carbono fixo do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 2000 nm).....	71
Figura 9 – Calibração para o teor de carbono fixo do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 1600 nm).....	73
Figura 10 – Validação para o teor de carbono fixo do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 1600 nm).....	73
Figura 11 – Calibração para o teor de carbono fixo do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1700 e 1800 nm).....	75
Figura 12 – Validação para o teor de carbono fixo do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1700 e 1800 nm).....	76
Figura 13 – Calibração para o teor de carbono fixo do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1900 e 2000 nm).....	78

Figura 14 – Validação para o teor de carbono fixo do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1900 e 2000 nm).....	78
Figura 15 – Calibração para o teor de matérias voláteis do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 2000 nm).....	80
Figura 16 – Validação para o teor de matérias voláteis do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 2000 nm).....	81
Figura 17 – Calibração para o teor de matérias voláteis do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 1600 nm).....	83
Figura 18 – Validação para o teor de matérias voláteis do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 1600 nm).....	83
Figura 19 – Calibração para o teor de matérias voláteis do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1700 e 1800 nm).....	85
Figura 20 – Validação para o teor de matérias voláteis do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1700 e 1800 nm).....	86
Figura 21 – Calibração para o teor de matérias voláteis do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1900 e 2000 nm).....	88
Figura 22 – Validação para o teor de matérias voláteis do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1900 e 2000 nm).....	88
Figura 23 – Calibração para poder calorífico do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 2000 nm).....	90
Figura 24 – Validação para poder calorífico do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 2000 nm).....	91
Figura 25 – Calibração para o poder calorífico do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 1600 nm).....	93
Figura 26 – Validação para poder calorífico do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 1600 nm).....	93
Figura 27 – Calibração para o poder calorífico do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1700 e 1800 nm).....	95
Figura 28 – Validação para poder calorífico do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1700 e 1800 nm).....	96
Figura 29 – Calibração para o poder calorífico do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1900 e 2000 nm).....	98
Figura 30 – Validação para o poder calorífico do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1900 e 2000 nm).....	98
Figura 31 – Calibração para o teor de cinzas do carvão para todas as espécies (média da	

faixa compreendida entre 1500 e 2000 nm).....	134
Figura 32 – Calibração para o teor de cinzas do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 1600 nm).....	134
Figura 33 – Calibração para o teor de cinzas do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1700 e 1800 nm).....	135
Figura 34 – Calibração para o teor de cinzas do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1900 e 2000 nm).....	135
Figura 35 – Calibração para massa específica aparente do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 2000 nm).....	136
Figura 36 – Calibração para massa específica aparente do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 1600 nm).....	136
Figura 37 – Calibração para massa específica aparente do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1700 e 1800 nm).....	137
Figura 38 – Calibração para massa específica aparente do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1900 e 2000 nm).....	137
Figura 39 – Médias das Curvas espectrais por espécie obtidas para marcha de carbonização “1”, temperatura final de 350 °C	138
Figura 40 – Médias das Curvas espectrais obtidas por espécie para marcha de carbonização “2”, temperatura final de 450 °C	139
Figura 41 – Médias das curvas espectrais por espécie obtidas para marcha de carbonização “3”, temperatura final de 550 °C.	140

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1 – Produção mundial de carvão vegetal (Ano de 2003).....	8
Tabela 2 - Histórico do consumo de carvão vegetal no Brasil (1.000 MDC). Período de 1993 a 2004.....	9
Tabela 3 - Histórico do consumo de carvão vegetal por estado no Brasil (1.000 MDC)	10
Tabela 4 – Características técnicas de diferentes tipos de biomassa em base seca	26
Tabela 5 - Características de algumas espécies de eucalipto na idade de 10,5 anos, plantados em espaçamento de 3,0 x 2,0 metros.....	27
Tabela 6 – Poder calorífico de alguns combustíveis	33
Tabela 7 - Poder Calorífico do Carvão Vegetal de <i>Eucalyptus grandis</i> em Função da Temperatura de Carbonização.....	34
Tabela 8 – Faixas de espectros eletromagnéticos	37
Tabela 9 – Marcha de carbonização para todas as espécies	44
Tabela 10 – Massa específica básica média (g/cm ³) da madeira de diferentes espécies nativas e de eucalipto.....	54
Tabela 11 – Valores médios do teor de carbono fixo em função da espécie	55
Tabela 12 – Valores médios do teor de carbono fixo em função da marcha de carbonização	56
Tabela 13 – Valores médios do teor de matérias voláteis em função da espécie.....	57
Tabela 14 – Valores médios do teor de matérias voláteis em função da marcha de carbonização	58

Tabela 15 – Valores médios para o teor de cinzas (%) do carvão em função da espécie....	59
Tabela 16 – Valores médios para poder calorífico (kcal/kg) do carvão em função da espécie	61
Tabela 17 – Valores médios para poder calorífico (kcal/kg) do carvão em função da marcha de carbonização	62
Tabela 18 – Valores médios para massa específica aparente (g/cm^3) do carvão em função da espécie	64
Tabela 19 – Valores médios do rendimento gravimétrico do carvão em função da espécie.	66
Tabela 20 – Valores médios do rendimento gravimétrico em função da marcha de carbonização	68
Tabela 21 – Valores médios de umidade do carvão em função da marcha de carbonização	68
Tabela 22 – Modelos, constantes (a,b), erro padrão da calibração (Epc), coeficiente de correlação da calibração (Rc), erro padrão da validação (Epv), coeficiente de correlação da validação (Rp) e erro padrão da predição (Epp) para o carbono fixo na faixa de 1500-2000 nm.....	72
Tabela 23 – Modelos, constantes (a,b), erro padrão da calibração (Epc), coeficiente de correlação da calibração (Rc), erro padrão da validação (Epv), coeficiente de correlação da validação (Rp) e erro padrão da predição (Epp) para o carbono fixo na faixa de 1500-1600 nm.....	74
Tabela 24 – Modelos, constantes (a,b), erro padrão da calibração (Epc), coeficiente de correlação da calibração (Rc), erro padrão da validação (Epv), coeficiente de correlação da validação (Rp) e erro padrão da predição (Epp) para o carbono fixo na faixa de 1700-1800 nm.....	77
Tabela 25 – Modelos, constantes (a,b), erro padrão da calibração (Epc), coeficiente de correlação da calibração (Rc), erro padrão da validação (Epv), coeficiente de correlação da validação (Rp) e erro padrão da predição (Epp) para o carbono fixo na faixa de 1900-2000 nm.....	79
Tabela 26 – Modelos, constantes (a,b), erro padrão da calibração (Epc), coeficiente de correlação da calibração (Rc), erro padrão da validação (Epv), coeficiente de correlação da validação (Rp) e erro padrão da predição (Epp) para o teor de matérias voláteis na faixa de 1500-2000 nm.....	82
Tabela 27 – Modelos, constantes (a,b), erro padrão da calibração (Epc), coeficiente de correlação da calibração (Rc), erro padrão da validação (Epv), coeficiente de correlação da validação (Rp) e erro padrão da predição (Epp) para o teor de matérias voláteis na	

faixa de 1500-1600 nm.....	84
Tabela 28 – Modelos, constantes (a,b), erro padrão da calibração (Epc), coeficiente de correlação da calibração (Rc), erro padrão da validação (Epv), coeficiente de correlação da validação (Rp) e erro padrão da predição (Epp) para o teor de matérias voláteis na faixa de 1700-1800 nm.....	87
Tabela 29 – Modelos, constantes (a,b), erro padrão da calibração (Epc), coeficiente de correlação da calibração (Rc), erro padrão da validação (Epv), coeficiente de correlação da validação (Rp) e erro padrão da predição (Epp) para o teor de matérias voláteis na faixa de 1900-2000 nm.....	89
Tabela 30 – Modelos, constantes (a,b), erro padrão da calibração (Epc), coeficiente de correlação da calibração (Rc), erro padrão da validação (Epv), coeficiente de correlação da validação (Rp) e erro padrão da predição (Epp) para o poder calorífico na faixa de 1500-2000 nm	92
Tabela 31 – Modelos, constantes (a,b), erro padrão da calibração (Epc), coeficiente de correlação da calibração (Rc), erro padrão da validação (Epv), coeficiente de correlação da validação (Rp) e erro padrão da predição (Epp) para o poder calorífico na faixa de 1500-1600 nm.	94
Tabela 32 – Modelos, constantes (a,b), erro padrão da calibração (Epc), coeficiente de correlação da calibração (Rc), erro padrão da validação (Epv), coeficiente de correlação da validação (Rp) e erro padrão da predição (Epp) para o poder calorífico na faixa de 1700-1800 nm	97
Tabela 33 – Modelos, constantes (a,b), erro padrão da calibração (Epc), coeficiente de correlação da calibração (Rc), erro padrão da validação (Epv), coeficiente de correlação da validação (Rp) e erro padrão da predição (Epp) para o poder calorífico na faixa de 1900-2000 nm.	99
Tabela 34 – Valores médios do teor de carbono fixo do carvão para as diferentes espécies em função da temperatura final de carbonização	117
Tabela 35 – Valores médios do teor de matérias voláteis do carvão para as diferentes espécies em função da temperatura final de carbonização	118
Tabela 36 – Valores médios do teor de cinzas (%) do carvão para as diferentes espécies em função da temperatura final de carbonização	118
Tabela 37 – Valores médios do poder calorífico do carvão (kcal/kg) para as diferentes espécies em função da temperatura final de carbonização	119
Tabela 38 –Valores médios da massa específica aparente do carvão (kcal/kg) para as diferentes espécies em função da temperatura final de carbonização	119

Tabela 39 – Valores médios do rendimento gravimétrico do carvão, base seca (%) para as diferentes espécies em função da temperatura final de carbonização	120
Tabela 40 –Valores médios da umidade do carvão (%) para as diferentes espécies em função da temperatura final de carbonização	120
Tabela 41 – Média e desvio padrão das propriedades do carvão de <i>Eucalyptus grandis</i> para os diferentes tratamentos térmicos aplicados.	121
Tabela 42 – Média e desvio padrão das propriedades do carvão de <i>Eucalyptus cloeziana</i> para os diferentes tratamentos térmicos aplicados.	121
Tabela 43 – Média e desvio padrão das propriedades do carvão de <i>Eucalyptus urophylla</i> para os diferentes tratamentos térmicos aplicados.	122
Tabela 44 – Média e desvio padrão das propriedades do carvão de <i>Eucalyptus camaldulensis</i> para os diferentes tratamentos térmicos aplicados.	122
Tabela 45 – Média e desvio padrão das propriedades do carvão de <i>Eucalyptus urophylla</i> clonado para os diferentes tratamentos térmicos aplicados.	123
Tabela 46 – Média e desvio padrão das propriedades do carvão de <i>Caryocar brasilense</i> para os diferentes tratamentos térmicos aplicados.	123
Tabela 47 – Média e desvio padrão das propriedades do carvão de <i>Qualea grandiflora</i> para os diferentes tratamentos térmicos aplicados.	124
Tabela 48 – Média e desvio padrão das propriedades do carvão de <i>Magonia pubescens</i> para os diferentes tratamentos térmicos aplicados.	124
Tabela 49 – Média e desvio padrão das propriedades do carvão de <i>Inga laurina</i> para os diferentes tratamentos térmicos aplicados.	125
Tabela 50 – Média e desvio padrão das propriedades do carvão de <i>Bowdichia virgiloides</i> para os diferentes tratamentos térmicos aplicados.	125
Tabela 51 – Média e desvio padrão das propriedades do carvão de <i>Piptadenia gonoacantha</i> para os diferentes tratamentos térmicos aplicados.	126
Tabela 52 – Média e desvio padrão das propriedades do carvão de <i>Dipteryx alata</i> para os diferentes tratamentos térmicos aplicados.	126
Tabela 53 - ANOVA para umidade do carvão	127
Tabela 54 - ANOVA para matérias voláteis.....	127
Tabela 55 - ANOVA para cinzas.....	128
Tabela 56 - ANOVA para carbono fixo	128
Tabela 57 - ANOVA para poder calorífico	129
Tabela 58 - ANOVA para rendimento base seca	129
Tabela 59 - ANOVA para densidade aparente do carvão	130

Tabela 60 - ANOVA para umidade do carvão	130
Tabela 61 – Valores médios para o teor de cizas por temperatura final de carbonização..	131
Tabela 62 – valores médios de umidade do carvão por espécie	132
Tabela 63 – Valores médios da massa específica aparente do carvão por marcha de carbonização	132
Tabela 64 – Modelos testados na calibração/validação dos modelos.....	133

RESUMO

BARCELLOS, Daniel Camara, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2007. **Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo.** Orientador: José de Castro Silva. Co-Orientadores: Benedito Rocha Vital e Ricardo Marius Della Lucia.

O presente trabalho objetivou a avaliação da espectroscopia no infravermelho próximo na determinação das propriedades do carvão vegetal, oriundo da madeira de sete espécies nativas e cinco espécies do gênero *Eucalyptus*. O carvão foi obtido empregando-se métodos convencionais de laboratório, com três combinações de tempo e temperaturas finais. As suas propriedades foram correlacionadas com os espectros obtidos no infravermelho-próximo. Destacam-se a faixa compreendida entre 1500-2000 nm que, posteriormente, foi subdividida em outras três faixas menores: 1500-1600, 1700-1800 e 1900-2000 nm. Todas essas faixas apresentaram correlação com os teores de carbono fixo, matérias voláteis e poder calorífico dos carvões. A faixa 1900- 2000 nm apresentou os maiores coeficientes de correlação com as propriedades do carvão, em todas as situações analisadas. Nessa faixa, obtiveram-se os coeficientes de correlação de 0,83; 0,84; e 0,71, respectivamente, para determinação do teor de carbono fixo, matérias voláteis e poder calorífico, para as doze espécies estudadas. Analisando individualmente as espécies, os maiores coeficientes de correlação foram encontrados no clone de *Eucalyptus urophylla*, com 0,97; 0,96 e 0,91, respectivamente, para os teores de carbono fixo, matérias voláteis

e poder calorífico. Concluiu-se que é possível prever os teores de carbono fixo, matérias voláteis e poder calorífico do carvão de uma determinada madeira a partir da espectroscopia, utilizando pequenas faixas de comprimento de onda na região do infravermelho próximo.

ABSTRACT

BARCELLOS, Daniel Camara, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, February of 2007. **Charcoal characterization using the infra red spectroscopy**. Adviser: José de Castro Silva. Co-advisers: Benedito Rocha Vital and Ricardo Marius Della Lucia.

The present work intended to evaluate the use of near infrared spectroscopy in the description of properties of charcoal produced from the wood of seven native Brazilian species and five species of the genus *Eucalyptus*. The charcoal was obtained using conventional laboratory methods in three combinations of time and final temperature and its properties were correlated with its spectra. The band between 1500-2000 nm was found promising and was, later, subdivided into three lesser bands: 1500-1600, 1700-1800 and 1900-2000 nm. All those bands are correlated with the following properties of the charcoal analyzed: fixed carbon, volatile substances and heat value. The band from 1900 to 2000 nm presented the largest correlation coefficients with the properties of the charcoal, in all situations. In that band, the coefficients of correlation reached 0.83; 0.84; and 0.71, respectively, in the determination of fixed carbon, volatile substances and heat value for the twelve species studied. When individual species were analyzed, the largest correlation coefficients were found for a clone of *Eucalyptus urophylla*, with 0.97; 0.96 and 0.91, respectively, for fixed carbon, volatile substances and for heat value. It was

concluded that is possible to predict those charcoal properties of a certain wood sample by spectroscopy, using small wavelength bands in the area of the near infrared.

1 INTRODUÇÃO

O carvão vegetal é um insumo de grande importância na produção de ferro e ligas metálicas. O Brasil é o maior produtor e consumidor mundial de carvão vegetal, respondendo por quase 1/3 de toda produção, além de ser o único país a manter um parque industrial siderúrgico, tendo como base essa fonte de energia renovável.

Historicamente, a madeira proveniente de florestas nativas foi à matéria-prima básica para a produção do carvão vegetal para atender, principalmente, a demanda da indústria siderúrgica. A partir da década de 1960, surgiu o Programa de Incentivos Fiscais ao Florestamento e Reflorestamento, culminando com o surgimento de extensas áreas de florestas plantadas em todo o País, principalmente no Estado de Minas Gerais. A legislação florestal e ambiental mais rigorosa, intensificação da fiscalização e aumento da consciência ecológica, entre outros fatores, provocaram uma diminuição da participação da madeira de matas nativas na produção de carvão vegetal. Mesmo assim, atualmente, a maior parte do carvão vegetal foi proveniente de florestas nativas, trazendo transtornos e desequilíbrios ambientais; cerca de 52% da produção de carvão vegetal no Brasil foi proveniente do Bioma Cerrado (AMS,2005a).

A qualidade do carvão vegetal depende basicamente da matéria-prima e do processo de produção utilizado. Quando se fala em carvão vegetal, devem-se

considerar suas propriedades, a fim de se controlar a qualidade do produto final. As empresas consumidoras de carvão vegetal, quase sempre, têm a necessidade de controlar a qualidade do produto que compram ou produzem; os métodos atuais de identificação e avaliação são lentos e, geralmente, implicam em custos adicionais. Tais métodos poderiam ser otimizados e usados com maior eficiência e rapidez quando se utilizam métodos óticos para caracterizar e quantificar as variações internas do carvão.

O desenvolvimento de pesquisas e tecnologias voltadas para a determinação das propriedades do carvão é muito importante para o setor, face a sua importância como insumo energético na indústria siderúrgica e diversos outros segmentos industriais, inclusive na substituição dos derivados do petróleo e outras destinações industriais e rurais (MEIRA, 2002).

Com muita frequência, têm-se utilizado, mundialmente, os métodos óticos, em especial, a espectroscopia, para determinação de análises qualitativas e quantitativas de insumos em laboratórios, indústrias e processos, para os mais diversos segmentos. Não se tem conhecimento da técnica proposta para a caracterização do carvão vegetal. Propõe-se a realização deste trabalho face à inexistência de informações e à indisponibilidade de métodos e análises quantitativas e qualitativas, rápidas e seguras, do carvão vegetal. Espera-se que seus resultados se apresentem como uma ferramenta para empresas produtoras de carvão.

OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi estudar as propriedades do carvão vegetal produzido a partir de doze espécies florestais (nativas e do gênero *Eucalyptus*), a partir do uso da espectroscopia no infravermelho próximo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Entre os objetivos específicos destacam-se:

1. Avaliação do rendimento e das propriedades físico-químicas do carvão vegetal, produzido a partir de doze diferentes espécies de madeira.
2. Avaliar três marchas de carbonização.

3. Avaliar diferentes espectros, correspondentes a faixas do infravermelho próximo.
4. Correlacionar os espectros obtidos com as propriedades do carvão, através de análises estatísticas, possibilitando a predição rápida de suas propriedades.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O setor florestal no Brasil

O setor florestal tem uma significativa contribuição na economia do País, uma vez que contribui com aproximadamente 5,0 % do PIB e 8 % das exportações nacionais. Além disso, gera 1,6 milhão de empregos diretos, 5,6 milhões de empregos indiretos e uma receita anual de R\$ 20 bilhões, recolhendo anualmente R\$ 4,6 bilhões de impostos (AMS, 2005b).

Em 2005, o setor florestal brasileiro contava com 3,4 milhões de hectares de florestas plantadas com espécies do gênero *Eucalyptus*; o Estado de Minas Gerais contava com a maior área plantada, com 1,1 milhões de hectares (ABRAF, 2006).

Durante a segunda metade da década de 1990, a área anual de florestas plantadas para carvão vegetal manteve-se praticamente constante. A partir de então, impulsionada principalmente pela alta do preço desse insumo, a área plantada passou a crescer. Em 2003, o segmento de carvão vegetal foi o responsável pela implantação de oitenta e três mil hectares de florestas com eucalipto (Figura 1).

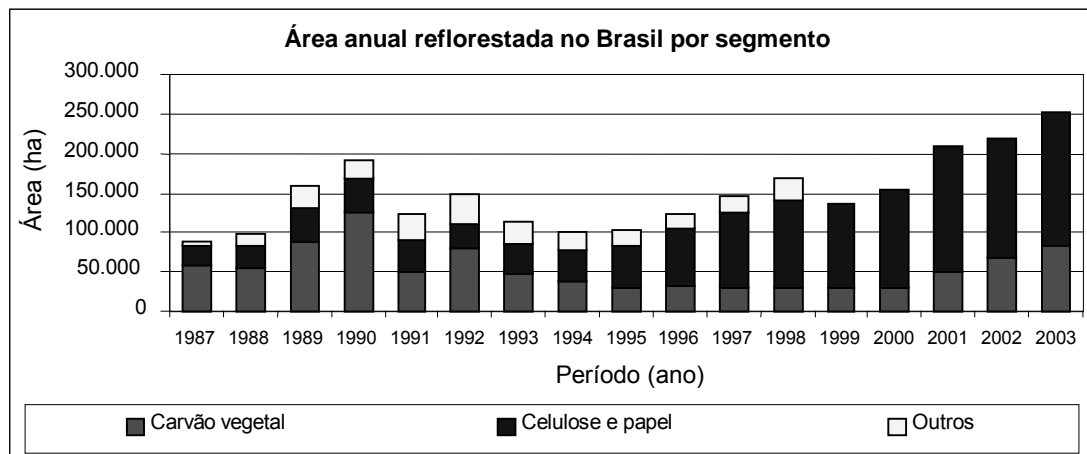


Figura 1 - Área anual reflorestada no Brasil por segmento, em hectare
 Fonte: (FONTES 2005 citando ABRACAVE (1996; 2003a) e BRACELPA (2004)).

O potencial representado pelo eucalipto, como produtor de madeira de qualidade, é justificado pelas condições ambientais favoráveis e conhecimentos silviculturais suficientes para dar ao país vantagem comparativa na produção de matéria-prima oriunda de florestas renováveis (SILVA, 2002).

2.2 Uso da madeira para energia no Brasil

O uso da madeira plantada para fins energéticos no País remonta ao final do século XIX, quando a Cia Paulista de Estradas de Ferro plantou árvores de rápido crescimento, a fim de suprir as locomotivas com madeira para geração de vapor (MAGALHÃES, 2001). Em 1937, iniciaram-se, de maneira pioneira e intensiva, os plantios de eucalipto para produção de carvão vegetal, com fins siderúrgicos, a fim de suprir os altos-fornos (MATARELLI et al, 2001). Durante a vigência dos incentivos fiscais, no período de 1966 a 1985, foram plantados cerca de seis milhões de hectares, principalmente no Estado de Minas Gerais, sendo a maioria do gênero *Eucalyptus*. Aos poucos, os plantios de eucalipto reverteram o quadro de produção de carvão vegetal, que passou a contar com florestas plantadas, substituindo, em grande parte, as florestas nativas (ASSIS, 2001).

Segundo Brito e Cintra (2004), existem quatro grandes setores que consomem madeira com fins energéticos no Brasil:

- O setor de transformação é o que mais consome madeira, cerca de 39% da madeira destinada para energia. Este setor é representado,

principalmente, pelo carvão vegetal, destinado ao parque industrial siderúrgico e metalúrgico; grande parte da madeira utilizada provém de florestas plantadas do gênero *Eucalyptus*.

- O setor residencial é, também, grande consumidor de madeira para energia, consumindo cerca de 32% da madeira. A madeira é usada para cocção de alimentos e, em menor escala, para aquecimento domiciliar. Estima-se que cerca de trinta milhões de pessoas no País são dependentes da madeira como fonte energética domiciliar.
- O setor industrial é bastante consumidor de madeira para energia, representando 21% do total. Envolve os empreendimentos industriais do ramo do cimento, químico, alimentos, bebidas, papel e celulose e cerâmico.
- O setor agrícola se destaca como grande consumidor de madeira para energia, representando cerca de 6% do total. A secagem de produtos agrícolas, principalmente grãos é a principal atividade consumidora de madeira. Embora esse percentual pareça baixo, tal volume chega a ser duas vezes maior do que o utilizado na produção brasileira de chapas de madeira e similares.

Em 2003, a lenha e o carvão vegetal, apresentaram importante participação na matriz energética brasileira, ocupando a quarta posição, com 12,9% da oferta interna de energia, seguidos do petróleo e derivados (40,2%), hidráulica e eletricidade (14,6%) e produtos da cana (13,4%) (BRASIL, 2004). Com relação à matriz energética do Estado de Minas Gerais, a lenha e os derivados ocuparam a primeira posição (32,9%), em 2003, seguidos de petróleo, gás natural e derivados (30,7%), carvão mineral e derivados (14,4%), energia hidráulica (13,9%) e outras fontes (8,1%) (CEMIG, 2004).

2.3 Carvão vegetal

Para o Brasil, o carvão vegetal é uma fonte energética de grande importância, pelo seu caráter renovável e pela sua importância histórica e econômica. Este insumo energético é, em grande parte, utilizado pelo setor industrial

brasileiro, principalmente nos segmentos siderúrgico e metalúrgico que o utilizam como termo-redutor de minério (AMS, 2005b; FONTES, 2005). O Estado de Minas Gerais se destaca como o maior consumidor e produtor nacional (PINHEIRO e SAMPAIO, 2001) e mais de 80% da produção de carvão no Brasil são destinados ao setor siderúrgico (AMS, 2005a).

O carvão vegetal destinado ao mercado doméstico e de exportação, na forma de “carvão para churrasco”, é direcionado aos supermercados, churrascarias e restaurantes e representam componente importante do setor.

O carvão vegetal se enquadra numa cadeia produtiva maior, a cadeia produtiva da madeira, envolvendo outros segmentos de usos da madeira, conforme pode ser observado na *Figura 2*.

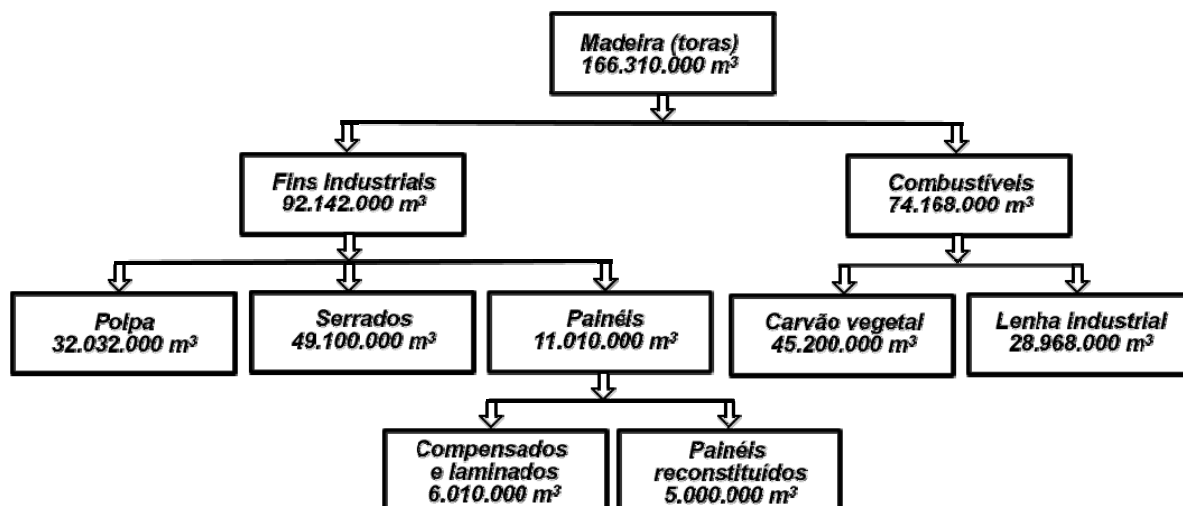


Figura 2 – Cadeia Produtiva de Uso da Madeira em Toras

Fonte: Adaptado de SBS, 2001

O Brasil se destaca no cenário mundial como o maior produtor e consumidor mundial de carvão vegetal. É importante salientar que a produção é quase toda destinada ao mercado interno. A Tabela 1 apresenta os principais países produtores, destacando o Brasil com 29% do carvão vegetal no mundo. Sua produção é quase quatro vezes maior que o segundo maior produtor, a Nigéria. Em 2003, apenas os cinco principais países produtores totalizaram 51,70% da produção mundial.

Tabela 1 – Produção mundial de carvão vegetal (Ano de 2003)

Países	Produção (toneladas métricas)	Produção (%)
Brasil	12.613.514	29,2
Nigéria	3.349.105	7,7
Etiópia	3.131.631	7,2
Índia	1.696.300	3,9
Congo	1.609.310	3,7
Todos os outros países	21.008026	48,3
Total	43.494.879	100%

Fonte: FAO (2004), FONTES (2005)

A siderurgia a carvão vegetal no Brasil ganhou impulso a partir do século XIX. O carvão vegetal foi o primeiro combustível utilizado em altos-fornos siderúrgicos e seu uso tem persistido em países onde algumas condições básicas (clima favorável, grande extensão de terra com vocação florestal, conhecimento silvicultural etc.) são satisfeitas. Desta forma, o carvão vegetal representa uma excelente matéria-prima para a siderurgia brasileira, devido ao seu comportamento como combustível e redutor, elevado grau de pureza e baixo custo de produção, quando comparado ao carvão mineral ou outros elementos termo-redutores (MACHADO e ANDRADE, 2004).

Atualmente, o Brasil é o único país no mundo onde o carvão vegetal tem uma aplicação industrial em grande escala. Aproximadamente, 40% do ferro-gusa e das ligas metálicas produzidas no país utilizam o carvão vegetal como combustível e redutor. As exportações brasileiras de ferro-gusa, também, apresentam crescimento significativo devido à boa qualidade do produto nacional e ao ganho de competitividade da siderurgia no País. Atualmente, o Brasil é o maior exportador mundial de ferro-gusa, seguido pela Rússia, China, Ucrânia e Índia. Os Estados Unidos se destacam como o maior importador de ferro-gusa produzido no Brasil. As siderúrgicas americanas possuem os mais altos custos de produção do mundo, isso se deve aos elevados custos previdenciários e alto grau de obsolescência das siderúrgicas integradas, o que reduz a sua competitividade (VALVERDE et al. 2004). Em 1993, as importações americanas relativas ao ferro-gusa do Brasil correspondiam a 392.000 toneladas; em 2002, esse valor aumentou para 3.623.608 toneladas (VALVERDE et al. 2004), estimulando, em contrapartida, um aumento no

consumo do carvão vegetal.

O setor siderúrgico é um setor bastante sólido e em expansão, gerador de empregos, renda e impostos. Em 2002, existiam no Brasil cento e onze altos-fornos a carvão vegetal que produziram mais de nove milhões de toneladas de ferro-gusa (TIENNE et al., 2004).

Mostrando uma evolução significativa quanto ao atendimento da demanda por ações que visam à sustentabilidade, o uso do carvão vegetal, proveniente de madeira de florestas plantadas, apresentou um franco crescimento até o ano 2000. Se, em 1990, este valor era de apenas 30%, em 2000 ele representava mais de 70% do volume consumido (BRITO e CINTRA, 2004). No entanto, apesar do rigor da legislação e da fiscalização, esta situação se reverteu a partir de 2000, em que vem ocorrendo um decréscimo do uso de florestas plantadas aumentando-se a utilização de florestas nativas e, atualmente, mais da metade da produção de carvão é feito com madeira proveniente dessas florestas. A Tabela 2 apresenta a origem da madeira que foi convertida em carvão.

Tabela 2 - Histórico do consumo de carvão vegetal no Brasil (1.000 MDC). Período de 1993 a 2004

Ano	Carvão Vegetal Origem Florestas Nativas		Carvão Vegetal Origem Florestas Plantadas		TOTAL	
	Consumo	Índice (%)	Consumo	Índice (%)	Consumo	Índice
1993	17.923	56,5	13.777	43,5	31.700	100
1994	15.180	46,0	17.820	54,0	33.000	100
1995	14.920	48,0	16.164	52,0	31.084	100
1996	7.800	30,0	18.200	70,0	26.000	100
1997	5.800	25,0	17.800	75,0	23.600	100
1998	8.600	32,6	17.800	67,4	26.400	100
1999	8.070	30,0	18.380	70,0	26.900	100
2000	7.500	29,5	17.900	70,5	25.400	100
2001	9.115	34,8	17.105	65,2	26.220	100
2002	9.793	36,5	17.027	63,5	26.820	100
2003	12.216	41,8	16.986	58,2	29.202	100
2004	19.490	52,2	17.430	47,8	36.920	100

Fonte : AMS (2005a)

Do carvão produzido, proveniente de madeira oriunda de reflorestamentos

(47,8% da produção nacional), destaca-se o gênero *Eucalyptus*. Destacam-se as quais podemos citar as espécies *Eucalyptus grandis*, *E. urophylla*, *E. cloeziana* e *E. camaldulensis*. A maioria do carvão produzido, no entanto, provém de madeiras oriundas de florestas nativas (52,2% da produção nacional), principalmente do bioma Cerrado. As principais madeiras de Cerrado, que tem elevada importância e que são utilizadas para se produzir carvão vegetal, são o pequi (*Caryocar brasiliense*), pau-terra (*Qualea grandiflora*), baru (*Dipteryx alata*), pau jacaré (*Piptadenia gonoacantha*), entre outras espécies bastante comuns neste Bioma.

Atualmente, as pressões ambientais têm dado um novo alento e vigor à produção de aço a partir do carvão vegetal; percebe-se uma nova visão e novos mercados sob a ótica de florestas sustentáveis e gerando o “aço verde” (PINHEIRO e SAMPAIO, 2001). Esse insumo energético viabilizou o estabelecimento do parque siderúrgico mineiro, devido ao baixo custo da madeira e mão-de-obra, em todas as fases da produção, bem como da alta pureza do produto final. O Estado possui o maior parque siderúrgico a carvão vegetal do mundo. O Estado de Minas Gerais é o maior produtor de carvão vegetal do País, responsável pela produção de 65% do carvão vegetal nacional, e também o maior consumidor, utilizando 80% desse total, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Histórico do consumo de carvão vegetal por estado no Brasil (1.000 MDC)

Ano	Estado								Total
	MG	SP	BA	RJ	ES	MS	MA/PA	Outros	
1993	25.360	353	963	242	1.006			3.776	31.700
1994	26.513	330	747	682	768			3.960	33.000
1995	23.609	300	615	674	859			5.027	31.084
1996	19.500	330	520	550	960			4.190	26.050
1997	17.271	330	663	413	972			3.951	23.600
1998	16.800	1.000	850	500	800	400	4.050	2.000	26.400
1999	16.500	825	902	781	847	275	4.400	2.370	26.900
2000	15.880	800	650	540	1.150	440	4.000	1.940	25.400
2001	17.120	760	470	365	1.100	315	5.000	1.090	26.220
2002	17.214	890	613	333	1.092	328	5.650	700	26.820
2003	19.470	890	630	402	1.300	340	5.470	700	29.202

Fonte: Adaptado de FONTES (2005)

A carbonização é um processo onde a madeira é submetida ao tratamento térmico, sob temperaturas elevadas, numa atmosfera redutora controlada (ALMEIDA e REZENDE, 1982). As propriedades do carvão vegetal dependem, basicamente, da matéria-prima e do processo de carbonização. As possíveis variações provocam uma alteração físico-química no carvão, que pode ser detectada por métodos analíticos e óticos.

O conceito de qualidade de um determinado produto tem sido uma das questões mais discutidas dentro do moderno sistema produtivo industrial mundial, resultando em profundas transformações na filosofia de trabalho das empresas. Há uma crescente tomada de consciência de que melhorias contínuas na qualidade são freqüentemente necessárias para se atingir e assegurar um bom desempenho econômico (MEIRA, 2002).

Diversos são os fatores que influenciam a qualidade do carvão vegetal. De forma geral, a qualidade desse produto depende da espécie da madeira, tamanho das peças e método de carbonização.

A espécie da madeira é muito importante, quanto à sua composição física e química. A densidade do carvão está diretamente relacionada com a densidade da madeira de origem. A densidade é uma característica fundamental no carvão vegetal, pois, quanto mais denso, maior é a quantidade de energia por unidade de volume; conseqüentemente, melhor será o aproveitamento do espaço interno do reator. As dimensões da madeira também têm influência no processo; a madeira de menores dimensões produz carvão mais duro e mais denso que aquela de grandes dimensões, porque tem menos tendência a estourar durante a carbonização e as gretas produzidas pela contração são menos numerosas. A carbonização lenta quebra menos o carvão que aquele produzido em métodos rápidos. A temperatura também é outro fator muito importante porque influencia no rendimento gravimétrico e no teor de carbono fixo do carvão (VALE et al.,2001).

São poucas as normas de procedimento de controle de qualidade de carvão vegetal, objetivando a padronização de tais procedimentos. Grande parte das normas existentes foi adaptada de normas para carvão mineral. É comum verificar discrepâncias bem acentuadas entre ensaios realizadas por empresas ou

instituições. Na maioria dos casos, as diferenças se devem à utilização de procedimentos não normatizados apesar da existência das normas da ABNT e ASTM (OLIVEIRA et al., 1982c).

Apesar de o carvão vegetal constituir-se em uma matéria-prima de grande importância na siderurgia brasileira, muito pouco se fez para a padronização dos testes que permitissem distinguir carvões com diferentes características e, ainda, correlacionar as suas propriedades e a sua performance nos aparelhos de redução (OLIVEIRA et al., 1982a).

Na década de 1980, Oliveira et al. (1982b) verificaram que a maior parte da produção brasileira de carvão vegetal era obtida através de fornos de alvenaria, tipo “rabo-quente” e de superfície. Passadas quase três décadas, as condições da produção de carvão vegetal praticamente não mudaram e a base tecnológica de produção de carvão vegetal continua sendo a mesma, rudimentar e de baixo rendimento. Ao contrário do que aconteceu nos países industrializados, o uso industrial do carvão vegetal, no Brasil, continua sendo largamente praticado, em função do elevado potencial de produção de matéria-prima de origem florestal como é o caso da madeira de eucalipto (MEIRA, 2002) e do “estoque” de matéria-prima de origem nativa presente no Cerrado brasileiro.

2.4 O Cerrado brasileiro e a produção de carvão vegetal

Grande parte do carvão produzido no Brasil é proveniente de madeira do bioma Cerrado, sendo considerado como o principal fornecedor de madeira nativa para o segmento, devido à proximidade das fontes de consumo, concentradas, em sua maioria, na Região Sudeste. Além de Minas Gerais, outros Estados vêm se destacando na produção de carvão vegetal com madeira de floresta nativa, como Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás e Bahia (MEIRA, 2002).

O Cerrado brasileiro é considerado o segundo maior bioma do Brasil, superado apenas pela Floresta Amazônica, com extensão original de 1.783.169 Km², ocupando 21% da área do País. Consiste principalmente de árvores e mata de savana e, ocasionalmente, tem uma estrutura de floresta. Esse ecossistema é considerado uma das regiões mais ricas de toda a savana tropical e com altos níveis

de endemismo, pela riqueza de sua flora. Está localizado, basicamente, no Planalto Central do Brasil e é caracterizado por extensas chapadas. Abrange, como área contínua, os estados de Goiás, Tocantins e o Distrito Federal, uma parte da Bahia, Ceará, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Piauí, Rondônia e São Paulo. Também ocorre em áreas disjuntas ao Norte, nos estados do Amapá, Amazonas, Pará e Roraima, bem como na Região Sul, em pequenas “ilhas” no Estado do Paraná (SANTOS, 2000; BALDUINO, 2001).

2.5 O gênero *Eucalyptus*

O gênero *Eucalyptus* pertence à família Myrtaceae, com mais de setecentas espécies. Ocorre naturalmente na Austrália e as espécies são adaptadas às diversas condições de clima e solo. Dessa grande diversidade de espécies, apenas duas não são originárias da Austrália: *E. urophylla* e *E. deglupta*. A madeira é, na maioria das vezes, pesada, resistente, com textura fina e baixa estabilidade dimensional. O gênero é representado por árvores com alta taxa de crescimento, plasticidade, forma retilínea do fuste, desrama natural e madeira com variações nas propriedades tecnológicas, adaptadas às mais variadas condições de uso (OLIVEIRA et al. 1999). A maioria das espécies conhecidas apresenta árvores típicas de florestas altas, com 30 a 50 m de altura e de aproximadamente, 30 a 40 espécies arbustivas (ALZATE, 2004; MORA e GARCIA, 2000).

O gênero *Eucalyptus* é caracterizado, ainda, pela elevada plasticidade, ou seja, grande capacidade de adaptação às condições ambientais. Quanto à latitude, observa-se que as maiores florestas se encontram em latitudes acima de 20°, podendo ser cultivado desde a condição de beira mar até as regiões muito elevadas, como o *E. globulus*, cultivado a 1.400m de altitude, na África. Os eucaliptos prosperam em grande diversidade de clima, com a literatura citando valores mínimos desde -10°C para plantações de *E. viminalis*, até um valor de 55°C, em plantações de *E. corynocalyx*, *E. bicolor* e *E. microtheca*. O eucalipto, também, parece não ser muito exigente quanto às condições edáficas, embora apresente respostas positivas consideráveis quando submetidas à adubação (OLIVEIRA et al., 1999).

Estima-se que, atualmente, existam, no mundo, 73,2 milhões de ha de florestas plantadas, sendo 25,6 milhões de hectares com eucaliptos. As espécies de

eucaliptos mais utilizadas no mundo são o *E. grandis*, *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. globulus*, *E. urophylla*, *E. viminalis*, *E. saligna* e *E. citriodora*

Diversas pesquisas têm sido realizadas com espécies do gênero *Eucalyptus*. Brito e Barrichelo (2007) concluíram que a escolha de madeiras para obtenção de carvão, com melhores propriedades químicas (maiores teores em carbono fixo e menores teores em substâncias voláteis e cinzas), deve basear-se naquelas que apresentem altos teores de lignina e elevada massa específica básica. Tal fato possibilita maior rendimento gravimétrico em carvão. Aumentando-se a quantidade de matéria seca colocada no forno torna-se possível a obtenção de maior rendimento volumétrico.

2.5.1 *Eucalyptus grandis*

O *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden é uma espécie nativa do Norte de Nova Gales do Sul e da costa sul de Queensland, na Austrália. O *Eucalyptus grandis*, por apresentar rápido crescimento, elevada produtividade e plasticidade é uma das espécies mais cultivadas no Brasil, com alto incremento volumétrico quando as condições ambientais são adequadas. Sua madeira é utilizada para a produção de carvão vegetal, celulose, papel, serrados, painéis, movelaria, peças esculturais etc. A massa específica básica fica em torno de 500 kg/m³. A madeira de *Eucalyptus grandis* é medianamente leve, resistente, com textura média e baixa estabilidade dimensional. Geralmente possui boa permeabilidade. Apresenta coloração rósea, clara, grã direita, com gosto e cheiro indistinto e limitada durabilidade natural (ROCHA, et al. 2004; ALZATE, 2004).

A madeira de *E. grandis* é leve e fácil de ser trabalhada. É utilizada, intensivamente, na Austrália e na República Sul-Africana, como madeira de construção, quando oriunda de plantações de ciclo longo.. É uma das espécies mais versáteis e indicadas para usos múltiplos; apresentando, no entanto, problemas de empenamento, contrações e rachaduras nas operações de desdobro e de secagem (ALZATE, 2004; FERREIRA, 1971).

ALMEIDA (1983), estudando o efeito da temperatura sobre o rendimento e propriedades do carvão vegetal de *E. grandis*, verificou que o rendimento em

carvão, ácido pirolenhoso e teor de matérias voláteis do carvão decrescem com aumento da temperatura de carbonização. O teor de carbono fixo aumenta com a temperatura de carbonização. O teor de cinzas não sofreu influências em função da temperatura. SILVA (1986), estudando o comportamento dos endocarpos de babaçu e macaúba, comparados à madeira de *Eucalyptus grandis*, sob várias temperaturas de carbonização, observou que a madeira produziu carvões com valores superiores de massa específica verdadeira, porosidade e teores de carbono fixo, e valores inferiores de densidade aparente, rendimento em carbono fixo e teores de cinzas. Verificou, ainda, que o rendimento gravimétrico, massa específica aparente e teor de matérias voláteis se mostraram inversamente correlacionados com a temperatura enquanto que carbono fixo, cinzas, porosidade e massa específica verdadeira se mostraram diretamente correlacionados com a temperatura final.

Raad (2006), através do estudo da decomposição térmica via termogravimetria, associada a modelos cinéticos, obteve equações matemáticas de alta correlação com os dados experimentais. Segundo o autor, os modelos podem ser utilizados no estudo de decomposição térmica de diversas biomassas, além do eucalipto. Com a crescente demanda pela utilização de energia renovável, a possibilidade de obtenção de modelos matemáticos para simulação da complexa transformação da biomassa em energéticos e termo-redutores, como o carvão vegetal, contribui para a melhor compreensão dos resultados, bem como dos procedimentos.

2.5.2 *Eucalyptus cloeziana*

O *Eucalyptus cloeziana* f. Muell ocorre naturalmente em áreas esparsas da Austrália (MOURA, 2003; FERREIRA, 1971). A madeira apresenta coloração castanho-amarelada, massa específica ($0,70 \text{ g/cm}^3$) e alta durabilidade natural. A espécie demonstra bons resultados em regiões de savana ou Cerrado e tem excelente desenvolvimento em chapadões do Vale do Jequitinhonha no Estado de Minas Gerais. Uma das características desta espécie é o crescimento lento até o terceiro ano, após o qual se torna relativamente rápido. Em geral, a massa específica da madeira é superior à de outras espécies de eucalipto como o *E. grandis* e o *E. urophylla*, produzindo um carvão mais denso, porém mais friável

(MOURA, 2003).

As plantações estabelecidas fora da Austrália têm como usos principais: serraria, postes, escoras, carvão, estruturas, dormentes entre outros e vem sendo considerada a melhor espécie para a produção de postes. Tratando-se de uma espécie oriunda de zonas predominantes tropicais, ela é susceptível a geadas e não se adapta bem em regiões com deficiência hídrica severa; é, também, susceptível ao fogo rasteiro. Apresenta baixa capacidade por brotação. É uma espécie que exige solos de fertilidade média a boa, recomendada para locais sem incidências de geadas, e altitudes superiores a 1.600 m (FERREIRA, 1971). Lopes et. al (1998), estudando a produção de madeira, carvão e carbono em plantações de *E. cloeziana* verificaram que o rendimento gravimétrico do carvão em laboratório foi de 34,4%, tendo o carvão resultado num teor médio de carbono fixo próximo a 77%. A produção de madeira neste estudo foi de 165 m³/ha em 84 meses no espaçamento 3 x 2m indicando grande potencial desta espécie para plantios energéticos em função da qualidade do carvão e da produtividade média por hectare.

2.5.3 *Eucalyptus urophylla*

Sua área de ocorrência natural situa-se em Timor e outras ilhas a leste do arquipélago indonésio, entre as latitudes de 8 a 10° e altitudes de 400 a 3.000 m. (FERREIRA, 1971; MOURA, 2004). Na área de ocorrência natural, a madeira é utilizada para construções e estruturas que demandam alta resistência. No Brasil, a madeira possui diversos usos como carvão vegetal, celulose, papel, serrados, painéis, movelaria, peças esculturais etc. (FERREIRA, 1971).

Mora e Garcia (2000) afirmaram que o interesse pelo *E. urophylla*, aumentou, no Brasil, nos últimos anos, depois de comprovada a alta resistência ao agente causador do cancro do tronco, sendo indicada na substituição do *E. grandis* em áreas mais susceptíveis ao mesmo. A esse respeito, Ruy (1998) afirmou que esta espécie e seus híbridos (*E. grandis* x *urophylla*) constituem a base da silvicultura clonal brasileira (SCANAVACA JUNIOR e GARCIA 2004; ALZATE, 2004).

O *E. urophylla* possui boa forma do fuste, massa específica básica em

torno de 500-600 Kg/m³, responde aos efeitos de espaçamento e à adubação, apresenta bom desenvolvimento na segunda rotação, é resistente ao déficit hídrico, mas suscetível a geadas e apresenta variações que são muito importantes para o melhoramento genético da espécie (SCANAVACA JUNIOR e GARCIA, 2004).

Santiago e Andrade (2005), estudando *E. urophylla* e resíduos de outras espécies desse gênero, verificaram que o lenho de *E. Urophylla* e resíduos são potencialmente interessantes para produção de carvão; no entanto, os resíduos, tendem a possuir menores rendimentos em carvão. Nunes e Andrade (2000) estudaram o comportamento das espécies *Euterpe edulis* e *Eucalyptus urophylla*, sob o efeito de temperaturas adequadas para carbonização. Verificaram que o carvão vegetal da madeira de *E. urophylla* apresentou menor teor de cinzas, mas valores superiores para rendimento gravimétrico e teor de carbono fixo.

2.5.4 *Eucalyptus camaldulensis*

A espécie ocorre praticamente em todos os estados australianos, exceto na Tasmânia. As áreas principais de ocorrência estão situadas entre as latitudes de 15-38° S, nas altitudes variando desde 30 a 600 m. Na Austrália, a madeira é muito utilizada para serraria, dormentes e carvão (FERREIRA, 1979). O *E. camaldulensis* é uma das espécies mais adequadas para zonas críticas de reflorestamento, onde as deficiências hídricas e problemas ligados ao solo sejam fatores limitantes para outras espécies. Segundo FERREIRA (1979), nos países onde a espécie foi introduzida com sucesso, verificaram-se algumas situações bem características:

- Maior tortuosidade das árvores, em geral, do que *E. grandis*, *E. saligna* e *E. propinqua*.
- Maior massa específica, cerne bem diferenciado e mais colorido do que a madeira de *E. grandis* e *E. saligna*.

VITAL et. al. (1984), estudando a variabilidade genética, características de crescimento e propriedades da madeira e carvão de vinte e cinco progênies de *Eucalyptus camaldulensis*, observaram correlações positivas, significativas em nível de 1% de probabilidade, entre massa específica básica e teor de voláteis, entre rendimento gravimétrico e teor de lignina, bem como entre teor de extrativos e teor

de holocelulose. Foram observadas, ainda, correlações negativas, entre massa específica básica e rendimento gravimétrico, entre massa específica básica e rendimento em carbono fixo, entre rendimento gravimétrico e teor de holocelulose, bem como entre teor de extrativos e teor de lignina. Chegou-se à conclusão que não há boas perspectivas de ganho genético através de seleção das progênies estudadas, à exceção das características de crescimento.

2.5.5 “*Eucaliptos clonados*”

A clonagem é extremamente útil na consolidação dos ganhos do melhoramento genético e da hibridação, promovendo a homogeneização das propriedades tecnológicas da madeira, com benefícios para a qualidade do produto final, altamente desejável na atividade industrial (SILVA et al. 2003).

A propagação clonal busca, como meta principal, a reprodução de indivíduos geneticamente idênticos, de material vegetativo procedente de uma planta selecionada. A silvicultura clonal baseia-se na seleção de árvores superiores em populações de espécies/procedências e nas técnicas de reprodução assexuada, utilizando a variação genética existente e com os ganhos genéticos sucessivos, propiciando maior produção de madeira de qualidade, no menor tempo por unidade de área (FERREIRA, 1992). Em 1974, iniciou-se, no Brasil o desenvolvimento de métodos de propagação vegetativa a partir de estacas coletadas de brotações de cepas de eucalipto. Em 1979, estabeleceu-se a primeira plantação clonal, no Estado do Espírito Santo, com ganhos expressivos de produtividade e qualidade da madeira (RUY, 1998; GRIFFIN & RIVELLI, 1993).

Nas duas últimas décadas, os trabalhos desenvolvidos com o melhoramento florestal elevaram o nível produtivo e qualitativo das florestas comerciais; segundo Ferreira (1992), a nova silvicultura clonal intensiva procura melhorar a adaptação das espécies/procedências e estabelecer bases genéticas mais sólidas (ALZATE, 2004).

Trugilho et. al. (2001) encontraram diferenças entre clones de *E. grandis* e *E. saligna*, em relação às propriedades e rendimento gravimétrico do carvão. Verificaram que, em média, os clones de *E. grandis* foram superiores aos clones de

E. saligna na produção de carvão vegetal. Trugilho et. al. (2005) estudaram o efeito da variabilidade entre os clones e a posição radial de amostras. No carvão produzido, verificaram que o efeito do clone foi significativo para rendimento gravimétrico em carvão vegetal, teor de carbono fixo e massa específica aparente. O efeito da posição radial teve influência na massa específica aparente, teor de materiais voláteis e de carbono fixo. O efeito da interação clone x posição radial foi significativo para as características rendimento gravimétrico em carvão vegetal, teor de materiais voláteis e carbono fixo.

2.6 Madeiras provenientes de florestas nativas

Diversas espécies são de importância econômica e tem um papel significativo na composição do Cerrado. Algumas espécies se destacam pela frequência e produção de biomassa, bem como pela potencialidade de serem convertidas em carvão vegetal.

Paula (1999, 2005), avaliando espécies do Cerrado, conclui que as espécies *Buchenavia ochroprumna*, *Chomelia parviflora*, *Copaifera maritii*, *Caryocar coriaceum*, *Dipteryx alata*, *Lindackeria paraensis*, *Parkia platycephala*, *Swartzia flaeamingii*, *Vatairea macrocarpa*, *Platonia insignis*, *Salvertia convallariodora* e *Zeyhera tuberculata*, *Hymenea courbaril* var. e *stilbocarpa* são consideradas potenciais para a produção de carvão e lenha. Segundo o autor, tais espécies devem ser indicadas em programas de manejo e enriquecimento de maciços florestais energéticos em áreas de Cerrado. Tais espécies somente poderiam ter uma utilização efetiva, dos pontos de vista econômico e ecológico, se incluídas na formação de grandes maciços florestais heterogêneos, sob planos de manejo, com rendimento sustentável. Os consórcios agrosilvopastoris poderiam apresentar-se como alternativa, possibilitando o uso diversificado de uma área, com muitos produtos. Deve-se evitar o extrativismo, em escala industrial, para fins energéticos.

Andrade (1998) estudou oito espécies nativas: *Couropita guianensis*, *Carapa guianensis*, *Piptadenia peregrina*, *Astronium urundeuva*, *Delonix regia*, *Schizolobium parahybum*, *Piptadenia gonoacantha* e *Calycophyllum sprussiana*, comparando-as com o *Eucalyptus grandis*, na produção de carvão vegetal. Verificou que todas as espécies estudadas apresentaram potencialidade para produção de

carvão, destacando-se *Astronium urundeuva*, *Piptadenia gonoacantha* e *Piptadenia peregrina*, pelos valores mais elevados de massa específica aparente do carvão e teor mais reduzido de cinzas. Para uma indicação mais segura, fatores como ritmo de crescimento, exigências edafoclimáticas, idade de rotação, frequência de ocorrência, dentre outros, também devem ser considerados.

Oliveira et. al. (2006) estudaram o comportamento da madeira de *Mimosa tenuiflora*, visando à produção de carvão. Concluíram que a espécie apresentou-se como espécie potencial, em função dos valores de rendimento gravimétrico em carvão, teor de carbono fixo, poder calorífico e massa específica aparente. Aliados à adaptabilidade na região semi-árida nordestina brasileira, a espécie pode ser considerada apta para a produção sustentada de biomassa para geração de energia, uma vez que apresenta potencial energético superior ao *Eucalyptus grandis* e muitas outras espécies da própria Caatinga.

Gonçalves et. al (1999) estudaram as características da madeira de *Mimosa caesalpiniaefolia* para a produção de carvão vegetal. Verificaram que o carvão apresentou elevado rendimento gravimétrico (32,04%), baixo teor de cinzas (1,71%) e elevado teor de carbono fixo (75,60%).

2.6.1 *Caryocar brasiliense* (pequi)

O pequi (*Caryocar brasiliense*) pertence à família Caryocaraceae. É uma família exclusivamente neotropical, com vinte e cinco espécies reunidas em dois gêneros, *Caryocar* e *Anthodiscus*. O gênero *Caryocar* possui dezesseis espécies, sendo doze nativas brasileiras. Vários são os nomes comuns da espécie em questão: pequizeiro, piqui, pequi, pequiá e piquiá. A espécie apresenta porte arbóreo atingindo entre 8 a 12 m de altura e, no Cerrado do Brasil Central, atinge até sete metros. A madeira é medianamente pesada, macia, resistente e de boa durabilidade natural (FRANCO et al. 2004; LORENZI, 1998).

2.6.2 *Qualea grandiflora* (pau terra).

O pau terra (*Qualea grandiflora* Mart.) pertence à família Vochysiaceae; é uma planta pioneira, que ocorre no Cerrado e na Região Amazônica e se estende até os Estados de São Paulo, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso. Ela é também conhecida popularmente como pau-terra-do-campo, pau-terra-do-Cerrado e ariauá

(LORENZI, 1992). Possui ampla dispersão em todo o Cerrado Central brasileiro, com alta frequência de indivíduos, sendo facilmente encontrada em terrenos altos, secos e bem drenados. A madeira possui densidade mediana (450 Kg/m^3), macia ao corte, com textura média, pouco resistente e suscetível ao apodrecimento.

2.6.3 *Magonia pubescens* (tingui)

O tingui é uma árvore da família Sapindaceae, de ocorrência natural desde os Estados do Ceará até Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso, no Cerrado. Sua madeira é moderadamente pesada (600 Kg/m^3), dura, textura média e de boa resistência ao ataque de organismos xilófagos. Utilizada na construção civil, como caibros, ripas, na confecção de esquadrias, batentes de portas e janelas, lenha e carvão. A infusão da casca da raiz é empregada para intoxicar os peixes, para posterior captura. As sementes são usadas na indústria de artesanato para composição de arranjos florais secos. A árvore é bastante ornamental, principalmente pela folhagem, com aspecto rendilhado e pode ser empregada na composição de jardins e praças e, principalmente, na arborização de ruas estreitas. É considerada planta pioneira, adaptada a terrenos fracos, indicada para plantios de áreas degradadas, de preservação permanente (LORENZI, 1992).

2.6.4 *Inga laurina* (ingá)

O ingá (*Inga laurina*) é uma árvore pertencente à família Leguminosae-Mimosoideae, amplamente distribuída em todo o Brasil, ocorrendo da Amazônia até os Estados do Nordeste e, daí, até o Sul do País. Possui altura entre 10 e 20 m, dotada de copa ampla e baixa, com tronco lenticelado. A árvore que possui copa frondosa é utilizada para sombreamento de cafezais, na América Central. É uma planta perenifólia, heliófita, seletiva higrófila, características de matas úmidas, com ampla distribuição nas matas, porém de forma descontínua. Ocorre em quase todas as formações vegetais. A madeira é moderadamente pesada, com densidade de $0,70 \text{ g/cm}^3$, macia, de textura média à grossa, grã direita. A madeira pode ser utilizada para caixotaria, lenha e carvão (LORENZI, 1998).

2.6.5 *Bowdichia virgiloides* (sucupira)

A sucupira (*Bowdichia virgiloides*) é uma árvore pertencente à família Leguminosae-Papilionoideae, característica do Cerrado, de ocorrência nos Estados do Pará, Goiás, Mato Grosso, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e São Paulo. Apresenta características de planta pioneira, seletiva xerófila, adaptada a terrenos secos e pobres (RIZZINI, 1971). Sua madeira é pesada, fibrosa, bastante decorativa e de longa durabilidade natural, empregada para acabamentos internos, como assoalhos, lambris, molduras, painéis e portas. A árvore é extremamente ornamental quando em floração, podendo ser empregada, com sucesso, nos trabalhos de paisagismo; é particularmente útil para arborização de ruas. É considerada planta pioneira e adaptada a terrenos secos e pobres, indicada para plantios em áreas degradadas de preservação permanente (LORENZI, 1992).

2.6.6 *Piptadenia gonoacantha* (pau-jacaré)

Popularmente conhecida como jacaré e pau-jacaré, é uma árvore pertencente a família Leguminosae-Mimosoideae, de ocorrência nos Estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro, Mato Grosso do Sul até Santa Catarina, principalmente na floresta pluvial da Encosta Atlântica. Apresenta escamas no caule, variando, em média, de 10 a 20 metros de altura. Os ramos e o tronco, quando jovens, possuem asas lenhosas longitudinais, folhas compostas. Sua madeira é moderadamente, dura ao corte, porém mole para trabalhar, textura grossa, grã irregular, medianamente resistente ao ataque de organismos xilófagos. É utilizada para fazer acabamentos internos, armação de móveis, confecção de brinquedos e embalagens (LORENZI, 1992). É usada como lenha e carvão, sendo considerada uma das melhores madeiras para a produção de energia, em função da maior densidade básica do lenho e do baixo teor de cinzas do carvão (ANDRADE et al. 1998). As flores são de grande valor melífero. Como planta pioneira de rápido crescimento, é indispensável nos reflorestamentos mistos, destinados à recomposição de áreas degradadas de preservação permanente (LORENZI, 1992).

2.6.7 *Dipteryx alata* (baru)

O baru é uma árvore pertencente à família das Leguminosae-

Papiolionoideae, de ocorrência nos Estados de Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso e São Paulo, nas áreas de Cerrado e na Floresta Latifoliada Semidecídua. Sua madeira é medianamente pesada, com grã irregular a revessa, superfície pouco lustrosa, compacta, com alburno distinto, de alta resistência ao apodrecimento e ao ataque de organismos xilófagos, mesmo em condições adversas. A madeira é utilizada para construção de estruturas externas (estacas, postes, obras hidráulicas, moirões, cruzetas, dormentes etc.) e construção naval e civil (vigas, caibros, ripas, batentes de portas e janelas, tábuas e tacos para assoalhos, lambris, forros, carrocerias etc.). A polpa dos frutos é aromática e avidamente consumida pelo gado e animais silvestres. A amêndoa é comestível e muito nutritiva (LORENZI, 1992), além de servir de fonte de um óleo de excelente qualidade, que costuma ser utilizado pela população local como aromatizante para o fumo (TASSARO, 1996). A árvore é majestosa e elegante, além de proporcionar ótima sombra; pode ser utilizada com sucesso no paisagismo, em geral (LORENZI, 1992).

2.7 Propriedades da madeira e sua influencia no carvão vegetal

2.7.1 Massa Específica da Madeira

Partindo do conceito físico mais elementar, a massa específica é a quantidade de massa, expressa em peso, contida na unidade de volume. Em se tratando de madeira, a massa específica pode ser absoluta, expressa em g/cm^3 ou kg/m^3 , ou relativa, quando comparada com a massa específica absoluta da água destilada, isenta de ar, à temperatura de $3,98^\circ\text{C}$, com densidade de $1,0 \text{ g/cm}^3$. Nos sistemas CGS e SI, o número que exprime a massa específica absoluta coincide com o número adimensional que exprime a massa específica relativa (VITAL, 1984).

As variações de massa específica entre as diversas espécies de madeira se devem às diferenças das espessuras da parede celular, das dimensões das células, das inter-relações entre esses dois fatores e da quantidade de componentes extratáveis presentes por unidade de volume. A massa específica da madeira de uma mesma espécie pode variar em função da idade da árvore, genótipo, índice de

sítio, clima, localização geográfica e tratos culturais etc. Os efeitos, em geral, são interativos e difíceis de serem avaliados isoladamente (VITAL, 1984).

Existe uma estreita correlação entre o carvão vegetal e as características anatômicas da madeira que lhe deu origem. Neste sentido, a constatação de características anatômicas que se correlacionem com massas específicas básicas elevadas, a exemplo da ocorrência de paredes celulares espessas e de diâmetros de lumes reduzidos, indica a possibilidade da produção de carvão vegetal denso, com menor volume de poros e, conseqüentemente, menos higroscópico. Madeiras com altos teores de vasos, com dimensões demasiadamente elevadas, apresentam, ao contrário, características indesejáveis para a produção de carvão vegetal, a exemplo da baixa massa específica. Partindo desses indicadores, deve-se optar por madeiras que potencialmente deverão produzir carvão com características adequadas ao seu uso final (ANDRADE, 1989).

Silva (2002) justifica a importância da massa específica e enumera vários fatores ligados a ela:

a) A massa específica da madeira de uma determinada árvore depende significativamente da massa específica da madeira de seus ascendentes, em virtude de boa herdabilidade.

b) Madeiras com quantidade elevada de extrativos levam a resultados contraditórios da massa específica básica.

c) Há uma diminuição da massa específica básica no sentido base-topo, com exceção das madeiras de bases expandidas, que crescem em regiões alagadas; em geral, há um aumento da massa específica no sentido medula-casca.

d) Há um aumento da massa específica básica em função da idade da árvore. Normalmente, a massa específica aumenta, com rapidez, durante o período juvenil, depois, de maneira mais lenta até atingir a maturidade, permanecendo, mais ou menos, constante daí para frente .

e) A madeira de lenho tardio apresenta uma massa específica básica maior que a madeira de lenho juvenil.

f) A taxa de crescimento, para a maioria das espécies, não afeta de

maneira uniforme, a massa específica. Para as folhosas, o aumento da taxa de crescimento, dentro de certos limites, ocasiona aumento da massa específica da madeira. As coníferas aparentemente sofrem uma redução na massa específica e quando ocorre aumento na taxa de crescimento, conforme observado por diversos pesquisadores, citados por Vital (1984).

g) A massa específica básica da madeira apresenta tendência de valores maiores à medida que as latitudes avançam para os trópicos, quando, quase sempre, tal situação está associada com zonas de baixa altitude, baixa precipitação, baixa umidade relativa, temperaturas elevadas e clima seco.

Brito e Barrichelo (1980) estudaram o comportamento da madeira de dez espécies de eucalipto; verificaram que a massa específica básica da madeira exerce influência direta sobre a massa específica aparente do carvão. A existência de uma alta correlação pode nortear fundamentalmente a escolha de espécies, bem como as pesquisas sobre melhoramento de características do carvão. No caso, a escolha de espécies de eucalipto cujas massas específicas sejam elevadas é altamente vantajosa para os principais usos do carvão vegetal.

Oliveira (1988), num trabalho desenvolvido com madeira de *Eucalyptus*, fez algumas correlações entre a massa específica básica da madeira e outros parâmetros anatômicos e químicos:

1. O aumento da massa específica básica da madeira é acompanhado do aumento da espessura da parede das fibras, redução do lume e aumento no comprimento das fibras.
2. À medida que se aumentam os teores de lignina e extrativos aumenta-se, proporcionalmente, a massa específica básica.
3. À medida que se reduz a massa específica básica da madeira aumenta-se o teor de holocelulose.

2.7.2 Composição Química da Madeira

Composição química elementar: corresponde ao conteúdo percentual em massa dos principais elementos que constituem a biomassa. São geralmente apresentados valores para o carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O),

nitrogênio (N) e cinzas (A). Geralmente, o conteúdo se refere à matéria seca, ou seja, sem a presença de água (NOGUEIRA et. al. 2000).

Composição química imediata: refere-se ao conteúdo percentual, baseado na massa do combustível. São geralmente apresentados valores para carbono fixo (CF), matérias voláteis (MV), cinzas (CZ) e, eventualmente, umidade (U) (NOGUEIRA et. al. 2000). A Tabela 4 apresenta as características técnicas de diferentes tipos de biomassa em base seca.

Tabela 4 – Características técnicas de diferentes tipos de biomassa em base seca

<i>Tipo de Biomassa</i>	<i>Composição elementar (%)</i>					<i>Composição química imediata (%)</i>			
	<i>C</i>	<i>H</i>	<i>O</i>	<i>N</i>	<i>S</i>	<i>A</i>	<i>MV</i>	<i>CZ</i>	<i>CF</i>
Eucalipto	49,00	4,87	43,79	0,30	0,01	0,72	81,42	0,79	17,82
Pinho	49,29	4,99	44,36	0,06	0,03	0,3	82,54	0,29	17,70
Casca de arroz	40,96	4,30	34,86	0,40	0,02	18,34	64,47	17,89	16,67
Bagaço de cana	44,80	4,35	39,55	0,38	0,01	9,79	73,78	11,27	14,95
Casca de coco	48,23	4,23	33,19	2,98	0,12	10,25	67,95	8,25	23,8
Sabugo de milho	46,58	4,87	44,46	0,47	0,01	1,40	80,10	1,36	18,54
Ramas de algodão	47,05	4,35	40,97	0,65	0,21	4,89	73,29	4,51	21,20

Fonte: LORA (1997).

Como pode ser verificado na Tabela 4 a madeira é composta basicamente de oxigênio, hidrogênio e carbono. Carbono equivale a aproximadamente 50%, o oxigênio, 44%, e o hidrogênio, a 6% da composição química da madeira. A lignina, celulose e hemiceluloses são constituídas basicamente por estes elementos. A celulose apresenta 45% de carbono, enquanto que a lignina possui de 61-67% de carbono.

A Tabela 5 apresenta as características de algumas espécies de eucaliptos destacando-se as principais propriedades para uso como fonte energética.

Tabela 5 - Características de algumas espécies de eucalipto na idade de 10,5 anos, plantados em espaçamento de 3,0 x 2,0 metros

Propriedades	Espécies				
	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	<i>Corymbiu citriodora</i>	<i>Eucalyptus grandis</i>	<i>Eucalyptus saligna</i>	<i>Eucalyptus urophylla</i>
Massa específica básica (g/cm ³)	0,687	0,73	0,479	0,548	0,564
Teor de lignina (%)	30,6	22,4	23,9	26,3	27,3
Rendimento em carvão vegetal (%)	34,7	32,6	33,7	33,7	34,1
Teor de carbono fixo (%)	15,4	17,3	18,7	14,7	16,3
Teor de materias voláteis (%)	84,1	81,1	80,7	84,8	82,8
Teor de Cinzas (%)	0,5	1,6	0,6	0,5	0,9
PCS da madeira (Kcal/Kg)	5.085	4718	4340	4633	4312
PCS do carvão (kcal/Kg)	7.977	8.088	6.626	6.972	7.439

Fonte: Couto et al. 2003, citando Pereira et al. (2000)

O comportamento da madeira, perante o processo de carbonização, representa o somatório do comportamento de cada um de seus componentes principais (celulose, hemiceluloses e lignina), sendo que 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. Evidencia-se, portanto, a importância da lignina quando se objetiva a produção de insumos energéticos sólidos. Embora a lignina comece a se degradar sob o efeito de temperaturas relativamente baixas (por volta de 150 °C), observa-se que a sua decomposição é mais lenta, ao contrário da celulose e hemiceluloses. A lignina continua a perder peso, mesmo em temperaturas superiores a 500 °C, resultando, portanto, em uma maior massa carbonosa residual. Transcorrido o período normal de carbonização, com temperatura média final ao redor de 500 °C, a perda de peso apresentada pela lignina é significativamente menor que aquela experimentada pela celulose e pelas hemiceluloses, restando, ainda, cerca de 40% da sua massa original. A degradação da celulose processa-se rapidamente, chegando a perder, na faixa de 300 a 350 °C, cerca de 80% da sua massa. As hemiceluloses, por sua vez,

começam a perder peso em temperaturas próximas a 225 graus centígrados; como são componentes pouco estáveis, considera-se que, por volta dos 500 °C, a sua degradação térmica terá sido completa. Tudo indica que a resistência térmica dos constituintes químicos da madeira está intimamente relacionada às suas respectivas estruturas. Assim, quanto mais complexa, mais rígida, mais inacessível, mais fechada e mais cristalina for à estrutura, mais estável do ponto de vista térmico será o correspondente componente químico (ANDRADE, 1989; OLIVEIRA et al. 1982a).

2.8 Efeito da temperatura na carbonização

Diversos autores verificaram que a temperatura final de carbonização influencia na qualidade do carvão, alterando-lhe as propriedades.

Coutinho (1984), estudando o efeito da temperatura de carbonização na qualidade do carvão de *E. saligna*, com nove anos de idade, verificou que a temperatura final de carbonização afetou diretamente todas as características do carvão vegetal. O autor estabeleceu sete temperaturas finais (400, 500, 600, 700, 800, 900 e 1000 °C) e ajustou modelos relacionando a temperatura final de carbonização com as características do carvão vegetal. No estudo em questão, verificou-se que um aumento na temperatura final de carbonização resultou no decréscimo na densidade aparente, teores de matérias voláteis e rendimento gravimétrico, mas um acréscimo nos teores de carbono fixo e poder calorífico do carvão. Segundo o autor, todas essas propriedades se comportaram na forma de um polinômio de segundo grau, cujo ajuste mais adequado é feito através de regressão parabólica.

Vale (1988), estudando a o comportamento de duas espécies do gênero *Piptadenia*, para a produção de carvão vegetal, verificou que o aumento na temperatura máxima de carbonização reduziu o rendimento gravimétrico e aumentou o teor de carbono fixo. O autor avaliou quatro temperaturas finais (300, 400, 500 e 600 °C) e verificou comportamentos diferenciados entre as duas espécies; para a espécie *Piptadenia comunis* ocorreu uma perda de massa significativa e um aumento do teor de carbono fixo entre as temperaturas de 400 e 500 °C; no caso da espécie *Piptadenia peregrina*, a maior perda de massa e o maior aumento nos teores de carbono fixo aconteceram entre as temperaturas de 300 e 400 °C.

Silva (1986), estudando o efeito da temperatura final de carbonização no carvão de *E. grandis* e nos endocarpos de babaçu (*Orbigua* spp) e macaúba (*Acrocoma sclerocarpa*), verificou que os endocarpos apresentaram maiores rendimentos em carvão do que a madeira de *E. grandis*. Utilizaram-se três temperaturas finais (300, 500 e 700 °C) e verificou-se uma redução do rendimento gravimétrico e teor de matérias voláteis com o aumento da temperatura final de carbonização; o poder calorífico e os teores de carbono fixo e cinzas apresentaram um comportamento inverso. Para os endocarpos ocorreu uma redução da densidade aparente, para até a temperatura de 500 °C, voltando a subir na temperatura de 700 °C, enquanto que com *E. grandis* a densidade aparente decresceu em função do aumento da temperatura.

Barbosa (1986) utilizou quatro temperaturas finais (350, 450, 550 e 650 °C) para avaliar o efeito da temperatura final na qualidade do carvão de *Prosopis juliflora*. Verificou um acréscimo nos teores de carbono fixo e uma redução no rendimento gravimétrico e nos teores de matérias voláteis com aumento na temperatura final de carbonização. A densidade aparente decresceu até uma temperatura de 550 °C, voltando a crescer; o inverso aconteceu com o poder calorífico, que subiu até 550 °C, mas decresceu depois.

Almeida (1983) utilizou temperaturas finais de 300, 375, 450, 525 e 600 °C para avaliar o efeito da temperatura sobre o rendimento da madeira de *E. grandis*. Verificou que os teores de voláteis e rendimento em carvão decresceram com a temperatura final e um aumento do teor de carbono fixo com a temperatura de carbonização.

Oliveira (1988), estudando o efeito da qualidade da madeira de *E. grandis* no processo de carbonização, detectou que a massa específica básica da madeira possui uma correlação positiva com o rendimento em carvão e massa específica aparente; entretanto, não verificou correlações com os teores de carbono fixo, matérias voláteis e cinzas.

Silva e Trugilho (2003) utilizaram temperaturas finais de carbonização de 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 e 900 °C, para avaliar o efeito da temperatura no comportamento dimensional entre o cerne e o alburno de jatobá (*Hymeneae courbaril*). Foi verificado que o cerne apresentou maior resistência à ação da

temperatura, porém sua decomposição térmica foi mais pronunciada que a do alburno na faixa de temperatura compreendida entre 200° e 300 °C. Este comportamento é semelhante ao da lignina em relação à celulose.

2.9 Propriedades do carvão

2.9.1 *Rendimento gravimétrico*

O rendimento gravimétrico é a relação percentual de peso entre o produto (carvão anidro) e a matéria-prima (madeira anidra), expresso em porcentagem.

Segundo OLIVEIRA (1988) o rendimento gravimétrico possui:

- Correlação positiva com o teor de lignina total e teor de extrativos.
- Correlação positiva com massa específica básica da madeira..
- Correlação negativa entre largura e diâmetro dos lúmes das fibras.

Outros fatores importantes para o aumento do rendimento gravimétrico são a temperatura máxima média, na faixa dos 400 °C, e uma taxa de aquecimento lenta (OLIVEIRA, 1982a)

2.9.2 *Carbono fixo*

O carbono fixo pode ser definido como a quantidade de carbono presente no carvão. O rendimento em carbono fixo apresenta uma relação diretamente proporcional aos teores de lignina, extrativos e massa específica da madeira, e inversamente proporcional ao teor de holocelulose. Apresenta uma correlação direta com o teor de carbono fixo presente na madeira e com o rendimento gravimétrico (OLIVEIRA, 1988). Segundo CARMO (1988), a quantidade de carbono fixo fornecido por unidade de madeira é função da porcentagem de lignina da madeira.

2.9.3 *Matérias voláteis*

Os materiais voláteis podem ser definidos como substâncias que são despreendidas da madeira como gases durante a carbonização e/ou queima do carvão. Os fatores que influenciam os materiais voláteis no carvão são: temperatura

de carbonização, taxa de aquecimento e 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 das matérias voláteis se dá na modificação estrutural do carvão. A porosidade, diâmetro médio dos poros, massa específica e outras características físicas do carvão podem ser alteradas significativamente pela eliminação dos voláteis.

2.9.4 Cinzas

A cinza é um resíduo mineral proveniente dos componentes minerais do lenho e da casca (COTTA, 1996). Em algumas espécies e, principalmente na casca, o teor de cinzas é elevado. Geralmente, o carvão vegetal apresenta baixo teor de cinzas quando comparado com o coque mineral (CARMO, 1988). Segundo Cotta (1996), quanto maior a proporção de materiais minerais na madeira, maior a produção de cinzas no carvão. Deve-se tomar muito cuidado com as adubações em florestas, para que os níveis de minerais na madeira sejam aceitáveis, principalmente, os de enxofre e fósforo (COTTA, 1996). Os minerais presentes na madeira e carvão são considerados indesejáveis do ponto de vista energético, pois, podem, em algumas situações, quando queimados em fornalhas, caldeiras etc. formarem incrustações nos equipamentos e tubulações.

Altos teores de cinzas, como os sais que estão presentes na sua composição, podem prejudicar a produção de ferro-gusa, ferro-ligas e metais não ferrosos; no caso do ferro-gusa, as cinzas podem provocar o fenômeno da “segregação”. No uso industrial em siderurgia, o carvão vegetal deve possuir baixo teor de minerais, pois causa problemas sérios na qualidade do aço produzido. Este problema é, ainda maior, quando se produzem ligas metálicas. Os principais minerais encontrados nas cinzas são cálcio, magnésio, fósforo e silício.

As influências da casca sobre as qualidades físicas e químicas do carvão ora se manifestam de forma positiva, ora de forma negativa. Sob o ponto de vista positivo, destacam-se os aumentos no rendimento gravimétrico e em carbono fixo, e, sob o ângulo negativo, destacam-se os aumentos nos teores de cinza e fósforo, no entanto, o efeito da casca é amenizado por quantidades significativamente maior da madeira. Por isso, os aumentos nos teores de cinza e

fósforo no carvão de lenha carbonizada com casca não são, de modo geral, fatores limitantes à sua utilização (VITAL et. al.,1989).

Num estudo realizado por Brito e Barrichelo (1978) verificou-se que a quantidade de cinzas produzida na casca é de 300 a 2.000% maiores do que no lenho. Estudos realizados por Kaka e Goring (1983) citados por Andrade, (1989) detectaram que o conteúdo de minerais no lenho inicial é maior do que aquele encontrado no lenho tardio, em razão da primeira região ser uma área de intensa atividades fisiológica.

O teor, bem como a composição química das cinzas pode ser afetada pela disponibilidade de minerais no solo. Com relação ao teor de minerais no carvão vegetal, presentes na forma de fósforo, enxofre, cálcio, etc. percebe-se que quanto maior o teor dos mesmos na matéria-prima utilizada, maior será a percentagem destes no carvão produzido. Todavia, em algumas espécies, principalmente na casca, o teor de cinza é elevado, porque a casca sempre possui mais minerais que a madeira propriamente dita. O alburno também possui ligeiramente mais cinza que o cerne (ANDRADE 1989 citando FOELKEL, 1977).

2.9.5 Massa específica aparente

É importante ter em mente que, quando se fala em massa específica do carvão, é preciso saber exatamente qual conceito está sendo expresso. Existem três diferentes conceitos de massa específica para o carvão: a massa específica verdadeira, a massa específica aparente e a massa específica a granel.

A massa específica varia conforme a técnica utilizada na sua medição. Ao se tomar uma determinada caixa, com volume nominal de 1 m^3 , cheia de carvão, a relação massa do carvão/volume é denominada massa específica a granel, expressa em kg/m^3 . Normalmente, esse valor gira em torno de 200 a 300 kg/m^3 , com os valores mais comuns próximos de 250 kg/m^3 . Se, na medida anterior, desconsiderar o volume dos espaços vazios entre os vários pedaços de carvão, ter-se-á a relação massa do carvão/volume, cujo resultado expressa a massa específica aparente. O carvão vegetal é um material bastante poroso, com 70-80% de porosidade. A massa específica verdadeira é a medida da massa dos materiais que

compõem o carvão vegetal, ou seja, é a massa específica aparente, desconsiderando-se o volume da porosidade interna. Relacionando a massa específica verdadeira com a aparente, pode-se obter, então, uma medida da porosidade do carvão (OLIVEIRA et al. 1982a).

2.9.6 Poder calorífico

O poder calorífico de um combustível é o número de calorias liberadas na combustão completa de uma unidade de massa do combustível, sendo expresso geralmente em kcal/kg, para combustíveis sólidos e líquidos e, em kcal/m³, para combustíveis gasosos.

A madeira anidra possui em média 4.400 kcal/kg. A Tabela 6 mostra uma comparação entre diversos combustíveis, e como podemos relacionar estes com a madeira.

Tabela 6 – Poder calorífico de alguns combustíveis

Combustível	kcal/kg
Celulose	3.797
Lignina	5.995
Amido/Açúcar	3.797
Carbono puro	8.049
Casca	4.991
Madeira	4.394
Carvão vegetal	6.800
Coque	7.308
Petróleo	10.800
Óleo diesel	10.750
Gás natural	8.622
Propano	21.997
Butano	28.446

Fonte: Adaptado de Couto et al. (2004b)

Esta propriedade é de grande importância, principalmente quando se pensa na utilização do carvão vegetal como fonte de energia, em substituição aos combustíveis derivados do petróleo. 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 matérias voláteis.

Segundo Oliveira (1982), alguns fatores influenciam o poder calorífico:

1. Quanto maior o teor de umidade, menor é o poder calorífico. Este fato é explicado tendo em vista que a madeira com maior teor de umidade necessitará de maior quantidade de calor para evaporação de sua água. No CETEC, a madeira carbonizada com 31 % de umidade obteve 3.245 cal/g, enquanto que a madeira carbonizada com 14% obteve 4.227 cal/g.

2. O carvão vegetal apresenta um poder calorífico dependente da sua temperatura de carbonização, conforme pode ser observado na *Tabela 7*. O carvão carbonizado a 500 °C tem um maior poder calorífico do que os produzidos a 300 °C e 700 °C. O aumento do calor de combustão de 300 °C para 500 °C sugere que o carvão produzido a 300 °C retém “matéria” com baixo valor de poder calorífico (gomoses, alcatrão etc.) enquanto que a 500 °C, o carvão está enriquecido com maior teor de carbono fixo e voláteis, com alto valor de poder calorífico. A diminuição do poder calorífico de 500 °C para 700 °C, apesar de apresentar maior teor de carbono fixo, não mais possui os voláteis de alto poder calorífico (OLIVEIRA, 1982a).

Tabela 7 - Poder Calorífico do Carvão Vegetal de *Eucalyptus grandis* em Função da Temperatura de Carbonização

Temperatura	de	300 °C (kcal/kg)	500 °C (kcal/kg)	700 °C (kcal/kg)
Carbonização				
1ª medida		7012	8109	7647
2ª medida		7122	8141	7693
3ª medida		7085	8101	7563
4ª medida		6980	8199	7720
5ª medida		7151	8185	7671
Média		7070	8147	7659

Fonte: Oliveira (1982a)

2.10 Espectroscopia

A espectroscopia é o estudo dos espectros e cada elemento químico possui um espectro característico (CHEMICALNET, 2005). É chamado de

espectroscopia o método utilizado para análise da estrutura química de compostos inorgânicos, grupos funcionais de uma substância orgânica ou de elementos simples). A análise com espectroscopia pode ser destrutiva e não destrutiva. Os métodos destrutivos, geralmente proporcionam dados mais precisos.

Em Físico-Química, o termo espectroscopia é a designação utilizada para toda técnica de levantamento de dados físico-químicos, através da transmissão, absorção ou, ainda, reflexão da energia radiante incidente em uma amostra (WIKIPÉDIA, 2006a). Sempre quando se excita uma substância com uma fonte de energia, esta pode emitir ou absorver radiação em determinado comprimento de onda, permitindo uma observação do comportamento do corpo-de-prova e sua estrutura. A base da espectroscopia é a natureza ondulatória das radiações eletromagnéticas, cuja variável é a frequência fundamental, que determina o número de oscilações realizadas pela onda por unidade de tempo; o comprimento de onda corresponde à distância percorrida pela onda durante um período de tempo equivalente a uma unidade de frequência; o produto destas é definido como a velocidade de propagação da onda (WIKIPEDIA, 2006a).

Um exemplo clássico de formação do espectro luminoso foi dado por Newton ao fazer a luz solar incidir sobre um anteparo, contendo uma fenda, obteve-se um feixe luminoso que, ao passar por um prisma e ser projetado num anteparo, formou as cores do arco-íris. Isto ocorreu porque, ao atingir o prisma, acentuaram-se os efeitos da refração; cada comprimento de onda acentuou os efeitos da refração; portanto, cada comprimento de onda que compõe o feixe sofre um desvio proporcional ao respectivo comprimento de onda. Uma série de imagens da fenda se formou sobre o anteparo, uma de cada cor, e, separadas entre si, por distâncias proporcionais aos comprimentos de ondas correspondentes. Para a série de imagens projetadas se deu o nome de espectro luminoso. Assim, pode-se afirmar que, embora rudimentar, o sistema proposto por Newton constituiu-se no primeiro espectroscópio (WIKIPEDIA, 2006c).

Em 1859, os cientistas alemães Gustav Robert Kirchhoff e Robert Wilhelm Bunsen desenvolveram o espectroscópio de prisma, em sua forma moderna, e o aplicaram às análises químicas (CHEMICALNET, 2005). Em geral, os espectrômetros ou espectroscópios são equipamentos destinados à análise de

radiação, principalmente ondas eletromagnéticas (incluindo-se a luz visível). Dessa forma, servem para a análise físico-química, cujo processo é chamado de espectroscopia (WIKIPEDIA, 2006a).

O espectrômetro é usado para medir a intensidade da luz em comparação com a luz procedente de uma fonte-padrão. Essa comparação permite determinar a concentração da substância que produz esse espectro (CHEMICALNET, 2005).

O olho humano é sensível apenas a uma pequena faixa de frequências, ou seja, a região da luz visível do espectro eletromagnético. A luz, com frequências levemente superiores (comprimentos de onda mais curtos), encontra-se na faixa do ultravioleta e a luz, com frequências levemente inferiores (comprimento de onda mais longos), encontra-se na faixa do infravermelho (NISGOSKI, 2005).

A Figura 3 apresenta o espectro eletromagnético, com as diferentes frequências e comprimentos de onda.

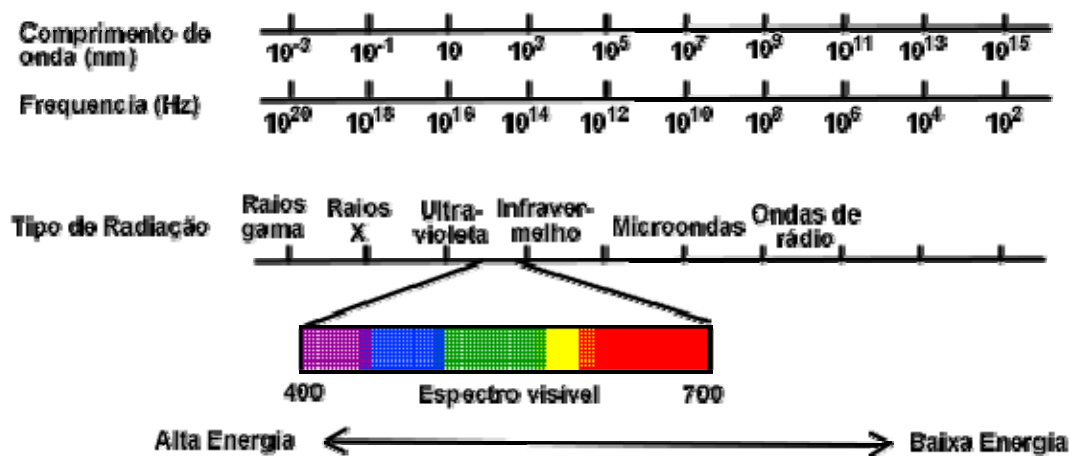


Figura 3 – Espectro Eletromagnético

Fonte: Nisgosky (2005) adaptado de Tais & Zaiger (2004)

O princípio da espectroscopia consiste na investigação das correlações entre as propriedades óticas dos materiais e outras propriedades de interesse. Geralmente, as propriedades óticas (transmitância, reflectância e absorbância) são fáceis e rápidas de serem medidas enquanto que outras propriedades de interesse (composição química, propriedades anatômicas e propriedades físicas) demandam mais tempo para avaliação e obtenção de resultados.

As principais vantagens da espectroscopia são apresentadas por SILVA (2006):

- As análises não são destrutivas.
- Não se utilizam produtos químicos.
- Os equipamentos apresentam um design compacto e são fáceis de serem transportados e manejados.
- Apresentam a possibilidade de múltiplas análises.
- Apresentam alta velocidade de resultados de análise.
- Possibilitam a transferência de calibrações entre diversos equipamentos.

Dentre as principais desvantagens da espectroscopia, destaca-se a necessidade de calibração, que exige tempo, cuidados e conhecimentos básicos de estatística e computação.

Os espectrômetros são classificados de acordo com sua faixa de leitura, dentro do espectro eletromagnético: ultravioleta, visível, infravermelho próximo e infravermelho. Os espectrômetros geralmente apresentam uma faixa diferenciada de espectros, expressa em nanômetros, conforme a Tabela 4.

Tabela 8 – Faixas de espectros eletromagnéticos

Espectro Eletromagnético	Faixa em nanômetros –(nm)
Ultravioleta	< 400
Visível	400 até 800
Infravermelho Próximo	800 até 2500
Infravermelho	> 2500

Fonte: (SILVA, 2006)

Um espectro de absorção/reflexão pode ser determinado com um espectrofotômetro, que consiste de uma fonte luminosa, um monocromador que contém o seletor de comprimentos de onda, tipo prisma, um receptáculo para amostras, um fotodetector e uma impressora ou computador. O comprimento de onda emitido pelo monocromador pode ser alterado pela rotação do prisma; o gráfico de absorbância (A) versus comprimento de onda (λ) é denominado de espectro (TAIZ e ZEIGER, 2004, citado por NISGOSKI, 2005). A Figura 4 apresenta

o diagrama esquemático de um espectrômetro.



Figura 4 – Diagrama esquemático de espectrômetro

De forma resumida e simplificada, os espectrômetros são aparelhos que compreendem uma fonte de energia radiante, um sistema colimador (fenda, lentes etc.), um local destinado à amostra, um sistema monocromador e um sistema detector (WIKIPEDIA, 2006b).

A região espectral do infravermelho compreende uma radiação com números de onda num intervalo de 12.800 a 10 cm^{-1} . Por ser uma faixa muito extensa é convenientemente dividir a região em infravermelho próximo (12.800 a 4.000 cm^{-1}), infravermelho médio (4.000 a 200 cm^{-1}) e infravermelho distante (200 a 10 cm^{-1}) (CUNHA, 2006)

Dentre os métodos baseados nas propriedades óticas da madeira e do carvão incluem-se os estudos de interações do material com a radiação eletromagnética, compreendida na faixa de comprimentos de onda entre 300 e 15.000 nm, ou seja, desde o ultravioleta até o infravermelho distante, passando pelo visível (400-700 nm). Essa radiação pode ser refletida por materiais sólidos, na forma de espelhos, prismas e lentes, e compõe a gama das radiações óticas (SWAIN e DAVIS, 1978).

É bastante comum o uso da espectroscopia de reflectância difusa na região do infravermelho próximo, na faixa de 1000 a 2500 nm, mais comumente conhecido com NIRS, do inglês: *Near Infrared Spectroscopy*. A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) é a medição do comprimento de onda e intensidade da

absorção de luz infravermelha próxima realizada por uma amostra, na faixa de 800-2500 nm. Esta técnica é muito usada na medição quantitativa de grupos funcionais orgânicos (especialmente C-H, N-H, C=C, C≡C, C=O etc.) e se apresenta como uma técnica rápida e eficiente em diversos campos de aplicação. As informações apresentadas no espectro infravermelho próximo podem ser empregadas para estimar a concentração de determinada substância ou uma propriedade física, dependendo da intensidade e/ou comprimento de onda dos espectros produzidos pela amostra (NISGOSKI, 2005).

A espectroscopia no infravermelho se baseia na frequência de vibração das ligações químicas das substâncias que correspondem a níveis de energia da molécula; nesse caso, são chamados de níveis vibracionais. Tais frequências dependem da forma, superfície de energia potencial da molécula, geometria molecular, massas dos átomos e, eventualmente, do acoplamento vibrônico (WIKIPÉDIA, 2006b).

Os resultados obtidos pela técnica do infravermelho próximo vão sempre depender da existência de métodos de referência adequados e aceitáveis, uma vez que, na fase de construção do modelo, o método direto baseado no NIR precisa ser capaz de identificar as características do espectro ou a combinação daquelas características que estejam correlacionadas para determinar a variável analisada. A diferença entre o sucesso e a “falha” é diretamente dependente da qualidade dos valores de referência, associados às amostras na fase inicial de informação. (NISGOSKI, 2005)

A tecnologia NIRS foi desenvolvida em meados dos anos 1970 pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. A primeira aplicação foi feita com proteína, em trigo, e gordura/óleo, em soja, para permitir que as estações de manuseio de grãos pudessem remunerar os fazendeiros, de acordo com o teor de proteína/óleo e segregar o trigo em diferentes silos, uma vez que os métodos clássicos de análise eram muito lentos para esse trabalho (SILVA, 2006). Dessa forma, o NIRS tem um forte retorno no segmento agrícola e já tem comprovada sua eficácia. Outros segmentos da indústria têm procurado outras aplicações, no controle de processo e controle de qualidade dos produtos (SILVA, 2006). Atualmente, a espectroscopia no infravermelho é largamente usada tanto na

indústria quanto na pesquisa científica no mundo todo, pois ela é uma técnica rápida e confiável para medidas, controle de qualidade e análises dinâmicas. Os equipamentos modernos são reduzidos e podem ser transportados para medidas de campo (WIKIPÉDIA, 2006b).

No Brasil, a aplicação da espectroscopia no infravermelho próximo tem sido focada na análise de solos, controle de qualidade de medicamentos, lubrificantes, entre outros. No setor florestal, os estudos, ainda, estão numa fase incipiente. A maior parte dos estudos qualitativos e quantitativos é realizada na faixa do espectro do infravermelho próximo. Essa técnica tem sido intensivamente utilizada para determinação de propriedades químicas e tecnológicas de interesse para a indústria de papel e celulose, ao redor do mundo (MICHELL e HIGGINS, 2002). Como exemplo de aplicação efetiva da técnica no Brasil, pode-se citar o “Projeto Genolyptus” que objetiva o mapeamento genético de algumas espécies do gênero *Eucalyptus*. O projeto envolve uma série de empresas e instituições de pesquisa, incluindo a Universidade Federal de Viçosa, representada pelo Laboratório de Celulose e Papel do Departamento de Engenharia Florestal. Recentemente foi adquirido um espectrômetro de infravermelho para realização de parte dos trabalhos de caracterização dessa madeira. Várias empresas do ramo de celulose e papel, sediadas no Brasil, já possuem seus próprios espectrômetros e têm utilizado o NIRS em seus programas de melhoramento genético (ABRAHÃO, 2006). O presente trabalho se apresenta como pioneiro, buscando uma correlação das informações obtidas pela espectroscopia no infravermelho próximo com as características do carvão vegetal.

As análises com NIRS envolvem um ou mais softwares estatísticos, que possibilitam a identificação, qualificação e quantificação das amostras. NIRS é um dos métodos laboratoriais e industriais mais rápidos de análise química disponível no mercado. Usando NIRS, Schimleck et al. (1999) relataram sucessos no desenvolvimento de um modelo de calibração para a madeira, na forma de serragem para a predição da massa específica básica da madeira de *Eucalyptus globulus*.

Raymond e Schimleck (2002) demonstraram que o teor de celulose da madeira de *Eucalyptus globulus*, também, pode ser determinado através do NIRS, sobre a serragem. Fardim et al. (2002) obtiveram bons resultados em calibrações

com o NIRS para a predição de propriedades físico-químicas de polpas celulósicas kraft não branqueadas de *Eucalyptus grandis*. Nesse trabalho, a irradiação foi feita diretamente sobre a polpa, na forma de folhas de papel. Thum e Meder (2001), irradiando diretamente a madeira sólida de *Pinus radiata*, na forma de corpos de prova, obtiveram bons resultados em seus modelos de calibração com NIRS, para a predição do módulo de elasticidade na flexão. Gindl et al. (2001), também irradiando NIRS na madeira sólida de *Larix occidentalis*, na forma de corpos de prova, demonstraram que o NIRS uma excelente ferramenta para estimar os módulos de ruptura e da elasticidade na flexão e na resistência à compressão. Nisgoski (2005), irradiando o NIRS diretamente em cubos de madeira sólida de *Pinus taeda*, obteve bons resultados na validação para prever massa específica básica ($R^2=0,79$) e comprimento dos traqueóides ($R^2=0,65$) e das propriedades de arrebentamento ($R^2=0,79$), tração ($R^2=0,77$) e rasgo do papel ($R^2=0,70$). Não encontrou, no entanto, modelos com boas correlações para largura dos traqueóides, espessura da parede celular, coeficiente de flexibilidade e fração parede da madeira e dos índices enfiamento, Runkel e arrebentamento do papel. Abrahão (2006), investigando as correlações entre os espectros de reflectância no UV-Vis e as propriedades da madeira de *Eucalyptus urophylla* encontrou modelos que apresentaram boas correlações ($R^2=0,89$) para determinação da massa específica da madeira. Não encontrou, no entanto, modelos adequados para explicar a rugosidade, dureza e resistência à compressão da madeira.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Propriedades da Madeira e Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, ambos pertencentes ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Estado de Minas Gerais.

3.1 Amostragem da madeira

Foram utilizadas 12 espécies de madeira. Entre as espécies do gênero *Eucalyptus* utilizaram-se as espécies *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus cloeziana* e um clone de *Eucalyptus urophylla* provenientes de plantios comerciais da Vallourec & Mannesmann do Brasil, do município de Paraopeba - MG, com idade de cinco anos. Utilizaram-se, também, peças comerciais de *Eucalyptus* spp de origem e idade desconhecida. Dentre as espécies nativas, o pau-jacaré (*Piptadenia gonoacantha*) foi proveniente do município de Viçosa – MG, de idade desconhecida. As demais espécies nativas, pequi (*Caryocar brasiliense*), pau terra (*Qualea grandiflora*), ingá (*Inga laurina*), tingui (*Magonia pubescens*), sucupira (*Bowdichia virgiloides*) e baru (*Dipterix alata*) foram coletadas em região de Cerrado mineiro, no município de Paraopeba – MG, de idade desconhecida. As amostras de madeira, oriundas de várias seções da

árvore, foram convertidas em discos.

3.2 Caracterização da madeira

Massa específica básica: A determinação da massa específica básica foi realizada através do método da balança hidrostática, descrito por VITAL, 1984. Utilizaram-se duas cunhas, diametralmente opostas de cada disco. Após a saturação das amostras em água, determinou-se a massa, correspondente ao volume de água deslocado de cada amostra na balança de precisão de 0,01g. Após isso, as amostras foram levadas para estufa a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ para secagem até peso constante, onde foram pesadas. A equação utilizada para determinação da massa específica básica foi:

$$D = \frac{M}{V}$$

Em que:

M = Massa seca após a secagem em estufa ($105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$) em g;

V = Volume de água deslocada, em ml (equivalente à massa da água deslocada com a imersão das amostras saturadas)

3.3 Preparação das amostras para carbonização

Sem remover as cascas, os discos foram divididos em várias seções no seu corte transversal. Antes de sofrer a carbonização, a madeira foi totalmente seca em estufa, a uma temperatura de $105 \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$. As espécies estudadas foram carbonizadas em laboratório, utilizando três temperaturas finais (350, 450 e $550\text{ }^{\circ}\text{C}$), sob condições controladas, com o objetivo de avaliar a variabilidade das propriedades do carvão. A taxa de aquecimento utilizada foi de $1,66\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ para todos as marchas de carbonização. Nas marchas de carbonização apresentadas na Tabela 9, o material carbonizado permaneceu na temperatura final por duas horas.

Tabela 9 – Marcha de carbonização para todas as espécies

Espécies	Temperatura Final (°C)	Tempo de carbonização (horas)	Marchas de carbonização*	Temperatura de exposição/hora
<i>E. spp.</i> , <i>E. cloeziana</i> , <i>E. urophylla</i> , <i>E. camaldulensis</i> , <i>E. urophylla</i> (clone), <i>Caryocar brasiliense</i> , <i>Qualea grandiflora</i> , <i>Magonia pubescens</i> , <i>Inga laurina</i> , <i>Bowdichia virgiloides</i> , <i>Piptadenia gonoacantha</i> , <i>Dipteryx alata</i>	350 °C	4:00	Marcha “1”	(150, 250, 350 °C)
	450 °C	5:00	Marcha “2”	(150, 250, 350, 450 °C)
	550 °C	6:00	Marcha “3”	(150, 250, 350, 450, 550 °C)

3.3.1 Análise química imediata

Os procedimentos utilizados para a análise química imediata foram realizados segundo as normas ASTM D-1762-64 e ABNT NBR 8112/83. Na aplicação desta última norma foram adotadas, como normas complementares, a NBR 5734/83 e NBR 6923/81. O carvão foi moído e depois peneirado; o material utilizado para análise é o que ficou retido entre as peneiras de 40-60 mesh. Posteriormente, este material foi levado para a estufa.

3.3.1.1 Teor de matérias voláteis

Utilizou-se 1 g do carvão moído seco que foi colocado no cadinho de porcelana, tampado. Foi levado à mufla previamente aquecida a 950 ± 10 °C e colocado junto à porta da mufla, por três minutos; em seguida, o material foi colocado no interior da mufla (com as portas fechadas), por oito minutos; após isso, a amostra foi retirada e colocada em dessecador para ser resfriada, durante trinta minutos, sendo finalmente pesada em balança analítica.

O teor de matérias voláteis do carvão vegetal foi calculado pela equação abaixo.

$$MV = \frac{M_s - M_f}{M_s} \times 100$$

MV = Teor de matérias voláteis, em %;

Ms = Massa inicial da amostra seca em estufa, em g;

Mf = Massa final da amostra, em g.

A determinação do teor de matérias voláteis do carvão foi feita em duplicata e a análise foi repetida quando os resultados diferiram entre si em valores relativos superiores a 2%.

3.3.1.2 Teor de cinzas

Utilizou-se 1 g do carvão moído que foi colocado no cadinho de porcelana e levado a uma mufla, previamente aquecida, a $600\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ por um período de seis horas até a sua completa calcinação. A amostra foi retirada e deixada para esfriar no dessecador, por trinta minutos, sendo então pesada.

O teor de cinzas do carvão vegetal foi calculado pela equação abaixo:

$$CZ = \frac{Ms}{Mr} \times 100$$

em que,

CZ = Teor de cinzas no carvão, em %;

Mr = Massa do resíduo (cinzas), em g;

Ms = Massa da amostra seca em estufa (1 g).

A determinação do teor de cinzas do carvão foi feita em duplicata e as análises foram repetidas quando os resultados diferiram entre si em valores relativos superiores a 10%.

3.3.1.3 Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo é uma medida indireta e foi calculado pela equação abaixo:

$$CF = 100 - (CZ + MV)$$

Em que,

CF = Teor de carbono fixo, em %;

CZ = Teor de cinzas no carvão, em %;

MV = Teor de matérias voláteis, em %.

3.3.2 Poder Calorífico do Carvão

A determinação do poder calorífico superior do carvão foi obtida, experimentalmente, através da bomba calorimétrica adiabática, baseada no princípio de Berthelot, onde a combustão se processa em ambiente fechado, na presença de oxigênio e sob pressão. No caso, o poder calorífico é computado a partir das diferenças de temperatura coletadas antes e após a combustão. Os procedimentos utilizados para o cálculo do poder calorífico superior foram realizados conforme a norma ASTM D-2015-66.

3.3.3 Massa Específica Aparente do Carvão

Para a realização da massa específica aparente adotou-se um procedimento diferente da norma. A massa específica aparente do carvão foi obtida através da imersão das peças de carvão em mercúrio e sua posterior pesagem. Justificou-se este procedimento devido à pequena quantidade de material disponível para análise. Esta metodologia foi utilizada por Oliveira et al. (1982)

A equação utilizada para cálculo da massa específica aparente do carvão foi

$$DA = \frac{Mc}{(Vd/13,6)}$$

em que,

DA = Massa específica aparente, em g/cm³.

Mc = Massa de carvão, em g.

Vd = Empuxo provocado pelo deslocamento do mercúrio, em g.

O resultado de cada repetição foi obtido a partir da média de três amostras de carvão.

3.3.4 Delineamento experimental

Para verificar o efeito das marchas de carbonização e da espécie nas

propriedades do carvão foi instalado um experimento seguindo um fatorial, com três marchas de carbonização, doze espécies e quatro repetições, totalizando 144 amostras. Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA); quando estabelecida significância, os tratamentos (espécie e marcha de carbonização) foram comparados entre si por meio do teste Tukey a 5% de probabilidade. Utilizou-se o software SAEG para realizar a análise de variância e os testes de médias.

3.4 Registro dos espectros do carvão

Os espectros de reflectância das amostras foram obtidos a partir do carvão moído, com o auxílio de uma lixa, de granulometria 100, rotineiramente utilizada para lixagem de metais. Tal tipo de lixa é bastante resistente e não deixa resíduos no carvão moído que, eventualmente, poderiam contaminar as amostras. As peças de carvão foram submetidas ao atrito contra esta lixa, sendo os movimentos realizados no sentido longitudinal da peça, correspondente à direção das fibras na madeira. O pó obtido foi recolhido e colocado em recipiente plástico com tampa. Para cada amostra, utilizou-se uma lixa, a fim de se evitar contaminação das amostras. Utilizaram-se alguns gramas para realização das leituras.

As leituras espectrais nas amostras foram realizadas no próprio recipiente plástico; o sensor e a amostra foram separados por uma peça em vidro (adaptado na tampa plástica), padronizando-se a distância entre o sensor e a amostra, no momento da leitura.

Os espectros foram tomados em três faixas espectrais: ultravioleta, visível e infravermelho próximo. Como referência nas leituras, utilizou-se o pó de grafite, uma vez que a reflectância obtida no aparelho é um valor relativo. A Figura 5 exemplifica o esquema realizado para a tomada dos espectros nas amostras de carvão.

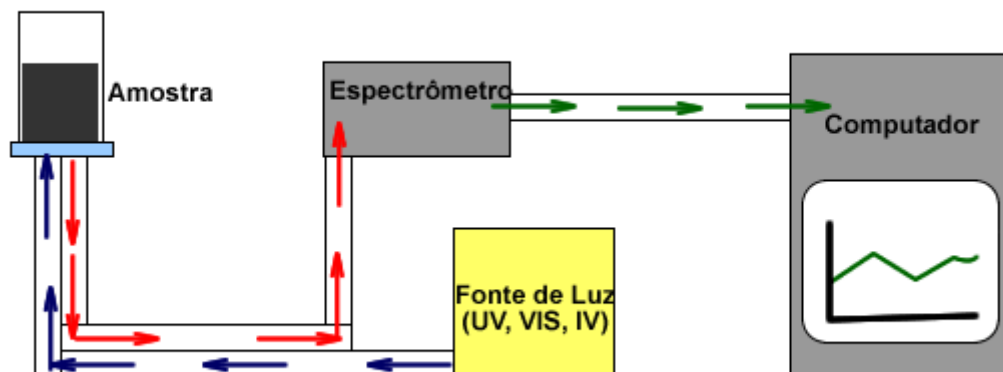


Figura 5 – Esquema de realização das leituras nas amostras de carvão

Os espectrômetros utilizados foram o USB2000, para o UV-Vis, e o NIR 150, para o NIR, ambos produzidos pela empresa norte-americana Ocean Optics. São equipamentos portáteis, produzidos para serem operados em campo ou laboratório, devido à fácil mobilidade. Complementam o sistema um microcomputador, uma fonte de luz e uma sonda de reflectância, acoplada a um cabo ótico.

3.5 Metodologia de configuração do software para aquisição dos espectros

Para a aquisição dos espectros, fez-se uso dos espectrômetros controlados pelo software OOIBASE 32. Os procedimentos utilizados neste trabalho foram similares aos utilizados por Abrahão (2006). Antes de se obter os espectros, estabeleceram-se alguns parâmetros de amostragem. Esses parâmetros, discriminados a seguir, foram configurados no próprio software:

1 - Tempo de integração (*Integration time*): pode variar de 1 a 65.000 milissegundos. Esse parâmetro define quanto tempo o detector deve estar ativo para obter o espectro, ou seja, a quantidade de energia que deve receber, à semelhança do tempo de exposição numa uma câmera fotográfica. Tempos de integração mais altos são indicados para amostras que apresentam baixa reflectância em toda a faixa de trabalho do aparelho, como é o caso do carvão vegetal. Um aumento no

tempo de exposição implica num aumento na relação do sinal/ruído. Utilizou-se como parâmetro o valor de 500.

2 - Número de tomadas (*average*): O número de tomadas pode variar de 1 a 10.000. Significa o número de espectros a ser tomado para se obter um espectro médio. Quanto maior este valor, menores serão as oscilações no espectro obtido. Utilizou-se como parâmetro o valor de 10.

3 - Amplitude do filtro da média móvel (*Boxcar*): Pode variar de 1 a 500. O filtro de média móvel consiste em se atribuir à reflectância valores que são médias de valores de pontos adjacentes, num ponto da curva espectral. É também um método para se reduzir o ruído. Amplitudes muito grandes tendem a deformar o espectro obtido, anulando a possibilidade de se obter informações úteis a partir dos dados. Utilizou-se como parâmetro o valor de 5.

4 - Correção do ruído elétrico (*Correct for electrical noise*): Os primeiros 24 pixels do detector do aparelho não respondem à luz, mas produzem um sinal elétrico que se soma aos outros ruídos no sistema. Acionando a correção do ruído elétrico, a média destes 24 pixels é subtraída de todos demais. Utilizou-se como parâmetro o valor apresentado como correção do ruído.

3.5.1 Calibração do aparelho

A calibração consiste em se tomar dois espectros como referência, sendo um máximo e um mínimo. O espectro de referência máximo (claro) é obtido a partir da irradiação de uma substância padrão com a lâmpada acesa. No caso do carvão vegetal, o padrão utilizado foi o pó de grafite, conforme mencionado anteriormente. O espectro de referência mínimo (escuro) foi obtido com o sensor coberto (impedindo entrada de luz) e com a lâmpada do aparelho desligada. O espectro da referência escura deve ser subtraído dos espectros das amostras obtidos com a luz acesa. O resultado da subtração é dividido pelo espectro da linha de base e multiplicado por 100, fornecendo o espectro da amostra.

A calibração é realizada no modo “Scope”, que é ativado quando se inicia o programa de controle do aparelho. Sempre que, por qualquer motivo, o programa for reiniciado, faz-se necessária a abertura dos arquivos onde foram gravados os

espectros de referência clara e escura. Assim, antes de registrar os espectros das amostras sob estudo, o modo “Scope” do programa de controle deverá estar ativado para realizar a calibração do aparelho.

É necessária uma atenção especial nos registros de arquivos das referências claras e escuras, uma vez que os resultados são sempre expressos de maneira relativa a tais referências. Na faixa do infravermelho próximo, onde os resultados foram satisfatórios, obtiveram-se espectros compreendidos na faixa de 1230 a 2090 nm, em intervalos de, aproximadamente, quatro (4) nm.

3.5.2 Estimativa das propriedades do carvão com NIR

Para a estimativa das propriedades do carvão vegetal, através da espectroscopia, alguns procedimentos foram realizados:

1. Eliminação de certas regiões espectrais – são as regiões do espectro onde as variações nas concentrações dos componentes da mistura não causam variações na absorbância. A eliminação dessas regiões reduz o número de dados e o tempo necessário para realizar todos os cálculos de calibração. Na faixa do infravermelho próximo, eliminaram-se as faixas abaixo de 1500 nm e acima de 2000 nm, pois não se verificaram variações consideráveis nestas faixas. Além disso, ocorreu também um aumento do ruído nas leituras fora da faixa compreendida entre 1500-2000 nm.

2. Utilização de modelos lineares e não lineares.

3. Relação sinal-ruído – a relação é dada pela razão entre a amplitude média do sinal e o desvio padrão do sinal medido. De forma geral, pode-se dizer que a precisão de uma medida espectroscópica é limitada pelas incertezas ou ruídos associados ao instrumento utilizado. Na região do infravermelho, a relação sinal-ruído foi satisfatória, não acarretando problemas nas leituras realizadas com espectrômetro; entretanto, nas faixas do visível e ultravioleta, a relação sinal-ruído foi muito grande e, provavelmente, foi um dos motivos do insucesso das leituras realizadas nestas faixas.

Para a estimativa das propriedades do carvão, utilizaram-se os resultados obtidos nas amostras (pelo método tradicional), como variáveis dependentes. As

variáveis independentes foram obtidas a partir das seguintes faixas de espectros:

- Média da reflectância entre 1500-2000 nm (faixa maior);
- Média da reflectância entre 1500-1600 nm;
- Média da reflectância entre 1700-1800 nm;
- Média da reflectância entre 1900-2000 nm.

A seleção das faixas foi escolhida por observação visual dos espectros. Como procedimento inicial, separou-se uma faixa maior, eliminando-se os ruídos que são comuns geralmente no início e final dos limites de leitura do aparelho, chegando-se a um valor entre 1500-2000 nm. Após isto, subdividiu-se esta faixa em três faixas menores de 100 nm (1500-1600, 1700-1800 e 1900-2000 nm) separadas entre si por um intervalo 100 nm. A redução das faixas foi realizada a fim de se verificar a existência de uma região do infravermelho próximo que apresentasse uma melhor correlação com as propriedades do carvão, permitindo o uso de aparelhos de faixa estreita e baixo custo, em trabalhos posteriores.

Ajustaram-se os modelos de regressão para cada variável independente e dependente e testaram-se inúmeros modelos (modelos na tabela 64 nos Anexos) , fazendo-se uso do software Curve-Expert, versão 1.3. Os modelos que apresentaram os melhores resultados foram selecionados e tabulados, apresentando suas constantes (a,b,c), coeficiente de correlação (R) e seu erro padrão da regressão (S). Os modelos foram ajustados pelas faixas de comprimento de onda pré-definidas. Do total das amostras, cerca de três quartos das amostras (96) foram utilizadas para calibração e um quarto das amostras (36) para validação. Para o ajuste do modelo individual por espécie foram utilizadas oito (8) amostras para calibração e três (3) amostras para validação

É importante destacar que cada amostra utilizada no modelo de calibração apresentou uma variável y (propriedade medida: carbono fixo, cinzas, etc.) associada a uma variável x (valor médio de reflectância em %), cujos valores foram utilizados para realizar o ajuste do modelo. É importante salientar que o modelo selecionado foi escolhido, numa escala de prioridade, pela simplicidade do modelo, pelo coeficiente de correlação e pelo erro padrão da calibração.

O erro padrão da calibração e da validação foi calculado pela equação:

$$EPC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{(n-p-1)}}$$

onde:

EPC = erro padrão da calibração

e_i = diferença entre a propriedade obtida pelo método tradicional e aquele estimado pela equação de calibração/validação;

p = número de variáveis independentes utilizadas no modelo de regressão;

n = número de amostras usadas na calibração/validação

O erro padrão da predição foi calculado pela equação:

$$EPP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i - \bar{e}}{(n-1)}}$$

EPP = erro padrão da predição

e_i = diferença entre a propriedade obtida pelo método tradicional e aquele estimado pela equação de calibração;

n = número de amostras usadas na calibração;

\bar{e} = valor médio das diferenças entre os valores observados e os valores estimados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Massa específica básica

A Tabela 10 apresenta os resultados de massa específica básica das madeiras analisadas. Entre as espécies nativas, o baru (*Dipteryx alata*) apresentou a maior massa específica básica ($0,67 \text{ g/cm}^3$) e o pau-terra (*Qualea grandiflora*) apresentou o menor valor de massa específica básica ($0,41 \text{ g/cm}^3$). Entre as espécies de eucalipto, o maior valor de massa específica básica encontrado foi de *E. cloeziana* ($0,64 \text{ g/cm}^3$) e o menor valor encontrado foi de *E. urophylla* (clone), com $0,53 \text{ g/cm}^3$. Interessante salientar ainda que o *E. camaldulensis* apresentou um valor elevado de massa específica básica ($0,62 \text{ g/cm}^3$), com resultados muito próximos ao *E. cloeziana*. As espécies de eucalipto apresentaram pouca variação entre si em relação à massa específica; no entanto, observou-se uma variação maior entre os eucaliptos e as demais espécies nativas estudadas.

A grande diferença existente entre os valores encontrados de massa específica básica reflete a grande variabilidade entre as espécies, como resultado de sua constituição anatômica e química. Outros fatores, como os genéticos, ambientais e fisiográficos podem influenciar nas propriedades da madeira e, conseqüentemente, na qualidade do carvão.

Tabela 10 – Massa específica básica média (g/cm³) da madeira de diferentes espécies nativas e de eucalipto.

Espécie	Massa específica básica média (g/cm³)	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
<i>Eucalyptus spp</i>	0.62	0.022	3.56
<i>E. cloeziana</i>	0.64	0.012	1.82
<i>E. urophylla</i>	0.59	0.022	3.85
<i>E. camaldulensis</i>	0.62	0.033	5.42
<i>E. urophylla (clone)</i>	0.53	0.014	5.12
<i>Caryocar brasiliense</i> (pequi)	0.60	0.031	6.20
<i>Qualea grandiflora</i> (pau terra)	0.41	0.016	3.95
<i>Magonia pubescens</i> (tingui)	0.61	0.030	4.98
<i>Inga laurina</i> (ingá)	0.59	0.060	10.25
<i>Bowdichia virgiloides</i> (sucupira)	0.63	0.036	5.78
<i>Piptadenia gonoacantha</i> (jacaré)	0.59	0.013	2.27
<i>Dipteryx alata</i> (baru)	0.67	0.010	1.42

4.2 Carbono fixo

A análise de variância indicou que o teor de carbono fixo dos carvões foi afetado pela espécie e temperatura final de carbonização. Não houve efeito significativo da interação, conforme pode ser observado na Tabela 56 (Anexo).

A Tabela 11 apresenta os valores médios do teor de carbono fixo em função da espécie.

Tabela 11 – Valores médios do teor de carbono fixo em função da espécie

Espécie	Carbono fixo (%)
<i>E. camaldulensis</i>	72,79 a
<i>E. urophylla (clone)</i>	71,91 ab
<i>E. cloeziana</i>	70,84 abc
<i>Magonia pubencens</i>	70,13 abc
<i>Piptadenia gonoacantha</i>	70,07 abc
<i>Inga laurina</i>	69,71 abc
<i>Eucalyptus spp.</i>	69,44 abc
<i>E. urophylla</i>	69,31 abc
<i>Caryocar brasiliense</i>	68,25 abcd
<i>Bowdichia virgiloides</i>	67,63 bcd
<i>Dipteryx alata</i>	66,76 cd
<i>Qualea grandiflora</i>	64,03 d

*Médias ao longo da coluna seguidas das mesmas letras minúsculas não diferem entre si significativamente entre si pelo teste Tukey a 95% de probabilidade

Observa-se que entre os eucaliptos, o maior teor de carbono fixo foi obtido com a madeira de *Eucalyptus camaldulensis* (72,79%), enquanto que o menor valor foi observado no carvão de *Eucalyptus urophylla* (69,31%); contudo, a diferença entre eles não foi significativa. Provavelmente, não se detectaram diferenças significativas entre as espécies de eucalipto, por se tratar de espécies do mesmo gênero com valores de massa específica básica próximos. A diferença entre a maior e a menor massa específica básica das madeiras de eucalipto foi de apenas 0,11 g/cm³; era de esperar, portanto, pouca variação nos teores de carbono fixo entre as espécies de eucalipto.

Entre as espécies nativas, o maior teor de carbono fixo foi obtido com a carbonização de *Magonia pubencens* (70,13%), contudo a média não diferiu significativamente das demais, exceto por *Qualea grandiflora* (64,03%). A *Qualea grandiflora* foi à espécie que apresentou menor teor de carbono fixo provavelmente em função de suas propriedades químicas e físicas. Essa espécie em questão já se mostrou diferente das demais quando apresentou a menor massa específica básica (0,41 g/cm³).

Quando se analisaram todas as espécies, o menor valor médio foi observado por *Qualea grandiflora* (64,03%) que, contudo não diferiu dos valores médios do teor de carbono fixo do *Dypteryx alata* (66,76%), *Bowdichia virgiloides* (67,63%), e *Caryocar brasiliense* (68,25%). O maior valor médio foi do *Eucalyptus camaldulensis* (72,79%) que não diferiu das demais espécies, a exceção da *Qualea grandiflora*, *Dypteryx alata* e *Bowdichia virgiloides*. Observou-se que o grupo de madeiras de eucalipto apresentou maiores teores em carbono fixo do que o grupo de madeira das espécies nativas.

A Tabela 12 apresenta os valores médios do teor de carbono fixo em função da marcha de carbonização. Conforme verificado, observou-se diferença significativa entre as marchas. Ocorreu um aumento dos valores médios do teor de carbono fixo com o aumento do tempo e da temperatura final de carbonização. Para a “marcha 1” observou-se um valor médio para o teor de carbono fixo de 60,12%, para a “marcha 2”, um valor de 69,72%, e para a “marcha 3”, um valor de 77,88%. Durante o processo de carbonização, quanto maior a exposição da madeira ao tempo e temperatura, maior foi a eliminação das matérias voláteis, refletindo diretamente no aumento percentual do teor de carbono fixo do carvão. Observou-se ainda que o aumento do teor de carbono fixo foi maior quando se passou da “marcha 1” (350°C) para “marcha 2” (450 °C) quando comparado com aumento observado da “marcha 2” (450 °C) para a “marcha 3” (550 °C).

Tabela 12 – Valores médios do teor de carbono fixo em função da marcha de carbonização

Carbonização	Carbono fixo (%)
<i>Marcha 3 (550 °C)</i>	77,88 a
<i>Marcha 2 (450 °C)</i>	69,72 b
<i>Marcha 1 (350 °C)</i>	60,12 c

*Médias ao longo da coluna seguidas das mesmas letras minúsculas não diferem entre si significativamente entre si pelo teste Tukey a 95% de probabilidade

4.3 Matérias Voláteis

A análise de variância indicou que o teor de matérias voláteis dos carvões foi afetado pela espécie e temperatura final de carbonização. Não houve efeito significativo da interação, conforme pode ser observado Tabela 54 (Anexo). A Tabela 13 apresenta os valores médios do teor de matérias voláteis em função da espécie.

Tabela 13 – Valores médios do teor de matérias voláteis em função da espécie

Espécie	Matérias voláteis (%)
<i>Qualea grandiflora</i>	30,30 a
<i>Dipteryx alata</i>	30,09 ab
<i>Eucalyptus spp</i>	29,39 ab
<i>E. cloeziana</i>	28,36 abc
<i>Caryocar brasiliense</i>	28,03 abc
<i>E. urophylla</i>	27,20 abc
<i>Bowdichia virgiloides</i>	27,09 abc
<i>Inga laurina</i>	27,02 abc
<i>E. urophylla (clone)</i>	26,86 abc
<i>Piptadenia gonoacantha</i>	26,10 abc
<i>E. camaldulensis</i>	25,51 bc
<i>Magonia pubencens</i>	24,64 c

*Médias ao longo da coluna seguidas das mesmas letras minúsculas não diferem entre si significativamente entre si pelo teste Tukey a 95% de probabilidade

Observou-se que entre os carvões produzidos a partir da madeira eucalipto, o maior teor de matérias voláteis foi obtido em *Eucalyptus spp* com teor médio igual a 29,39%, enquanto que o menor valor foi no carvão de *E. camaldulensis* (25,51%), contudo a diferença entre eles não foi significativa estatisticamente. Provavelmente, a inexistência de tais diferenças se deve à semelhança da composição química da madeira das espécies desse gênero.

Entre as espécies nativas, o maior teor médio de matérias voláteis do carvão foi obtido de *Qualea grandiflora* (30,30%) que não diferiu significativamente das demais espécies, com exceção da espécie *Magonia pubencens*, que apresentou menor teor médio de matérias voláteis (24,64%). Tais espécies apresentaram

situação inversa quando se analisou o teor de carbono fixo do carvão e esses resultados estão em consonância com os obtidos em literatura, onde o teor de carbono fixo possui correlação negativa com o teor de matérias voláteis.

Quando se analisam todas as espécies, o menor teor médio de matérias voláteis obtido foi do carvão da *Magonia pubescens* (24,64%), que apresentou diferença significativa entre *Eucalyptus spp.* (29,39%), *Dypteryx alata* (30,09%) e *Qualea grandiflora* (30,30%).

A Tabela 14 apresenta os valores médios do teor de matérias voláteis por marcha de carbonização. Conforme verificado, observou-se diferença significativa entre as marchas, pelo teste Tukey, a 95% de probabilidade. Observou-se uma redução dos valores médios do teor de matérias voláteis com o aumento do tempo e da temperatura final de carbonização. Para a “marcha 1” verificou-se um valor médio para o teor de matérias voláteis de 36,75%, para a “marcha 2” um valor de 27,08% e para a “marcha 3” um valor de 18,81%. Justifica-se tal comportamento, pois, 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 matérias voláteis. Observou-se ainda que o aumento do teor de matérias voláteis foi maior quando se passou da “marcha 1” (350°C) para “marcha 2” (450 °C) quando comparado com aumento observado da “marcha 2” (450 °C) para a “marcha 3” (550 °C).

Tabela 14 – Valores médios do teor de matérias voláteis em função da marcha de carbonização

Carbonização	Matérias voláteis (%)
<i>Marcha 1 (350 °C)</i>	36,75 a
<i>Marcha 2 (450 °C)</i>	27,08 b
<i>Marcha 3 (550 °C)</i>	18,81 c

*Médias ao longo da coluna seguidas das mesmas letras minúsculas não diferem entre si significativamente entre si pelo teste Tukey a 95% de probabilidade

4.4 Cinzas

A análise de variância indicou que o teor de cinzas dos carvões foi afetado pela espécie. Não houve efeito significativo da marcha de carbonização e da interação, conforme pode ser observado na Tabela 55 (Anexo). A Tabela 15 apresenta os valores médios do teor de cinzas do carvão em função da espécie.

Tabela 15 – Valores médios para o teor de cinzas (%) do carvão em função da espécie

Espécie	Cinzas (%)
<i>Qualea grandiflora</i>	5,66 a
<i>Bowdichia virgiloides</i>	5,26 ab
<i>Magonia pubencens</i>	5,22 ab
<i>Piptadenia gonoacantha</i>	3,83 bc
<i>Caryocar brasiliense</i>	3,71 bc
<i>E. urophylla</i>	3,48 c
<i>Inga laurina</i>	3,26 cd
<i>Dipteryx alata</i>	3,13 cd
<i>E. camaldulensis</i>	1,68 de
<i>E. urophylla (clone)</i>	1,22 e
<i>Eucalyptus spp</i>	1,15 e
<i>E. cloeziana</i>	0,87 e

*Médias ao longo da coluna seguidas das mesmas letras minúsculas não diferem entre si significativamente entre si pelo teste Tukey a 95% de probabilidade

Entre as madeiras de eucalipto, observou-se que o maior teor de cinzas do carvão foi obtido em *Eucalyptus urophylla* (3,48%) que apresentou diferença significativa com todas as outras espécies. O menor valor foi observado em *Eucalyptus cloeziana* (0,87%) que não diferiu significativamente das demais espécies, com exceção a espécie *Eucalyptus urophylla*. O carvão proveniente das madeiras de eucalipto estudadas apresentou baixo teor de cinzas, quando comparado com o carvão proveniente de madeira de outros gêneros.

Entre as espécies nativas, o maior teor de cinzas foi obtido com a carbonização da madeira de *Qualea grandiflora* (5,66%), que diferiu significativamente das demais espécies, à exceção de *Bowdichia virgiloides* (5,26%) e *Magonia pubencens* (5,22%). O menor teor de cinzas do carvão foi obtido com a

carbonização da madeira *Dypteryx alata* (3,13%), que diferiu significativamente das demais espécies, à exceção do *Inga laurina* (3,26%), *Caryocar brasiliense* (3,71%) e *Piptadenia gonoacantha* (3,83%). Observou-se que o carvão proveniente da madeira das espécies nativas estudadas apresentou valores médios no teor de cinzas acima de 3,00%, provavelmente devido à maior proporção de casca e características químicas das espécies estudadas.

Analisando as espécies em conjunto, o menor teor médio em cinzas foi observado para o carvão de *Eucalyptus cloeziana* (0,87%), que não diferiu dos valores médios do teor de cinzas do *Eucalyptus spp.* (1,15%), *Eucalyptus camaldulensis* (1,68%) e do *Eucalyptus urophylla* clonado (1,22%). O maior valor observado foi de *Qualea grandiflora*, que diferiu significativamente de todas as espécies, à exceção da *Bowdichia virgiloides* (5,26%) e *Magonia pubescens* (5,22%).

Salienta-se que as espécies foram carbonizadas com a casca, à exceção do *Eucalyptus spp.*, que foi carbonizada na forma de peças serradas. A casca, geralmente, contém uma grande quantidade de minerais que aumenta o teor de cinzas. Neste estudo, foi uma variável que contribuiu para o aumento no teor de cinzas do carvão.

Na Tabela 61 (Anexo), são apresentados os valores médios dos teores de cinzas em função das diferentes marchas de carbonização. A marcha de carbonização foi uma variável que não influenciou no teor de cinzas do carvão. Apesar de a análise de variância não ter verificado efeito significativo em relação à temperatura final de carbonização no teor de cinzas do carvão, esperava-se uma correlação positiva. Havia uma expectativa de que carbonizações com maior tempo e temperatura final, dentro das marchas estudadas, apresentassem maiores valores médios para o teor de cinzas, devido ao efeito do aumento da concentração de minerais pela perda de massa. Provavelmente se verificariam diferenças significativas em condições mais acentuadas de carbonização nos tratamentos, que não foram realizadas neste estudo. Destaca-se que as cinzas, não são eliminadas no processo de combustão do carvão em que a perda de massa do carvão se completa, convertendo-se em energia, compostos gasosos e um resíduo final (denominado de cinzas).

4.5 Poder calorífico

A análise de variância indicou que o poder calorífico dos carvões foi afetado pela espécie e marcha de carbonização. Não houve efeito significativo da interação, conforme pode ser observado na Tabela 57 (Anexo). A Tabela 16 apresenta valores médios para poder calorífico (kcal/kg) do carvão por espécie.

Tabela 16 – Valores médios para poder calorífico (kcal/kg) do carvão em função da espécie

Espécie	Poder calorífico (kcal/kg)
<i>E. urophylla</i> (clone)	7454,25 a
<i>Eucalyptus</i> spp	7418,81 ab
<i>E. camaldulensis</i>	7409,33 abc
<i>Inga laurina</i>	7373,90 abc
<i>E. cloeziana</i>	7356,43 abc
<i>Piptadenia gonoacantha</i>	7229,32 abc
<i>E. urophylla</i>	7216,76 abc
<i>Bowdichia virgiloides</i>	7196,57 abc
<i>Magonia pubescens</i>	7119,31 abc
<i>Dipteryx alata</i>	7099,24 bc
<i>Caryocar brasiliense</i>	7041,53 c
<i>Qualea grandiflora</i>	6673,14 d

*Médias ao longo da coluna seguidas das mesmas letras minúsculas não diferem entre si significativamente entre si pelo teste Tukey a 95% de probabilidade

Entre as madeiras do gênero *Eucalyptus*, o maior poder calorífico do carvão foi obtido com *Eucalyptus urophylla* clonado (7454,25 kcal/kg), enquanto que o menor valor foi observado no carvão em *Eucalyptus urophylla* (7216,76 kcal/kg); a diferença entre eles, no entanto, não foi significativa. Provavelmente, a inexistência de tais diferenças se deve à semelhança da composição química da madeira das espécies desse gênero

Entre as espécies nativas, o maior poder calorífico do carvão foi obtido com a carbonização de *Inga laurina* (7373,90 kcal/kg), não apresentando diferença

significativa entre as demais espécies, à exceção da *Qualea grandiflora*, que apresentou o menor valor médio com 6673,14 kcal/kg.

Quando se analisam todas as espécies, o menor valor médio foi observado por *Qualea grandiflora* (6673,14 kcal/kg) que diferiu dos valores médios de poder calorífico de todas as outras espécies. O *Eucalyptus urophylla* clonado apresentou o maior valor médio de poder calorífico (7454,25 Kcal/Kg), não diferindo significativamente das demais espécies, à exceção de *Dypteryx alata* (7099,24 kcal/kg), *Caryocar brasiliense* (7041,53 kcal/kg) e *Qualea grandiflora* (6673,14 kcal/Kg).

De uma forma geral, verificou-se que o grupo formado pelas madeiras do gênero *Eucalyptus* apresentou maiores valores médios de poder calorífico. Dentro do grupo das madeiras das espécies nativas, destacou-se o poder calorífico do carvão das espécies *Inga laurina* e *Piptadenia gonoacantha*, sendo o carvão desta última espécie de grande aceitação popular, no uso doméstico para se fazer churrasco, em função da combinação de dois fatores importantes: elevado poder calorífico (7229,32 kcal/kg) e massa específica básica da madeira relativamente elevada (0,59 g/cm³).

A análise de variância para marcha de carbonização detectou a existência de diferenças significativas na propriedade poder calorífico do carvão, em nível de 95% de probabilidade. A Tabela 17 apresenta os valores médios do poder calorífico do carvão em função das diferentes marchas de carbonização.

Tabela 17 – Valores médios para poder calorífico (kcal/kg) do carvão em função da marcha de carbonização

Carbonização	Poder calorífico (kcal/kg)
<i>Marcha 3 (550 °C)</i>	7.648,08 a
<i>Marcha 2 (450 °C)</i>	7.173,64 b
<i>Marcha 1 (350 °C)</i>	6.825,44 c

*Médias ao longo da coluna seguidas das mesmas letras minúsculas não diferem entre si significativamente entre si pelo teste Tukey a 95% de probabilidade

Observou-se um aumento significativo do poder calorífico com o aumento do tempo e temperatura final de carbonização. Para a “marcha 3” (temperatura final de

550 °C), obteve-se um valor médio de 7.648,08 kcal/kg, enquanto que a “marcha 2” (temperatura final de 450 °C) apresentou um valor médio de 7.173,64 kcal/kg e a “marcha 1” (temperatura final de 350 °C) um valor médio de 6.825 kcal/kg. Observou-se uma correlação positiva entre poder calorífico e teor de carbono fixo do carvão. Observou-se ainda que o aumento do poder calorífico do carvão foi menor quando se passou da “marcha 1” (350°C) para “marcha 2” (450 °C) quando comparado com aumento observado da “marcha 2” (450 °C) para a “marcha 3” (550 °C). 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.

4.6 Massa específica aparente do carvão

A análise de variância indicou que a massa específica aparente do carvão foi afetada pela espécie. Não houve efeito significativo da marcha de carbonização e da interação, conforme pode ser observado na Tabela 59 (Anexo). A Tabela 18 apresenta os valores médios para massa específica aparente do carvão em função da espécie.

Tabela 18 – Valores médios para massa específica aparente (g/cm³) do carvão em função da espécie

Espécie	Massa específica aparente (g/cm³)
<i>Dipteryx alata</i>	0,50 a
<i>E. urophylla</i>	0,49 a
<i>E. cloeziana</i>	0,43 b
<i>Bowdichia virgiloides</i>	0,43 b
<i>Inga laurina</i>	0,41 bc
<i>Magonia pubescens</i>	0,40 bc
<i>E. urophylla (clone)</i>	0,39 bc
<i>Caryocar brasiliense</i>	0,38 bcd
<i>Qualea grandiflora</i>	0,37 cd
<i>Eucalyptus spp</i>	0,36 cd
<i>E. camaldulensis</i>	0,36 cd
<i>Piptadenia gonoacantha</i>	0,34 d

*Médias ao longo da coluna seguidas das mesmas letras minúsculas não diferem entre si significativamente entre si pelo teste Tukey a 95% de probabilidade

Dentre as madeiras de eucalipto, a maior massa específica aparente do carvão foi obtida com *Eucalyptus urophylla* (0,49 g/cm³), que diferiu significativamente das demais espécies. A menor massa específica aparente foi do *Eucalyptus camaldulensis* (0,36 g/cm³) que diferiu significativamente das demais espécies, a exceção do *Eucalyptus spp.* (Lyptus) (0,36 g/cm³). Não se observou entre os eucaliptos uma correlação entre a massa específica básica da madeira e massa específica aparente do carvão.

Entre as espécies nativas a maior massa específica aparente foi obtida com a carbonização de *Dypteryx alata* (0,50 g/cm³), que apresentou diferença significativa com as demais espécies. A *Piptadenia gonoacantha* foi a espécie que apresentou menor massa específica aparente (0,34 g/cm³) diferindo significativamente das demais espécies, a exceção da *Qualea grandiflora* (0,37 g/cm³) e *Caryocar brasiliense* (0,38 g/cm³). O *Dipteryx alata* foi a espécie que apresentou maior massa específica básica da madeira, apresentando também maior massa específica aparente do carvão. Verificou-se, também correlação entre massa específica da madeira e massa específica do carvão das espécies *Bowdichia*

virgiloides, *Magonia pubescens*, *Caryocar brasiliense* e *Inga laurina*. No entanto, para as espécies *Piptadenia gonoacantha* e *Qualea grandiflora* verificou-se um comportamento diferenciado. No caso da *Piptadenia gonoacantha*, a massa específica aparente do carvão foi a mais baixa ($0,34 \text{ g/cm}^3$), para uma massa específica básica da madeira de $0,59 \text{ g/cm}^3$. No caso da *Qualea grandiflora*, a massa específica do carvão foi de $0,37 \text{ g/cm}^3$ para uma massa específica da madeira de $0,41 \text{ g/cm}^3$.

Analisando as espécies conjuntamente, o maior valor médio de massa específica aparente foi observado em *Dypteryx alata* ($0,50 \text{ g/cm}^3$) que diferiu dos valores médios de massa específica aparente de todas as outras espécies a exceção do *E. urophylla*. A *Piptadenia gonoacantha* apresentou o menor valor médio de massa específica aparente ($0,34 \text{ g/cm}^3$), não diferindo significativamente das demais, à exceção de *Caryocar brasiliense* ($0,38 \text{ g/cm}^3$), *Qualea grandiflora* ($0,37 \text{ g/cm}^3$), *Eucalyptus spp.* (*Lyptus*) ($0,36 \text{ g/cm}^3$) e *Eucalyptus camaldulensis* ($0,36 \text{ g/cm}^3$).

Geralmente, as empresas que visam o uso da madeira para energia, plantam as espécies *Eucalyptus cloeziana* e *Eucalyptus urophylla*, por apresentarem maior massa específica aparente do carvão em relação às outras espécies. Um carvão com maior massa específica aparente apresenta maior “densidade energética”, favorecendo o processo de termorredução e uma redução considerável nos custos de transporte.

A análise de variância para a variável marcha de carbonização detectou a inexistência de diferenças significativas na massa específica aparente do carvão, em nível de 95% de probabilidade. Isso quer dizer que a marcha de carbonização, com as diferentes temperaturas, não teve qualquer influência na massa específica aparente do carvão. Na Tabela 39 (Anexo), são apresentados os valores médios da massa específica aparente em função das diferentes marchas de carbonização.

4.7 Rendimento gravimétrico do carvão

A análise de variância indicou que o rendimento gravimétrico dos carvões foi afetado pela espécie e marcha de carbonização. Não houve efeito significativo da

interação, conforme pode ser observado na Tabela 58 (Anexo). A Tabela 19 apresenta os valores médios para rendimento gravimétrico do carvão.

Tabela 19 – Valores médios do rendimento gravimétrico do carvão em função da espécie.

Espécie	Rendimento gravimétrico (%)
<i>Qualea grandiflora</i>	41,39 a
<i>Caryocar brasiliense</i>	38,83 ab
<i>E. urophylla</i>	37,81 ab
<i>Dipteryx alata</i>	37,73 ab
<i>E. spp (Lyptus)</i>	37,65 ab
<i>Magonia pubescens</i>	35,65 bc
<i>E. cloeziana</i>	35,52 bc
<i>E. camaldulensis</i>	35,32 bc
<i>Bowdichia virgiloides</i>	35,27 bc
<i>Piptadenia gonoacantha</i>	34,88 bc
<i>Inga laurina</i>	34,75 bc
<i>E. urophylla (clone)</i>	31,17 c

*Médias ao longo da coluna seguidas das mesmas letras minúsculas não diferem entre si significativamente entre si pelo teste Tukey a 95% de probabilidade

Dentre as madeiras de eucaliptos estudadas, o maior rendimento em carvão foi obtido em *Eucalyptus urophylla* (37,81%), que diferiu significativamente das demais, à exceção do *Eucalyptus spp.* (Lyptus) que apresentou um rendimento gravimétrico médio de 37,65%. O menor valor em rendimento gravimétrico foi observado no carvão de *Eucalyptus urophylla* clonado (31,17%), que diferiu significativamente das demais espécies, com exceção ao *Eucalyptus cloeziana* (35,52%) e *Eucalyptus camaldulensis* (35,32%). O clone de *Eucalyptus urophylla* foi a espécie que apresentou menor rendimento gravimétrico, indicando uma correlação com massa específica básica da madeira. Verificou-se, também, uma correlação negativa com teor de carbono fixo. As espécies com maiores rendimentos gravimétrico do carvão apresentaram menores teores de carbono fixo.

Dentre as espécies nativas, o maior rendimento gravimétrico do carvão foi obtido com *Qualea grandiflora* (41,39%), que diferiu significativamente das demais espécies, à exceção do *Caryocar brasiliense* (38,83%) e *Dipteryx alata* (37,73%). O

menor rendimento gravimétrico foi obtido da carbonização de *Inga laurina* (34,71%), que não diferiu significativamente das demais espécies, à exceção de *Qualea grandiflora*. Da mesma forma que ocorreu com o grupo do eucalipto, verificou-se uma correlação negativa entre o teor de carbono fixo e o rendimento gravimétrico. A *Qualea grandiflora* foi a espécie que apresentou menor teor de carbono fixo (64,03%) para um maior rendimento gravimétrico (41,39%). A espécie *Inga Laurina* apresentou menor rendimento (34,71%), mas não apresentou o maior teor de carbono fixo (69,71%), que foi apresentado por *Magonia pubencens* (70,13%). No entanto, elas não diferiram significativamente entre si, tanto em carbono fixo, quanto em rendimento gravimétrico.

Quando se analisaram todas as espécies em conjunto, o maior rendimento gravimétrico foi observado em *Qualea grandiflora* (41,39%), que diferiu significativamente das demais, à exceção de *Caryocar brasiliense* (38,83%), *Dypteryx alata* (37,73%), *Eucalyptus urophylla* (37,81%) e *Eucalyptus spp.* (37,65%). O *Eucalyptus urophylla* clonado apresentou o menor valor médio em rendimento gravimétrico (31,17%), não diferindo significativamente das espécies *Inga laurina* (34,71%), *Piptadenia gonoacantha* (34,88%), *Bowdichia virgiloides* (35,27%), *Eucalyptus camaldulensis* (35,32%), *Eucalyptus cloeziana* (35,52%) e *Magonia pubencens* (35,65%).

A Tabela 20 apresenta os valores médios do rendimento gravimétrico em função da marcha de carbonização. Observou-se uma redução no rendimento gravimétrico com o aumento do tempo e temperatura final de carbonização. Para a “marcha 3” (temperatura final de 550 °C) obteve-se um valor médio de 31,46%, enquanto que a “marcha 2” (temperatura final de 450 °C) apresentou um valor médio de rendimento gravimétrico de 34,99% e a “marcha 1” (temperatura final de 350 °C), um valor médio de 42,53%. Observou-se uma correlação negativa entre teor de carbono fixo e rendimento gravimétrico. Observou-se ainda que o aumento do rendimento gravimétrico do carvão foi maior quando se passou da “marcha 1” (350°C) para “marcha 2” (450 °C) quando comparado com aumento observado da “marcha 2” (450 °C) para a “marcha 3” (550 °C).

Tabela 20 – Valores médios do rendimento gravimétrico em função da marcha de carbonização

Carbonização	Rendimento gravimétrico (%)
<i>Marcha 1 (350 °C)</i>	42,53 a
<i>Marcha 2 (450 °C)</i>	34,99 b
<i>Marcha 3 (550 °C)</i>	31,46 c

*Médias ao longo da coluna seguidas das mesmas letras minúsculas não diferem entre si significativamente entre si pelo teste Tukey a 95% de probabilidade

4.8 Umidade do carvão

A análise de variância indicou que a umidade do carvão foi afetada pela marcha de carbonização. Não houve efeito significativo da espécie e interação, conforme pode ser observado na Tabela 60 (Anexo). Os valores médios de umidade podem ser verificados na Tabela 62 (Anexo).

A Tabela 21 apresenta os valores médios em função da marcha de carbonização na umidade do carvão. Observaram-se diferenças significativas entre a “marcha 3” (6,68%) e as demais marchas (5,72%). Observou-se ainda que não houve aumento da umidade do carvão quando se passou da “marcha 1” (350°C) para “marcha 2” (450 °C), mas foi observado um aumento quando se passou da “marcha 2” (450 °C) para a “marcha 3” (550 °C).

Tabela 21 – Valores médios de umidade do carvão em função da marcha de carbonização

Carbonização	Média
<i>Marcha 3 (550 °C)</i>	6,68 a
<i>Marcha 2 (450 °C)</i>	5,72 b
<i>Marcha 1 (350 °C)</i>	5,72 b

*Médias ao longo da coluna seguidas das mesmas letras minúsculas não diferem entre si significativamente entre si pelo teste Tukey a 95% de probabilidade

4.9 Previsão de propriedades com a utilização de espectroscopia com infravermelho próximo

A Figura 6 apresenta as formas dos espectros para as três marchas de

carbonização considerando todas as espécies.

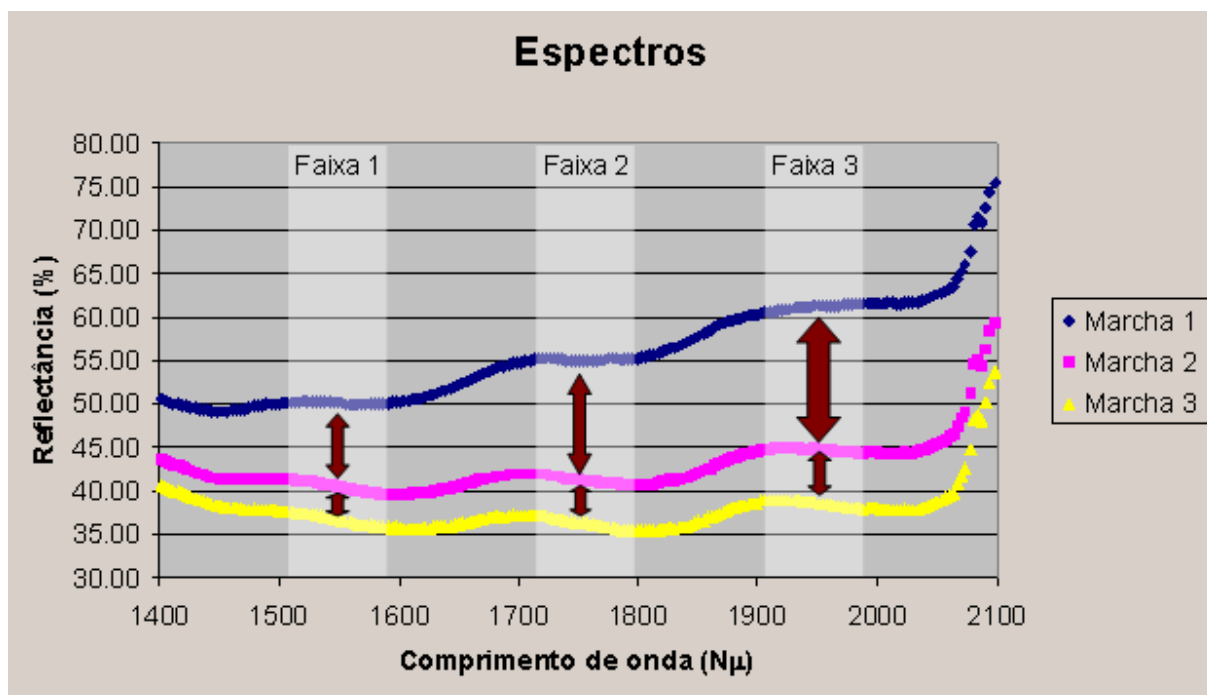


Figura 6 – Médias das curvas espectrais por marcha de carbonização

Observou-se que os espectros se mostraram similares mas com intensidade de reflectância diferentes. Pode-se observar que, na medida em que a madeira sofreu uma maior carbonização, menor foi a reflectância em toda a faixa do infravermelho próximo. Verificou-se que à medida que o comprimento de onda (nm) aumentou, maior foi a diferença de reflectância (%) entre as marchas de carbonização, indicando uma tendência de aumento do coeficiente de correlação e diminuição do erro padrão nos maiores comprimentos de onda.

Avaliando a Figura 6, percebe-se que, dentro da “faixa 1”, a “marcha 1” apresenta uma reflectância média em torno de 50%, enquanto que a “marcha 3” apresenta uma reflectância média na faixa de 37%; conforme se pode detectar, existe apenas um intervalo de 13% em reflectância para “explicar” as propriedades do carvão. Quando analisamos a “faixa 3”, na “marcha 1”, verifica-se uma reflectância média de 61% enquanto que a reflectância média na “marcha 3” é de aproximadamente 39%; nessa faixa temos um intervalo entre as marchas de 22% na reflectância dos espectros, bem maior que os 13% da “faixa 1”, indicando que serão realizados melhores ajustes de modelos para a faixa que apresenta maior intervalo

entre as marchas, no caso a “faixa 3”. Em resumo, a amplitude de resposta na reflectância favorece a separação das propriedades do carvão à medida que se aumenta o comprimento de onda.

4.9.1 Estimativa do carbono fixo utilizando NIR

4.9.1.1 Média dos espectros na faixa entre 1500-2000 nm

Os valores estimados a partir do modelo ajustado $Y = a + \left(\frac{b}{x}\right)$ foram utilizados na calibração/validação para todas as espécies. Obteve-se na calibração um coeficiente de correlação(R) igual 0,82, enquanto que o coeficiente de correlação (R) foi de 0,85 na validação. As Figura 7 e 8 mostram a distribuição dos pontos na calibração e validação, respectivamente.

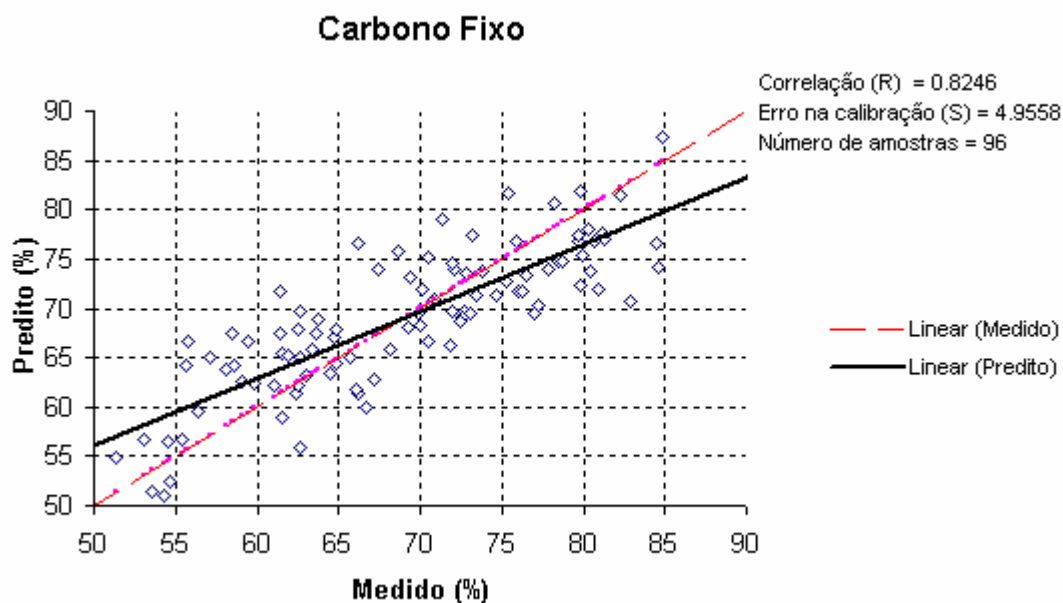


Figura 7 – Calibração para o teor de carbono fixo do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 2000 nm)

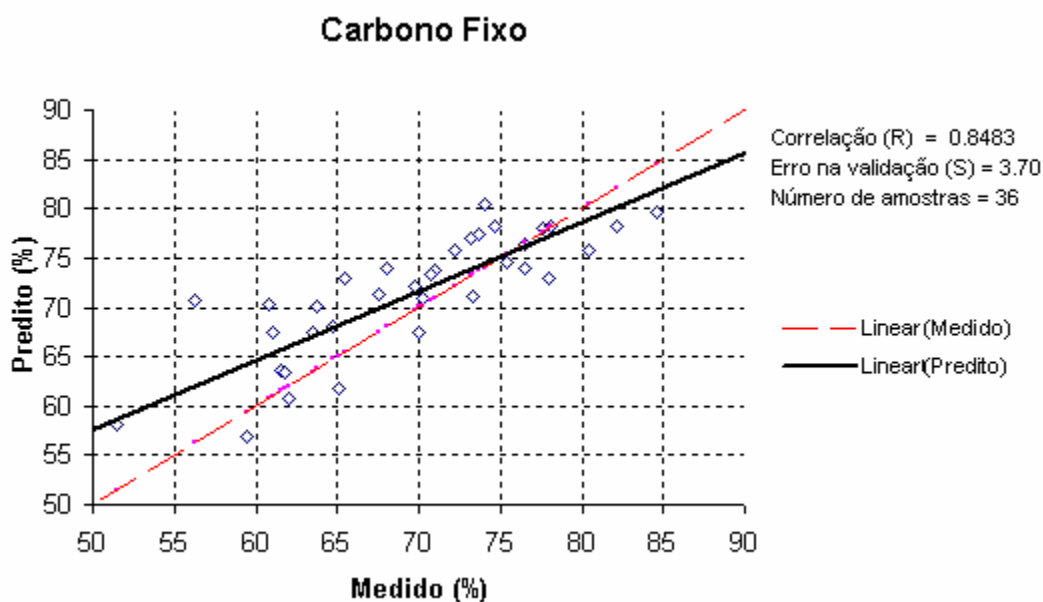


Figura 8 – Validação para o teor de carbono fixo do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 2000 nm).

4.9.1.1.1 Modelos de calibração por espécie

A Tabela 22, apresenta os modelos, as constantes e variáveis de calibração e validação os ajustes individuais por espécie para o carbono fixo na faixa de 1500-2000 nm para todas as espécies. Quando se realiza um ajuste individual por espécie, tende-se a obter melhores coeficientes de correlação na calibração e validação. Das doze espécies, dez apresentaram melhores correlações na calibração e onze na validação em relação ao ajuste para todas as espécies. O maior coeficiente de correlação foi obtido em *E. urophylla* clonado (R=0,97), a partir do modelo $Y = a + \left(\frac{b}{x}\right)$, e o menor, em *Magonia pubencens* (R=0,69), a partir do modelo $Y = a + b^x$. Na validação, os maiores coeficientes de correlação foram obtidos a em *Eucalyptus urophylla* clonado (R=0,99), *Caryocar brasiliense* (R=0,99) e o menor valor de correlação na espécie *Bowdichia virgiloides* (R=0,84).

Tabela 22 – Modelos, constantes (a,b), erro padrão da calibração (Epc), coeficiente de correlação da calibração (Rc), erro padrão da validação (Epv), coeficiente de correlação da validação (Rp) e erro padrão da predição (Epp) para o carbono fixo na faixa de 1500-2000 nm.

Espécie	Modelo	a	b	Epc (S)	Rc	Epv	Rp	Epp
1-12	$y=a+b/x$	33,44	1546,11	4,95	0,82	3,69	0,85	4,82
1	$y=a+b/x$	19,84	2302,44	4,69	0,91	3,69	0,98	5,10
2	$y=ab^x$	137,21	0,9837	4,00	0,93	2,34	0,95	7,43
3	$y=a+bx$	98,04	-0,65	4,55	0,88	1,86	0,95	4,46
4	$y=a+b/x$	35,6	1627,33	4,42	0,85	4,13	0,85	8,03
5	$y=a+b/x$	34,51	1743,35	2,72	0,97	1,71	0,99	3,14
6	$y=ab^x$	168,09	0,98	4,28	0,89	2,38	0,99	5,32
7	$y=ax^b$	550,87	-0,56	2,50	0,96	6,23	0,95	4,47
8	$y=ax^b$	290,05	-0,38	4,19	0,69	1,46	0,90	5,50
9	$y=a+b/x$	26,09	1881,59	2,95	0,94	3,39	0,98	4,92
10	$y=ax/(b+x)$	41,39	-15,28	4,31	0,90	2,19	0,84	7,37
11	$y=ax/(b+x)$	43,5	-15,89	6,21	0,70	4,06	0,95	2,94
12	$y=ax/(b+x)$	39,19	-18,15	5,36	0,88	2,03	0,96	11,83

Em que {1} = *E. spp (Lyptus)*; {2} = *E. cloeziana*; {3} = *E. urophylla*; {4} = *E. camaldulensis*; {5} = *E. urophylla* (clone); {6} = *Caryocar brasiliense*; {7} = *Qualea grandiflora*; {8} = *Magonia pubescens*; {9} = *Inga laurina*; {10} = *Bowdichia virgiloides*; {11} = *Piptadenia gonoacantha*; {12} = *Dipterix alata*.

4.9.1.2 Média dos espectros entre 1500-1600 nm

Os valores estimados a partir do modelo ajustado $Y = a + \left(\frac{b}{x}\right)$ foram utilizados para calibração/validação. Considerando todas as espécies, obteve-se um coeficiente de correlação(R) igual 0,78 na calibração enquanto que o coeficiente de correlação (R) foi de 0,82 na validação. As Figuras 9 e 10 mostram a distribuição dos pontos na calibração e validação, respectivamente.

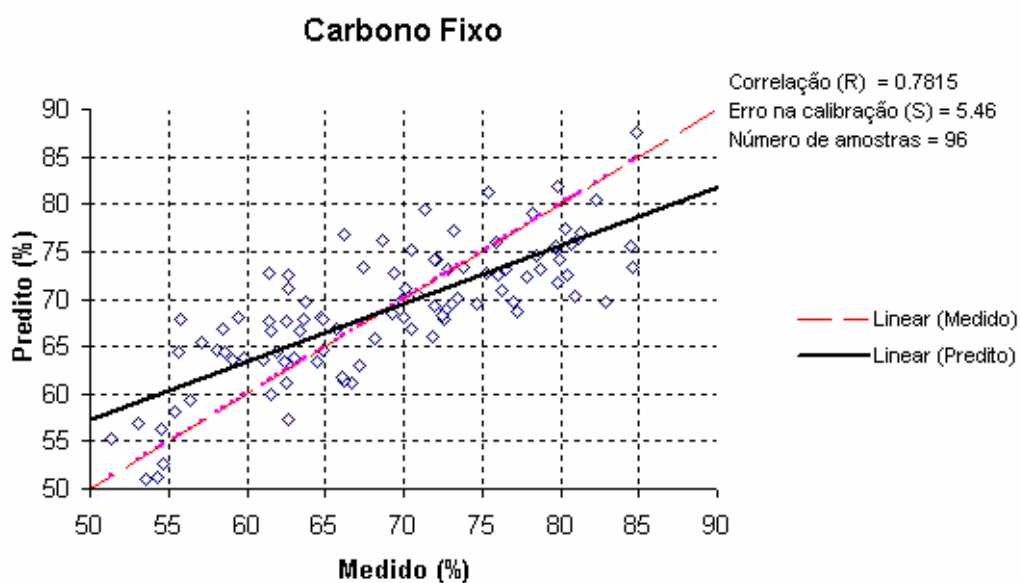


Figura 9 – Calibração para o teor de carbono fixo do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 1600 nm)

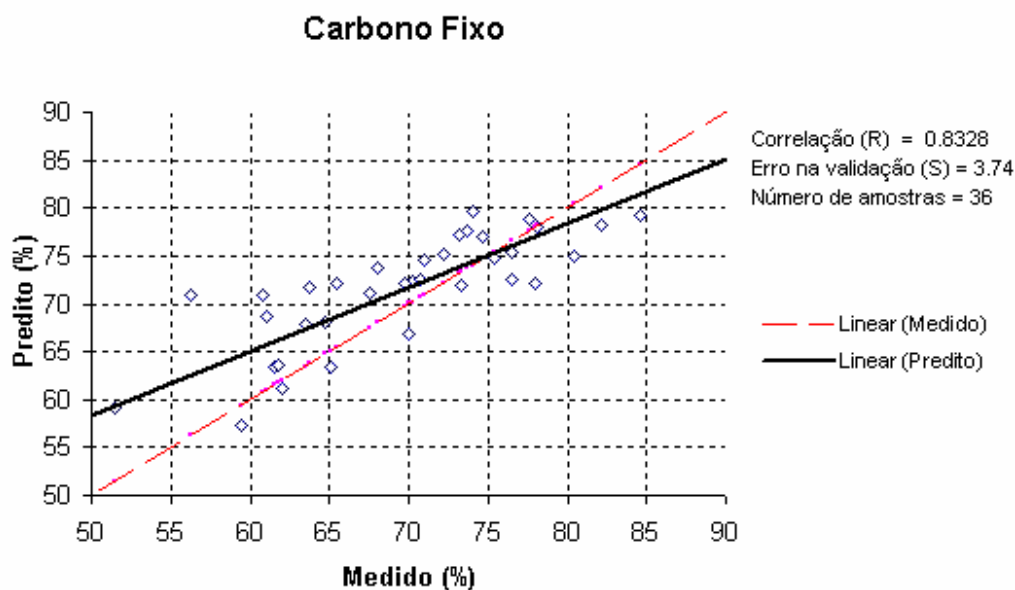


Figura 10 – Validação para o teor de carbono fixo do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 1600 nm)

4.9.1.2.1 Modelos de Calibração por Espécie

A Tabela 23 apresenta os modelos, as constantes e variáveis de calibração e validação dos ajustes individuais por espécie para o carbono fixo na faixa de 1500-1600 nm para todas as espécies. Das doze espécies, nove apresentaram melhores correlações na calibração em relação ao ajuste para todas as espécies. Na validação, apenas uma espécie apresentou menor coeficiente de correlação no ajuste em relação ao ajuste para todas as espécies. O maior coeficiente de correlação foi obtido em *Qualea grandiflora* (R=0,97), a partir do modelo $Y=a+x^b$, e o menor foi em *Magonia pubencens* (R=0,59), a partir do modelo $Y=a+x^b$. Na validação os maiores coeficientes de correlação foram obtidos em *Eucalyptus urophylla* clonado (R=0,99) e *Caryocar brasiliense* (R=0,99), e o menor valor em *Eucalyptus camaldulensis* (R=0,78).

Tabela 23 – Modelos, constantes (a,b), erro padrão da calibração (Epc), coeficiente de correlação da calibração (Rc), erro padrão da validação (Epv), coeficiente de correlação da validação (Rp) e erro padrão da predição (Epp) para o carbono fixo na faixa de 1500-1600 nm.

Espécie	Modelo	a	b	Epc	Rc	Epv	Rp	Epp
1-12	$y=a+b/x$	28,27	1699,62	5,46	0,78	3,73	0,83	5,02
1	$y=a+bx$	111,02	-0,94	7,35	0,76	4,47	0,93	3,88
2	$y=ab^x$	153,22	0,98	4,49	0,91	2,54	0,93	7,34
3	$y=a+bx$	102,06	-0,78	4,95	0,86	2,12	0,92	4,61
4	$y=a+b/x$	27,05	1921,26	5,04	0,81	5,02	0,78	8,81
5	$y=a+b/x$	27,56	1977,45	2,98	0,96	1,78	0,99	4,51
6	$y=a+bx$	147,85	-1,94	5,01	0,85	3,74	0,99	7,64
7	$y=ax^b$	949,61	-0,71	2,56	0,97	7,88	0,94	6,02
8	$y=ax^b$	302,86	-0,3941	4,69	0,59	1,03	0,93	5,03
9	$y=a+b/x$	13,79	2318,53	2,78	0,95	3,98	0,98	7,03
10	$y=ax/(b+x)$	40,08	-15,62	5,18	0,85	1,51	0,86	8,22
11	$y=ax/(b+x)$	43,86	-15,07	6,97	0,60	3,73	0,94	2,81
12	$y=ax/(b+x)$	28,27	1699,62	5,46	0,78	3,73	0,83	5,02

Em que {1} = *E. spp (Lyptus)*; {2} = *E. cloeziana*; {3} = *E. urophylla*; {4} = *E. camaldulensis*; {5} = *E. urophylla* (clone); {6} = *Caryocar brasiliense*; {7} = *Qualea grandiflora*; {8} = *Magonia pubencens*; {9} = *Inga laurina*; {10} = *Bowdichia virgiloides*; {11} = *Piptadenia gonoacantha*; {12} = *Dipterix alata*.

4.9.1.3 Média dos espectros entre 1700-1800 nm

Os valores estimados a partir do modelo ajustado $Y = a + \left(\frac{b}{x}\right)$ foram utilizados para calibração/validação. Considerando todas as espécies, obteve-se um coeficiente de correlação (R) igual 0,83 na calibração enquanto que o coeficiente de correlação (R) foi de 0,84 na validação. As Figuras 11 e 12 mostram a distribuição dos pontos na calibração e validação, respectivamente. Observou-se que os coeficientes de correlação na calibração e validação são maiores e o erro padrão é menor na faixa de 1700-1800 nm em relação à faixa de menor comprimento (1500-1600nm) e valores similares de correlação e erro padrão na faixa de 1500-2000 nm.

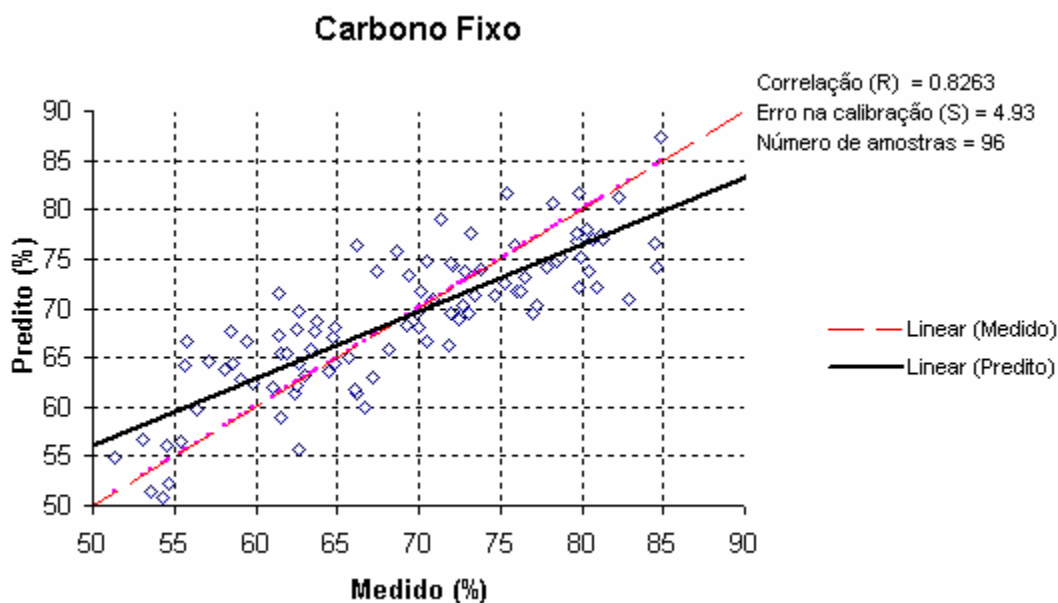


Figura 11 – Calibração para o teor de carbono fixo do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1700 e 1800 nm)

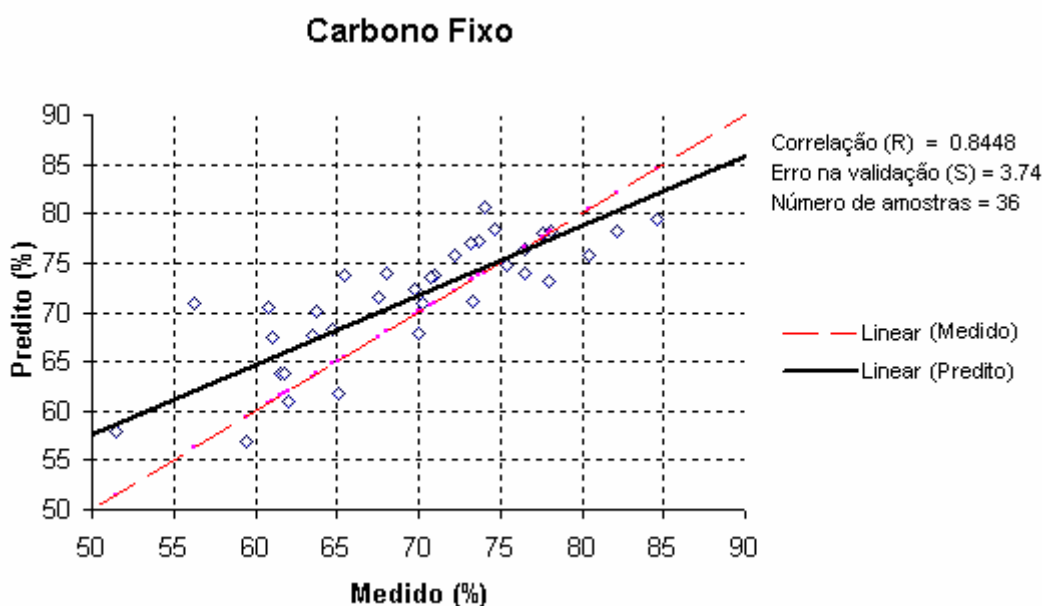


Figura 12 – Validação para o teor de carbono fixo do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1700 e 1800 nm)

4.9.1.3.1 Calibração por espécie

A Tabela 24 apresenta os modelos, as constantes e variáveis de calibração e validação dos ajustes individuais por espécie para o carbono fixo na faixa de 1700-1800 nm para todas as espécies. Das doze espécies, nove apresentaram melhores correlações em relação ao ajuste para todas as espécies, enquanto que na validação nenhuma correlação foi menor do que a correlação do ajuste para todas as espécies. O maior coeficiente de correlação foi obtido no clone de *Eucalyptus urophylla* (R=0,97), a partir do modelo $Y = a + \left(\frac{b}{x}\right)$, e o menor em *Magonia pubencens* (R=0,69), a partir do modelo $Y = a + x^b$. Na validação, os maiores coeficientes de correlação foram obtidos em *Eucalyptus urophylla* clonado (R=0,99) e *Caryocar brasiliense* (R=0,99) e o menor valor em *Eucalyptus camaldulensis* (R=0,85).

Tabela 24 – Modelos, constantes (a,b), erro padrão da calibração (Epc), coeficiente de correlação da calibração (Rc), erro padrão da validação (Epv), coeficiente de correlação da validação (Rp) e erro padrão da predição (Epp) para o carbono fixo na faixa de 1700-1800 nm.

Espécie	Modelo	a	b	Epc	Rc	Epv	Rp	Epp
1-12	$y=a+b/x$	34,16	1496,10	4,93	0,83	3,74	0,84	4,89
1	$y=ax^b$	897,96	-0,67	4,54	0,92	3,79	0,98	4,46
2	$y=ab^x$	136,4	0,98	3,86	0,93	2,43	0,95	7,52
3	$y=a+bx$	96,89	-0,63	4,55	0,88	1,81	0,95	4,67
4	$y=a+b/x$	36,48	1567,72	4,40	0,86	4,03	0,85	8,02
5	$y=a+b/x$	35,41	1684,76	2,72	0,97	1,80	0,99	3,04
6	$y=a+bx$	128,39	-1,43	4,29	0,89	4,14	0,99	9,30
7	$y=ax^b$	521,23	-0,54	2,63	0,97	6,19	0,95	4,48
8	$y=ax^b$	271,1	-0,36	4,22	0,69	1,71	0,86	5,75
9	$y=a+b/x$	26,73	1828,46	3,02	0,94	3,56	0,98	4,94
10	$y=ax/(b+x)$	41,68	-14,90	4,33	0,90	2,33	0,87	7,31
11	$y=ax/(b+x)$	43,73	-15,53	6,13	0,71	3,92	0,95	2,85
12	$y=ax/(b+x)$	39,7	-17,59	5,23	0,88	1,79	0,97	11,71

Em que {1} = *E. spp (Lyptus)*; {2} = *E. cloeziana*; {3} = *E. urophylla*; {4} = *E. camaldulensis*; {5} = *E. urophylla* (clone); {6} = *Caryocar brasiliense*; {7} = *Qualea grandiflora*; {8} = *Magonia pubescens*; {9} = *Inga laurina*; {10} = *Bowdichia virgiloides*; {11} = *Piptadenia gonoacantha*; {12} = *Dipterix alata*.

4.9.1.4 Média dos espectros entre 1900-2000 nm

Os valores estimados a partir do modelo ajustado $Y = a + \left(\frac{b}{x}\right)$ foram utilizados para calibração/ validação. Considerando todas as espécies, obteve-se um coeficiente de correlação (R) igual 0,84 na calibração, enquanto que o coeficiente de correlação (R) foi de 0,85 na validação. As Figuras 13 e 14 mostram a distribuição dos pontos na calibração e validação respectivamente. Observou-se que os coeficientes de correlação na calibração e validação são maiores e o erro padrão é menor na faixa de 1900-2000 nm, em relação às demais faixas (1500-2000, 1500-1600 e 1700-1800 nm).

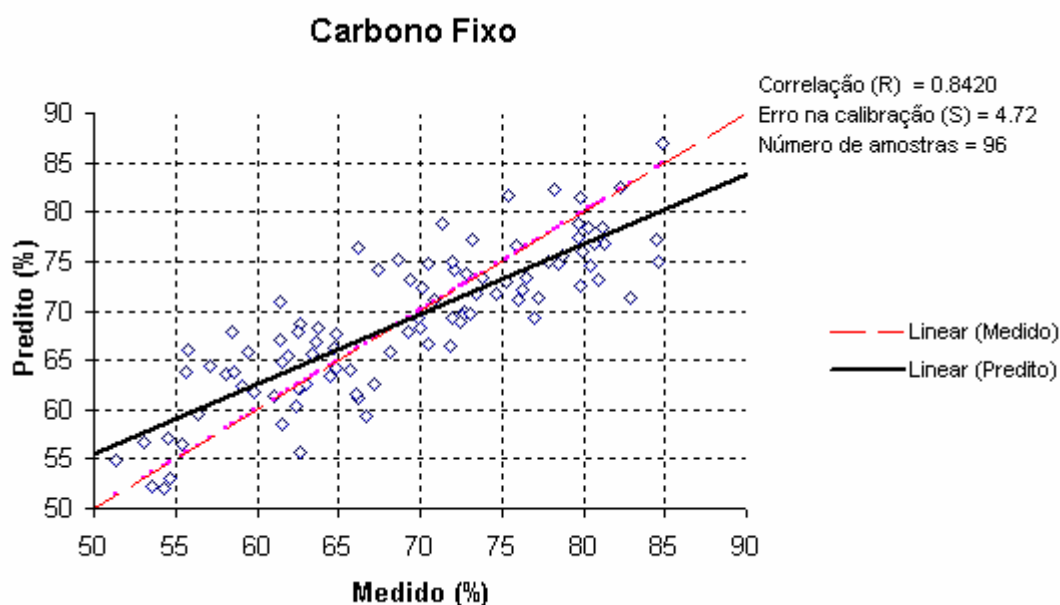


Figura 13 – Calibração para o teor de carbono fixo do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1900 e 2000 nm)

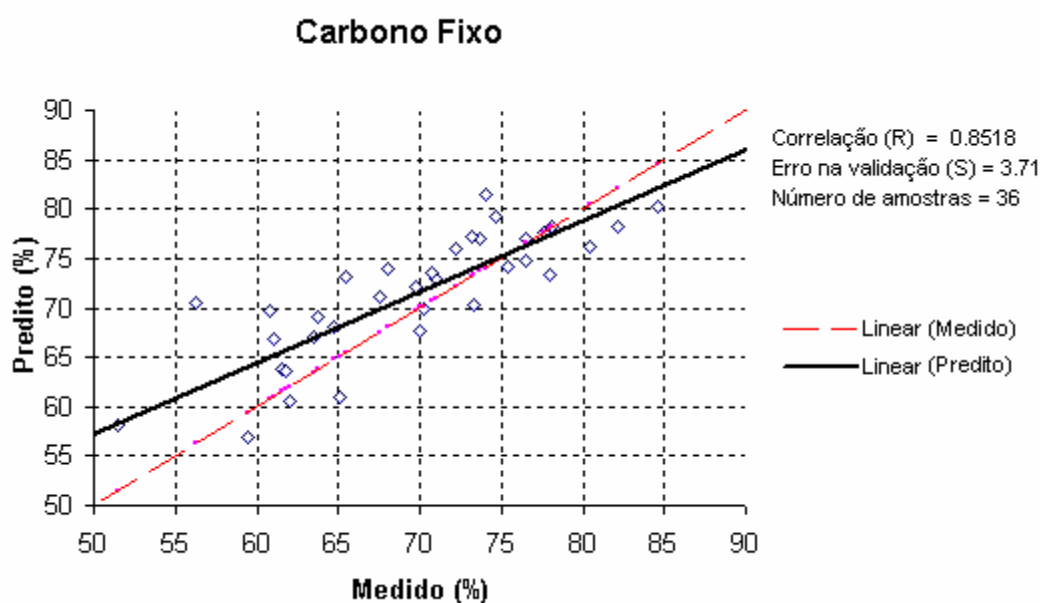


Figura 14 – Validação para o teor de carbono fixo do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1900 e 2000 nm)

4.9.1.4.1 Modelos de Calibração por Espécie

A Tabela 25 apresenta os modelos, constantes e variáveis de calibração e validação dos ajustes individuais por espécie para o carbono fixo na faixa de 1900-2000 nm para todas as espécies quando se realiza um ajuste

individual por espécie. Um ajuste por espécie tende-se a obter melhores coeficientes de correlação na correlação e validação. Das doze espécies, dez apresentaram melhores correlações na calibração em relação ao ajuste realizado para todas as espécies, enquanto que na validação nenhum ajuste por espécie obteve menor coeficiente de correlação do que ajuste realizado para todas as espécies. Os maiores coeficientes de correlação foram obtidos em *Qualea grandiflora* (R=0,97) e *Eucalyptus urophylla* clonado (R=0,97), a partir dos modelos $Y=a+x^b$ e $Y=a+\left(\frac{b}{x}\right)$, respectivamente. Os menores valores foram obtidos em *Piptadenia gonoacantha* (R=0,74) e *Magonia pubencens* (R=0,74), a partir dos modelos $Y=\frac{ax}{(b+x)}$ e $Y=a+x^b$. Na validação, os maiores coeficientes de correlação foram obtidos a partir do *Eucalyptus urophylla* clonado (R=0,99) e *Caryocar brasiliense* (R=0,99), e o menor valor na espécie *Bowdichia virgiloides* (R=0,89).

Tabela 25 – Modelos, constantes (a,b), erro padrão da calibração (Epc), coeficiente de correlação da calibração (Rc), erro padrão da validação (Epv), coeficiente de correlação da validação (Rp) e erro padrão da predição (Epp) para o carbono fixo na faixa de 1900-2000 nm.

Espécie	Modelo	a	b	Epc	Rc	Epv	Rp	Epp
1-12	$y=a+b/x$	36,46	1508,25	4,72	0,84	3,71	0,85	4,76
1	$y=ab^x$	122,95	0,99	3,84	0,94	3,79	0,97	3,39
2	$y=ax^b$	604,97	-0,57	3,56	0,94	3,07	0,94	7,20
3	$y=a+bx$	96,22	-0,57	4,40	0,89	1,65	0,96	4,29
4	$y=a+b/x$	39,86	1533,73	4,01	0,88	3,68	0,89	7,40
5	$y=a+b/x$	37,49	1710,38	2,54	0,97	1,23	0,99	2,55
6	$y=ab^x$	148,99	0,98	3,90	0,91	1,90	0,99	5,24
7	$y=ax^b$	431,41	-0,48	2,49	0,97	5,01	0,96	3,59
8	$y=ax^b$	270,26	-0,35	3,90	0,74	1,84	0,89	5,86
9	$y=a+b/x$	31,91	1737,25	3,24	0,93	2,71	0,98	3,63
10	$y=ax/(b+x)$	42,24	-15,62	3,70	0,92	2,43	0,89	7,05
11	$y=ax/(b+x)$	44,49	-16,38	5,86	0,74	4,10	0,95	3,19
12	$y=ax/(b+x)$	40,72	-18,14	4,86	0,90	1,91	0,97	11,04

Em que {1} = *E. spp (Lyptus)*; {2} = *E. cloeziana*; {3} = *E. urophylla*; {4} = *E. camaldulensis*; {5} = *E. urophylla* (clone); {6} *Caryocar brasiliense*; {7} = *Qualea grandiflora*; {8} = *Magonia pubencens*; {9} = *Inga laurina*; {10} = *Bowdichia virgiloides*; {11} = *Piptadenia gonoacantha*; {12} = *Dipterix alata*.

4.9.2 Estimativa do teor de matérias voláteis utilizando NIR

4.9.2.1 Média dos espectros na faixa entre 1500-2000 nm

Os valores estimados a partir do modelo ajustado $Y = a + \left(\frac{b}{x}\right)$ foram utilizados para calibração/validação. Considerando todas as espécies, obteve-se um coeficiente de correlação (R) igual 0,84 na calibração, enquanto que o coeficiente de correlação (R) foi de 0,83 na validação. As Figuras 15 e 16 mostram a distribuição dos pontos na calibração e validação, respectivamente.

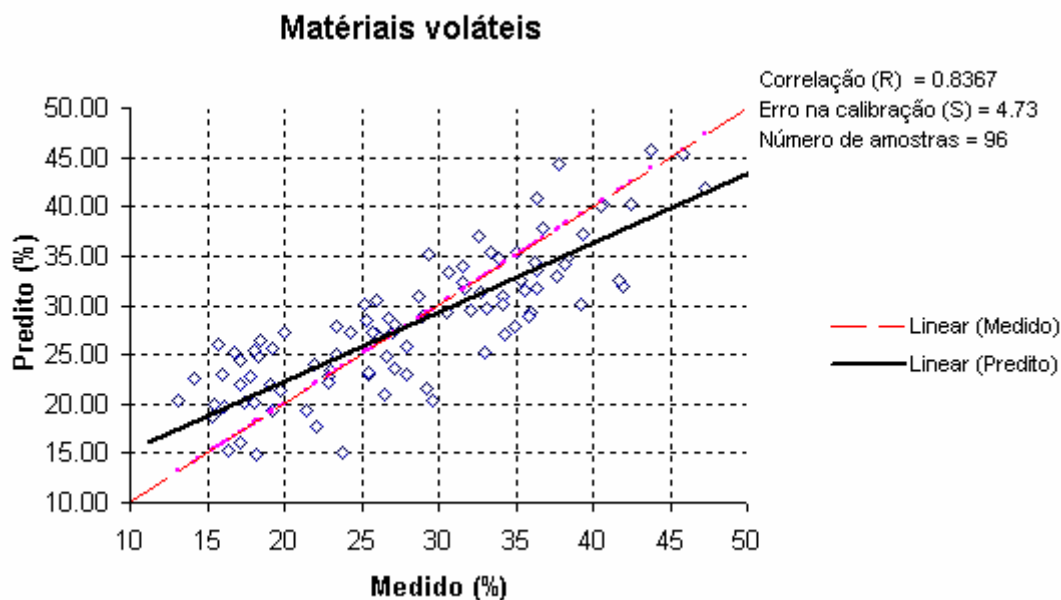


Figura 15 – Calibração para o teor de matérias voláteis do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 2000 nm)

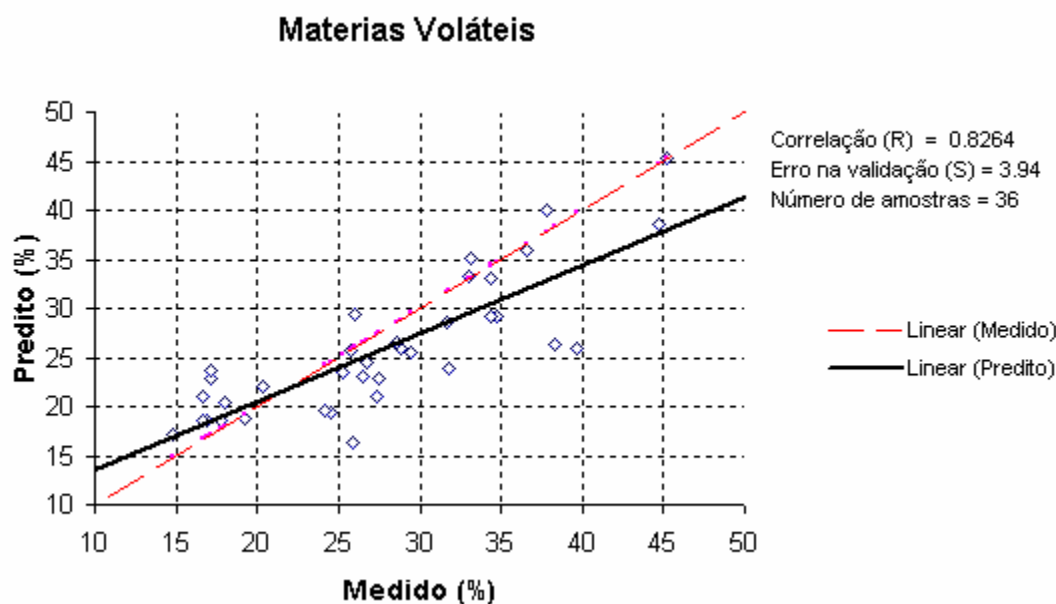


Figura 16 – Validação para o teor de matérias voláteis do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 2000 nm)

4.9.2.1.1 Modelos de Calibração por Espécie

A Tabela 26 apresenta os modelos, constantes e variáveis de calibração e validação por espécie para matérias voláteis na faixa de 1500-2000 nm para todas as espécies quando se realiza um ajuste individual por espécie. Das doze espécies, dez apresentaram melhores correlações na calibração em relação ao ajuste realizado para todas as espécies. Na validação nenhum ajuste por espécie obteve menor coeficiente de correlação do que ajuste realizado para todas as espécies. Os maiores coeficientes de correlação foram obtidos em *Qualea grandiflora* (R=0,95), a partir do modelo $Y=a+bx$ e *Eucalyptus urophylla* clonado (R=0,95), a partir do modelo $Y = a + \left(\frac{b}{x}\right)$, e o menor foi em *Piptadenia gonoacantha* (R=0,71), a partir do modelo $Y=a+bx$. Na validação, o maior coeficiente de correlação foi obtido a partir de *Caryocar brasiliense* (R=0,99), e o menor valor em *Eucalyptus camaldulensis* (R=0,85).

Tabela 26 – Modelos, constantes (a,b), erro padrão da calibração (Epc), coeficiente de correlação da calibração (Rc), erro padrão da validação (Epv), coeficiente de correlação da validação (Rp) e erro padrão da predição (Epp) para o teor de matérias voláteis na faixa de 1500-2000 nm.

Espécie	Modelo	a	b	Epc	Rc	Epv	Rp	Epp
1-12	y=a+bx	63,41	-1548,74	4,73	0,83	3,94	0,83	5,00
1	y=a+bx	79,75	-2339,00	5,14	0,90	3,97	0,98	5,53
2	y=a+b/x	72,85	-1750,85	4,04	0,93	2,96	0,93	6,96
3	y=a+bx	1,76	0,5819	4,50	0,86	1,95	0,93	5,91
4	y=a+bx	-6,73	0,7175	4,63	0,84	2,98	0,85	7,83
5	y=a+b/x	65,9	-1828,01	3,28	0,95	3,84	0,98	7,28
6	y=a+b/x	90,14	-2603,28	3,53	0,93	2,45	0,99	3,01
7	y=a+bx	-8,07	0,7690	3,33	0,95	6,99	0,97	9,36
8	y=a+bx	-3,5	0,6469	4,30	0,71	1,15	0,92	8,57
9	y=a+b/x	74,07	-2042,65	2,87	0,95	4,30	0,98	6,24
10	y=a+b/x	56,68	-1194,34	4,36	0,86	1,82	0,86	6,97
11	y=a+b/x	62,39	-1530,18	5,82	0,68	2,18	0,98	1,88
12	y=a+b/x	68,23	-1716,86	5,91	0,86	1,61	0,95	10,13

Em que {1} = *E. spp (Lyptus)*; {2} = *E. cloeziana*; {3} = *E. urophylla*; {4} = *E. camaldulensis*; {5} = *E. urophylla* (clone); {6} = *Caryocar brasiliense*; {7} = *Qualea grandiflora*; {8} = *Magonia pubescens*; {9} = *Inga laurina*; {10} = *Bowdichia virgiloides*; {11} = *Piptadenia gonoacantha*; {12} = *Dipterix alata*.

4.9.2.2 Média dos espectros entre 1500-1600 nm

Os valores estimados a partir do modelo ajustado $Y=a+bx$ foram utilizados para calibração/validação. Na calibração, considerando todas as espécies, obteve-se um coeficiente de correlação (R) igual 0,79 enquanto que, na validação, o coeficiente de correlação (R) foi de 0,80. As Figuras 17 e 18 mostram a distribuição dos pontos na calibração e validação, respectivamente.

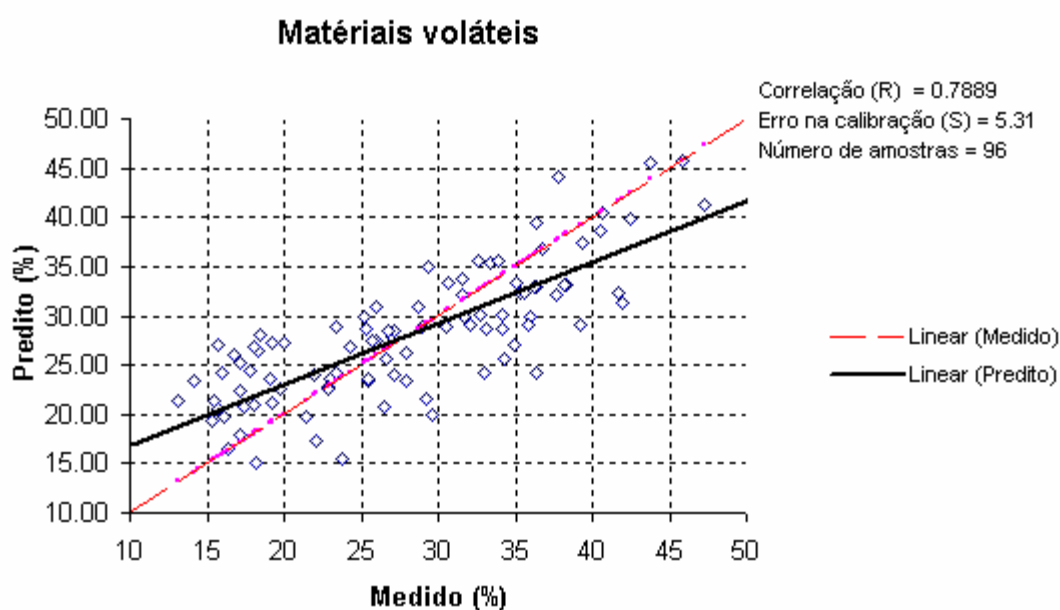


Figura 17 – Calibração para o teor de matérias voláteis do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 1600 nm)

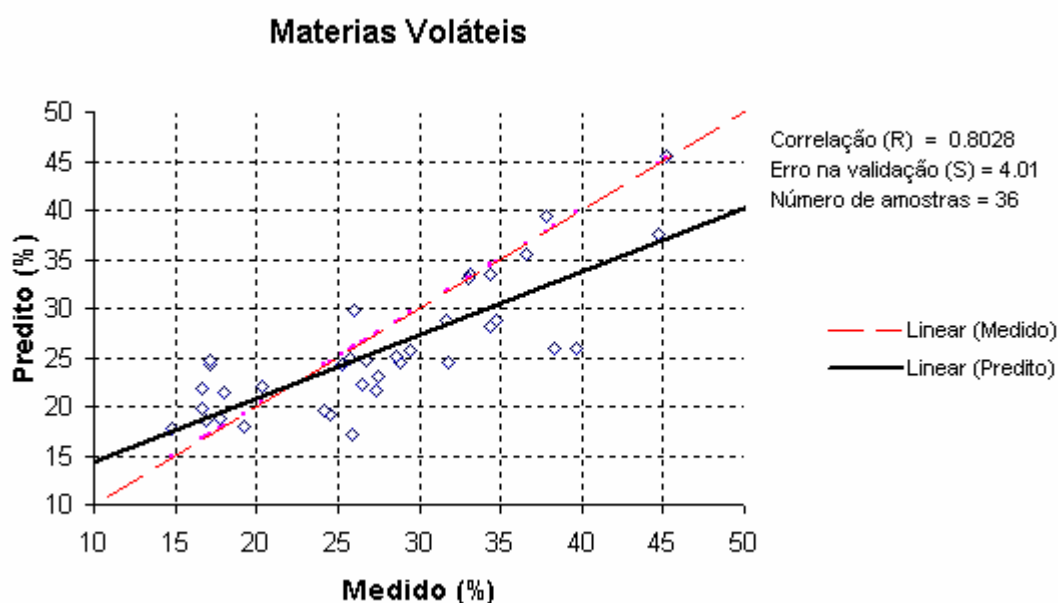


Figura 18 – Validação para o teor de matérias voláteis do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 1600 nm)

4.9.2.2.1 Modelos de Calibração por Espécie

A Tabela 27 apresenta os modelos, constantes e variáveis de calibração e validação por espécie para o teor de matérias voláteis na faixa de 1500-1600 nm. Das doze espécies, nove apresentaram melhores correlações na calibração, em

relação ao ajuste realizado para todas as espécies. Na validação, apenas o coeficiente de correlação do *E. camaldulensis* apresentou um menor coeficiente de correlação do que o ajuste realizado para todas as espécies.

Os maiores coeficientes de correlação foram obtidos em *Qualea grandiflora* (R=0,95), a partir do modelo $Y = a + \left(\frac{b}{x}\right)$ e *Eucalyptus urophylla* clonado (R=0,94), a partir do modelo $Y = a + \left(\frac{b}{x}\right)$, e o menor foi em *Piptadenia gonoacantha* (R=0,58), a partir do modelo $Y = a + \left(\frac{b}{x}\right)$. Na validação, o maior coeficiente de correlação foi obtido em *Caryocar brasiliense* (R=0,99), e o menor valor em *Eucalyptus camaldulensis* (R=0,75).

Tabela 27 – Modelos, constantes (a,b), erro padrão da calibração (Epc), coeficiente de correlação da calibração (Rc), erro padrão da validação (Epv), coeficiente de correlação da validação (Rp) e erro padrão da predição (Epp) para o teor de matérias voláteis na faixa de 1500-1600 nm.

Espécie	Modelo	a	b	Epc	Rc	Epv	Rp	Epp
1-12	y=a+bx	68,39	-1694,06	5,31	0,79	4,01	0,80	5,26
1	y=ab ^x	8,48	1,03	7,76	0,74	5,00	0,90	4,98
2	y=a+bx	-27,78	1,43	4,44	0,91	2,48	0,93	8,22
3	y=a+bx	-1,55	0,6907	4,93	0,83	2,13	0,90	6,34
4	y=a+b/x	72,01	-1945,73	4,87	0,82	5,32	0,75	8,70
5	y=a+b/x	72,84	-2057,47	3,74	0,94	4,11	0,97	8,78
6	y=a+b/x	107,49	-3218,90	4,38	0,88	3,06	0,99	3,38
7	y=a+bx	-18,77	1,05	3,28	0,95	8,32	0,96	11,03
8	y=a+bx	-5,12	0,71	4,86	0,61	0,83	0,94	8,27
9	y=a+bx	-35,92	1,48	2,58	0,96	8,02	0,95	11,43
10	y=a+b/x	60,46	-1306,21	4,77	0,83	1,27	0,83	7,69
11	y=a+b/x	61,22	-1419,82	6,42	0,58	2,22	0,96	2,56
12	y=a+b/x	75,43	-1961,2	6,36	0,83	1,89	0,92	10,73

Em que {1} = *E. spp (Lyptus)*; {2} = *E. cloeziana*; {3} = *E. urophylla*; {4} = *E. camaldulensis*; {5} = *E. urophylla* (clone); {6} *Caryocar brasiliense*; {7} = *Qualea grandiflora*; {8} = *Magonia pubencens*; {9} = *Inga laurina*; {10} = *Bowdichia virgiloides*; {11} = *Piptadenia gonoacantha*; {12} = *Dipterix alata*.

4.9.2.3 Média dos espectros entre 1700-1800 nm

Os valores estimados a partir do modelo ajustado $Y = a+bx$ foram utilizados para calibração/validação. Considerando todas as espécies, obteve-se um coeficiente de correlação (R) igual 0,84 na calibração, enquanto que o coeficiente de correlação (R) foi de 0,82 na validação. As Figuras 19 e 20 mostram a distribuição dos pontos na calibração e validação, respectivamente. Observou-se que os coeficientes de correlação na calibração e validação são maiores e o erro padrão é menor na faixa de 1700-1800 nm em relação à faixa de menor comprimento (1500-1600nm) e valores similares de correlação e erro padrão na faixa de 1500-2000 nm.

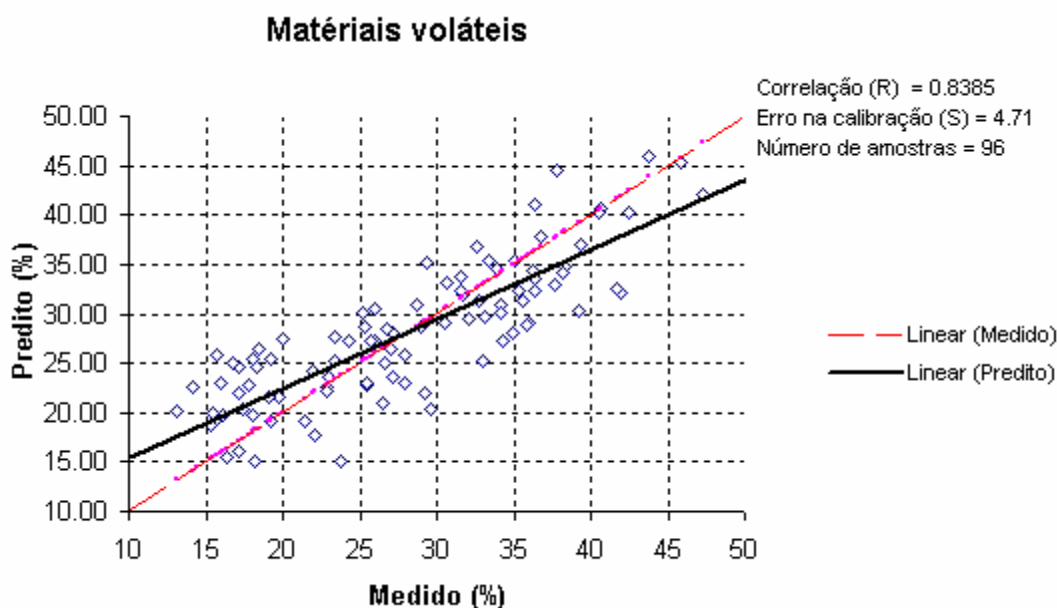


Figura 19 – Calibração para o teor de matérias voláteis do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1700 e 1800 nm)

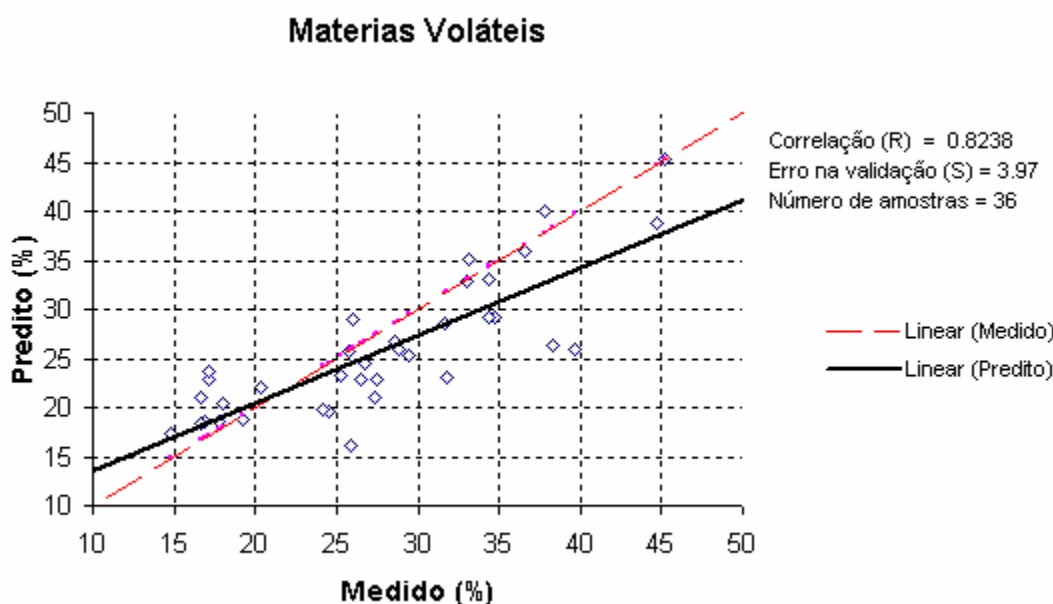


Figura 20 – Validação para o teor de matérias voláteis do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1700 e 1800 nm)

4.9.2.3.1 Modelos de Calibração por Espécie

A Tabela 28 apresenta os modelos, constantes e variáveis de calibração e validação por espécie para o teor de matérias voláteis na faixa de 1700-1800 nm. Das doze espécies, dez apresentaram melhores correlações na calibração em relação ao ajuste realizado para todas as espécies. Na validação, todos os ajustes por espécie apresentaram um maior coeficiente de correlação do que ajuste realizado para todas as espécies. Os maiores coeficientes de correlação foram obtidos em *Qualea grandiflora* (R=0,95), a partir do modelo $Y=a+bx$ e *Eucalyptus urophylla* clonado (R=0,96), a partir do modelo $Y = a + \left(\frac{b}{x}\right)$, e o menor foi em *Piptadenia gonoacantha* (R=0,69), a partir do modelo $Y = a + \left(\frac{b}{x}\right)$. Na validação, o maior coeficiente de correlação foi obtido em *Caryocar brasiliense* (R=0,99) e o menor valor em *Eucalyptus camaldulensis* (R=0,83).

Tabela 28 – Modelos, constantes (a,b), erro padrão da calibração (Epc), coeficiente de correlação da calibração (Rc), erro padrão da validação (Epv), coeficiente de correlação da validação (Rp) e erro padrão da predição (Epp) para o teor de matérias voláteis na faixa de 1700-1800 nm.

Espécie	Modelo	a	b	Epc	Rc	Epv	Rp	Epp
1-12	y=a+bx	62,7	-1498,98	4,71	0,84	3,97	0,82	5,05
1	y=a+b/x	77,93	-2226,60	5,08	0,90	3,85	0,98	5,27
2	y=a+bx	-18,52	1,16	3,91	0,93	2,32	0,95	8,58
3	y=a+bx	2,77	0,5630	4,49	0,86	1,90	0,93	6,02
4	y=a+b/x	62,36	-1583,02	4,22	0,87	4,31	0,83	7,87
5	y=a+b/x	64,98	-1767,33	3,26	0,96	3,99	0,98	7,31
6	y=a+bx	88,89	-2518,28	3,50	0,93	2,63	0,99	3,30
7	y=a+bx	-6,79	0,7503	3,52	0,95	7,02	0,97	9,63
8	y=a+bx	-2,31	0,6286	4,34	0,71	1,39	0,87	8,80
9	y=a+bx	-19,52	1,06	3,21	0,94	7,64	0,96	9,93
10	y=a+b/x	55,88	-1146,45	4,43	0,85	1,90	0,85	6,97
11	y=a+b/x	62,03	-1493,84	5,76	0,69	2,08	0,98	1,71
12	y=a+b/x	66,95	-1640,96	5,91	0,86	1,45	0,95	10,12

Em que {1} = *E. spp (Lyptus)*; {2} = *E. cloeziana*; {3} = *E. urophylla*; {4} = *E. camaldulensis*; {5} = *E. urophylla* (clone); {6} *Caryocar brasiliense*; {7} = *Qualea grandiflora*; {8} = *Magonia pubescens*; {9} = *Inga laurina*; {10} = *Bowdichia virgiloides*; {11} = *Piptadenia gonoacantha*; {12} = *Dipterix alata*.

4.9.2.4 Média dos espectros entre 1900-2000 nm

Os valores estimados a partir do modelo ajustado $Y = a+bx$ foram utilizados para calibração/validação. Considerando todas as espécies, obteve-se, na calibração, um coeficiente de correlação (R) igual 0,85, enquanto que o coeficiente de correlação (R) foi de 0,83 na validação. As Figura 21 e 22 mostram a distribuição dos pontos na calibração e validação, respectivamente. Observou-se que os coeficientes de correlação na calibração e validação são maiores e o erro padrão é menor na faixa de 1900-2000 nm, em relação às demais faixas (1500-2000, 1500-1600 e 1700-1800 nm).

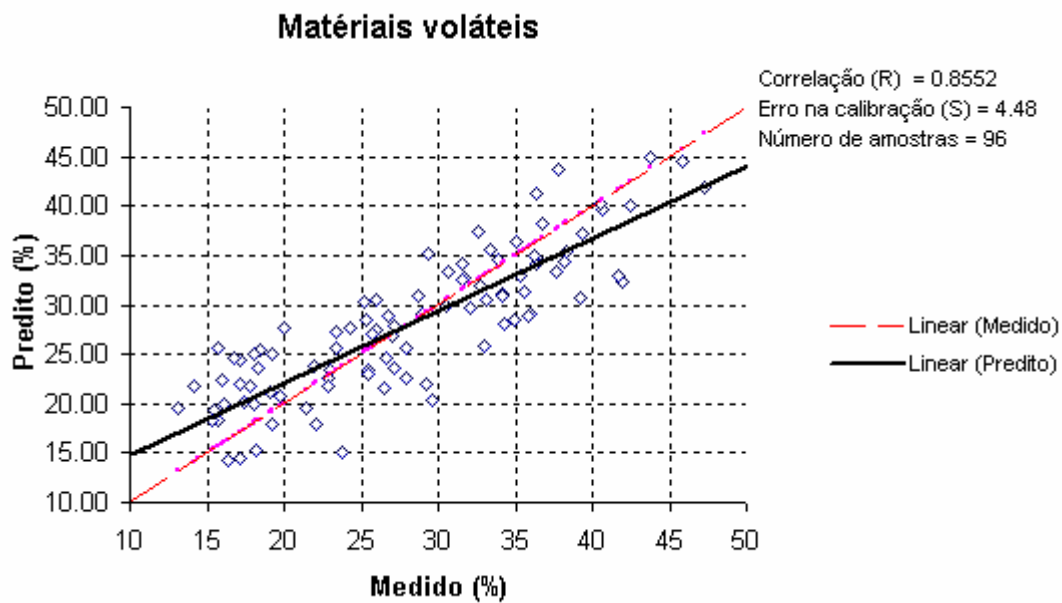


Figura 21 – Calibração para o teor de matérias voláteis do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1900 e 2000 nm)

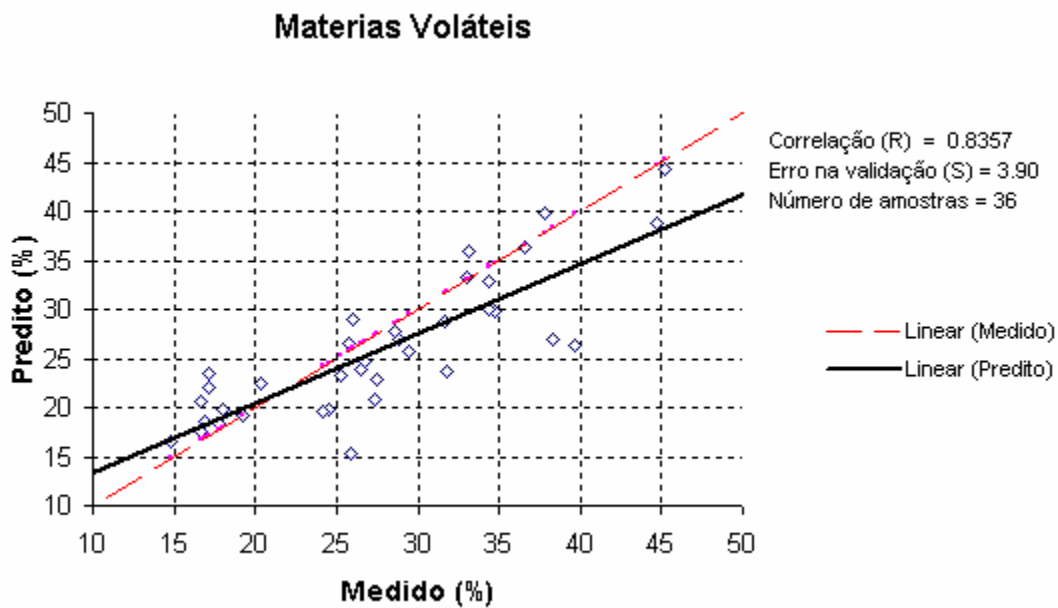


Figura 22 – Validação para o teor de matérias voláteis do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1900 e 2000 nm)

4.9.2.4.1 Calibração por espécie

A Tabela 29 apresenta os modelos, constantes e variáveis de calibração e

validação dos ajustes individuais por espécie para matérias voláteis na faixa de 1800-1900 nm. Das doze espécies, dez apresentaram melhores coeficientes de correlação na calibração, em relação ao ajuste realizado para todas as espécies. Na validação, todos os ajustes por espécie apresentaram um maior coeficiente de correlação quando comparados ao ajuste realizado para todas as espécies. Os maiores coeficientes de correlação foram obtidos em *Eucalyptus cloeziana* (R=0,95), a partir do modelo $Y = a + \left(\frac{b}{x}\right)$ e *Eucalyptus urophylla* clonado (R=0,97), a partir do modelo $Y = a + \left(\frac{b}{x}\right)$, e o menor foi em *Piptadenia gonoacantha* (R=0,72) a partir do modelo $Y = a + \left(\frac{b}{x}\right)$. Na validação, o maior coeficiente de correlação foi obtido em *Caryocar brasiliense* (R=0,99) e *Eucalyptus urophylla* clonado (R=0,99), e o menor valor em *Bowdichia virgiloides* (R=0,87).

Tabela 29 – Modelos, constantes (a,b), erro padrão da calibração (Epc), coeficiente de correlação da calibração (Rc), erro padrão da validação (Epv), coeficiente de correlação da validação (Rp) e erro padrão da predição (Epp) para o teor de matérias voláteis na faixa de 1900-2000 nm.

Espécie	Modelo	a	b	Epc	Rc	Epv	Rp	Epp
1-12	y=a+bx	60,41	-1512,34	4,48	0,85	3,90	0,84	4,88
1	y=a+bx	-8,07	0,7059	4,61	0,92	4,08	0,95	3,55
2	y=a+b/x	68,74	-1683,58	3,51	0,95	3,49	0,93	7,35
3	y=a+bx	3,25	0,5115	4,30	0,88	1,80	0,95	5,59
4	y=a+b/x	58,87	-1544,71	3,85	0,90	3,97	0,87	7,22
5	y=a+b/x	62,95	-1802,17	2,93	0,97	3,35	0,98	6,32
6	y=a+bx	-25,00	1,17	3,37	0,94	5,09	0,98	8,58
7	y=a+bx	-3,72	0,6271	3,27	0,95	5,82	0,97	7,38
8	y=a+bx	-1,43	0,5588	4,00	0,76	1,42	0,91	8,72
9	y=a+bx	-12,8	0,8295	3,61	0,92	6,61	0,96	8,28
10	y=a+b/x	55,04	-1194,59	4,09	0,88	2,06	0,87	6,63
11	y=a+b/x	61,09	-1582,72	5,49	0,72	2,13	0,98	1,62
12	y=a+b/x	65,74	-1703,31	5,50	0,88	1,61	0,95	9,76

Em que {1} = *E. spp (Lyptus)*; {2} = *E. cloeziana*; {3} = *E. urophylla*; {4} = *E. camaldulensis*; {5} = *E. urophylla* (clone); {6} = *Caryocar brasiliense*; {7} = *Qualea grandiflora*; {8} = *Magonia pubescens*; {9} = *Inga laurina*; {10} = *Bowdichia virgiloides*; {11} = *Piptadenia gonoacantha*; {12} = *Dipterix alata*.

4.9.3 Estimativa do Poder Calorífico Utilizando NIR

4.9.3.1 Média dos espectros entre 1500-2000 nm

Os valores estimados a partir do modelo ajustado $Y = \frac{ax}{(b+x)}$ foram

utilizados para calibração/validação. Na calibração, considerando todas as espécies, obteve-se um coeficiente de correlação (R) igual 0,70, enquanto que o coeficiente de correlação (R) foi de 0,73, na validação. As Figuras 23 e 24 mostram a distribuição dos pontos na calibração e validação, respectivamente.

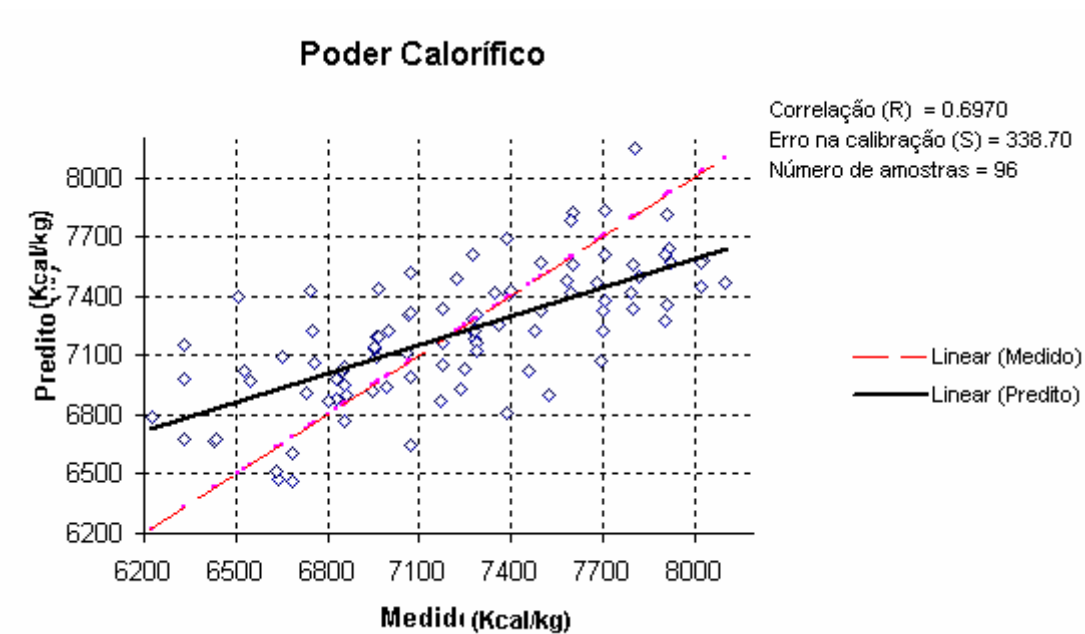


Figura 23 – Calibração para poder calorífico do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 2000 nm)

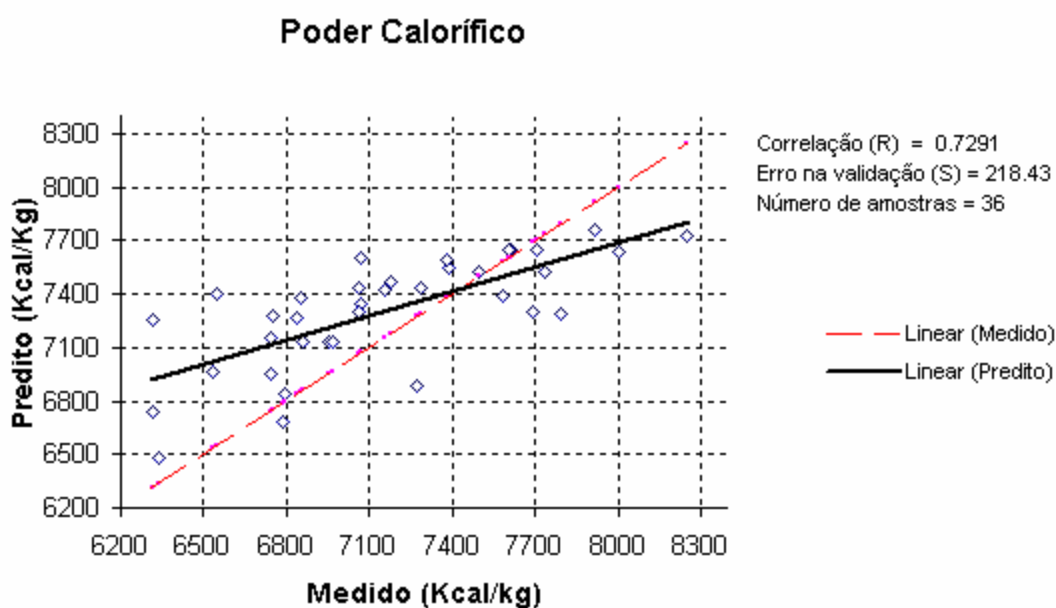


Figura 24 – Validação para poder calorífico do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 2000 nm)

4.9.3.1.1 Modelos de Calibração por Espécie

A Tabela 30 apresenta os modelos, constantes e variáveis de calibração e validação por espécie para poder calorífico na faixa de 1500-2000 nm. Das doze espécies, oito apresentaram melhores coeficientes de correlação na calibração e nove na validação, em relação ao ajuste realizado para todas as espécies. O maior coeficiente de correlação foi obtido em *Eucalyptus cloeziana* (R=0,92), a partir do modelo $Y = a + \left(\frac{b}{x}\right)$, e o menor, em *Eucalyptus camaldulensis* (R=0,61), a partir do modelo $Y = a + bx$. Na validação, os maiores coeficientes de correlação foram obtidos em *Eucalyptus cloeziana* (R=0,99), *Eucalyptus urophylla* clonado (R=0,99), *Caryocar brasiliense* (R=0,99), *Piptadenia gonoacantha* (R=0,99) e *Dipteryx alata* (R=0,99) e o menor valor, em *Eucalyptus camaldulensis* (R=0,52).

Tabela 30 – Modelos, constantes (a,b), erro padrão da calibração (Epc), coeficiente de correlação da calibração (Rc), erro padrão da validação (Epv), coeficiente de correlação da validação (Rp) e erro padrão da predição (Epp) para o poder calorífico na faixa de 1500-2000 nm

Espécie	Modelo	a	b	Epc	Rc	Epv	Rp	Epp
1-12	$y=ax/(b+x)$	5873,20	-8,01	338,70	0,70	218,43	0,72	377,19
1	$y=ax/(b+x)$	5787,70	-10,24	277,63	0,84	431,86	0,85	424,17
2	$y=a+b/x$	4960,38	110455,6	207,95	0,92	46,02	0,99	694,00
3	$y=a+bx$	8797,37	-34,35	206,14	0,91	79,98	0,97	533,68
4	$y=a+bx$	8431,82	-22,21	294,49	0,61	148,52	0,52	532,35
5	$y=ax/(b+x)$	6068,23	-8,15	203,30	0,89	44,46	0,99	205,07
6	$y=ax/(b+x)$	4943,09	-12,35	347,89	0,76	32,90	0,99	158,37
7	$y=ax/(b+x)$	5299,13	-9,46	237,16	0,89	629,87	0,66	457,18
8	$y=a+bx$	8230,98	-26,37	190,24	0,68	61,43	0,86	323,40
9	$y=a+bx$	9817,97	-54,32	220,65	0,90	784,38	0,80	569,63
10	$y=ax/(b+x)$	5830,49	-8,05	374,20	0,75	214,87	0,66	606,13
11	$y=ax/(b+x)$	5410,92	-10,96	260,87	0,82	86,90	0,99	315,75
12	$y=ax/(b+x)$	5964,12	-7,2	350,24	0,68	3,99	0,99	394,05

Em que {1} = *E. spp (Lyptus)*; {2} = *E. cloeziana*; {3} = *E. urophylla*; {4} = *E. camaldulensis*; {5} = *E. urophylla* (clone); {6} = *Caryocar brasiliense*; {7} = *Qualea grandiflora*; {8} = *Magonia pubescens*; {9} = *Inga laurina*; {10} = *Bowdichia virgiloides*; {11} = *Piptadenia gonoacantha*; {12} = *Dipterix alata*,

4.9.3.2 Média dos espectros entre 1500-1600 nm

Os valores estimados a partir do modelo ajustado $Y = ax/(b+x)$ foram utilizados para calibração/validação. Na calibração, considerando todas as espécies, obteve-se um coeficiente de correlação (R) igual 0,67 enquanto que, na validação, o coeficiente de correlação (R) foi de 0,73. As Figuras 25 e 26 mostram a distribuição dos pontos na calibração e validação, respectivamente.

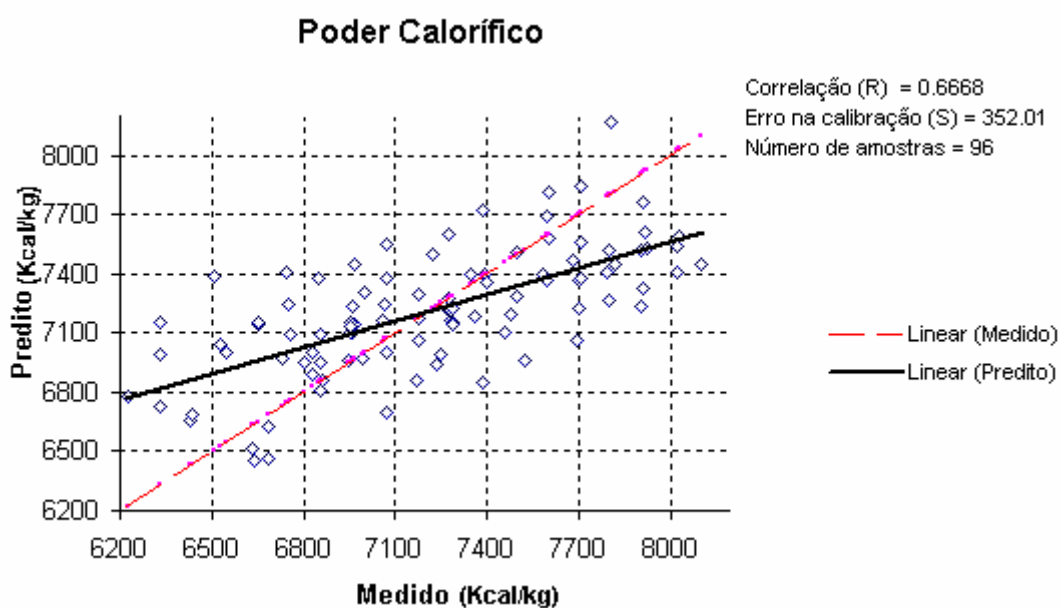


Figura 25 – Calibração para o poder calorífico do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 1600 nm)

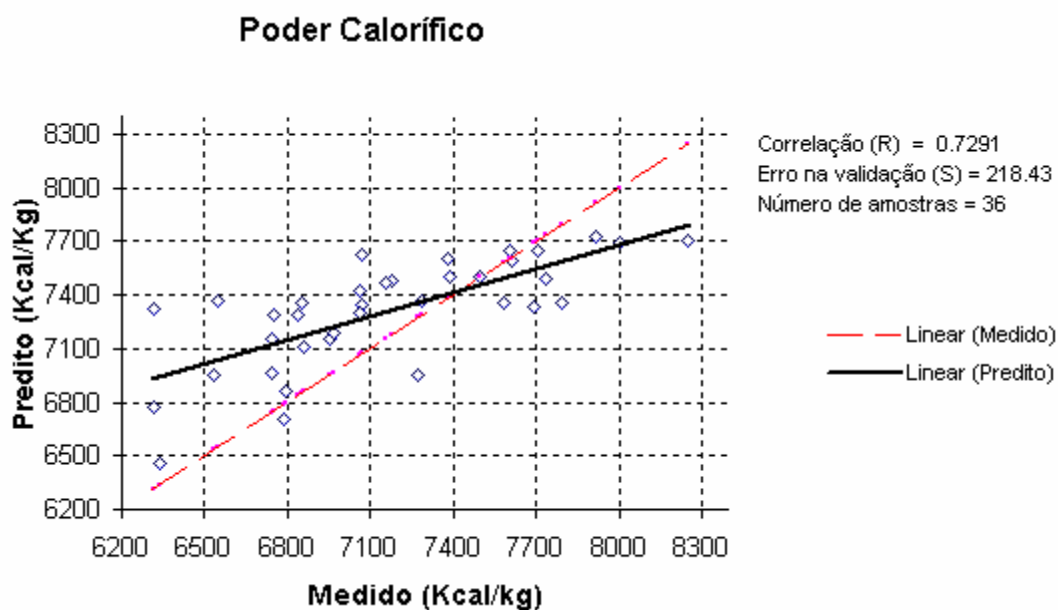


Figura 26 – Validação para poder calorífico do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 1600 nm)

4.9.3.2.1 Modelos de Calibração por Espécie

A Tabela 31 apresenta os modelos, constantes e variáveis de calibração e validação por espécie para poder calorífico na faixa de 1500-1600 nm. Das doze espécies, dez apresentaram melhores coeficientes de correlação na calibração em relação ao ajuste realizado para todas as espécies. Na validação, nove das doze espécies apresentaram um maior coeficiente de correlação do que ajuste realizado para todas as espécies. O maior coeficiente de correlação foi obtido em *Eucalyptus urophylla* (R=0,94), a partir do modelo $Y=a+bx$, e o menor foi em *Eucalyptus camaldulensis* (R=0,55), a partir do modelo $Y=a+bx$. Na validação, os maiores coeficientes de correlação foram obtidos em *Eucalyptus cloeziana* (R=0,99), *Eucalyptus urophylla* clonado (R=0,99), *Caryocar brasiliense* (R=0,99), *Piptadenia gonoacantha* (R=0,99) e *Dipteryx alata* (R=0,99) e o menor valor, em *Piptadenia gonoacantha* (R=0,21).

Tabela 31 – Modelos, constantes (a,b), erro padrão da calibração (Epc), coeficiente de correlação da calibração (Rc), erro padrão da validação (Epv), coeficiente de correlação da validação (Rp) e erro padrão da predição (Epp) para o poder calorífico na faixa de 1500-1600 nm.

Espécie	Modelo	a	b	Epc	Rc	Epv	Rp	Epp
1-12	$y=ax/(b+x)$	5710,47	-8,64	352,01	0,67	211,54	0,73	378,69
1	$y=a+bx$	8989,45	-35,03	393,34	0,63	146,41	0,94	302,72
2	$y=a+bx$	9276,13	-43,89	355,69	0,74	17,58	0,99	508,08
3	$y=a+bx$	9113,17	-43,71	170,71	0,94	101,1	0,94	490,09
4	$y=a+bx$	8653,31	-28,65	309,27	0,55	162,12	0,42	544,16
5	$y=ax/(b+x)$	5844,28	-9,15	187,55	0,91	53,77	0,99	152,07
6	$y=ax/(b+x)$	4559,39	-14,16	361,84	0,74	63,11	0,99	165,19
7	$y=ax/(b+x)$	5037,93	-10,8	251,58	0,87	759,8	0,60	547,72
8	$y=a+bx$	8312,34	-29,46	209,92	0,60	46,96	0,90	326,15
9	$y=a+bx$	10528,42	-73,99	227,97	0,89	838,65	0,81	624,61
10	$y=ax/(b+x)$	5755,54	-8,21	409,63	0,69	133,11	0,21	598,49
11	$y=ax/(b+x)$	5634,11	-10,79	304,9	0,74	52,41	0,99	725,33
12	$y=ax/(b+x)$	5795,98	-7,94	362,72	0,65	13,23	0,99	412,85

Em que {1} = *E. spp (Lyptus)*; {2} = *E. cloeziana*; {3} = *E. urophylla*; {4} = *E. camaldulensis*; {5} = *E. urophylla* (clone); {6} *Caryocar brasiliense*; {7} = *Qualea grandiflora*; {8} = *Magonia Pubencens*; {9} = *Inga laurina*; {10} = *Bowdichia virgiloides*; {11} = *Piptadenia gonoacantha*; {12} = *Dipterix alata*.

4.9.3.3 Média dos espectros entre 1700-1800 nm

Os valores estimados a partir do modelo ajustado $Y = ax/(b+x)$ foram utilizados para calibração/validação. Na calibração, considerando todas as espécies, obteve-se um coeficiente de correlação (R) igual 0,69, enquanto que, na validação, o coeficiente de correlação (R) foi de 0,72. As Figuras 27 e 28 mostram a distribuição dos pontos na calibração e validação respectivamente. Observou-se que os coeficientes de correlação na calibração e validação são maiores e o erro padrão é menor na faixa de 1700-1800 nm em relação à faixa de menor comprimento (1500-1600nm) e valores similares de correlação e erro padrão na faixa de 1500-2000 nm.

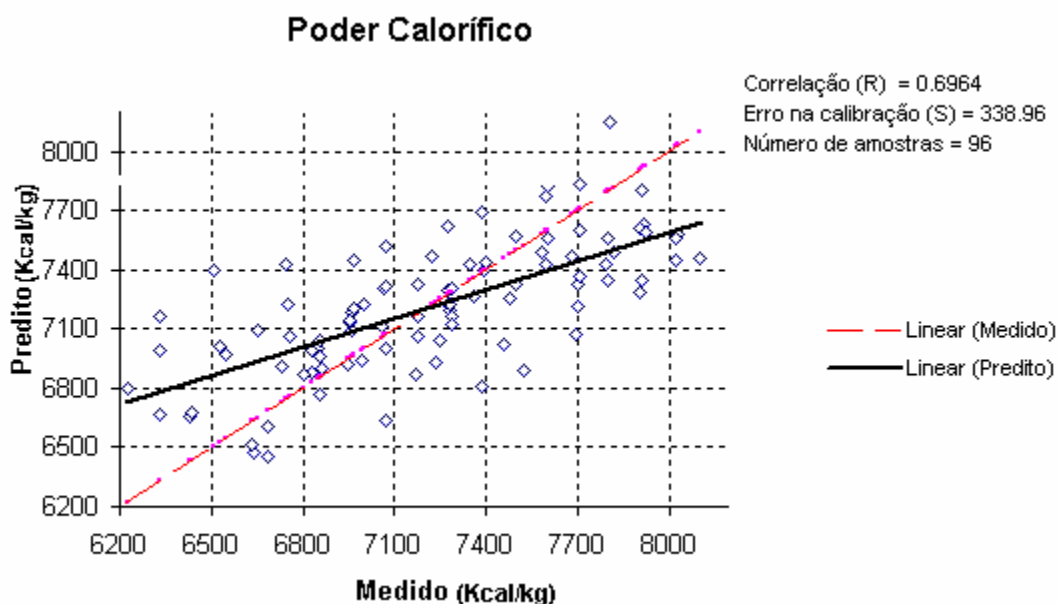


Figura 27 – Calibração para o poder calorífico do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1700 e 1800 nm)

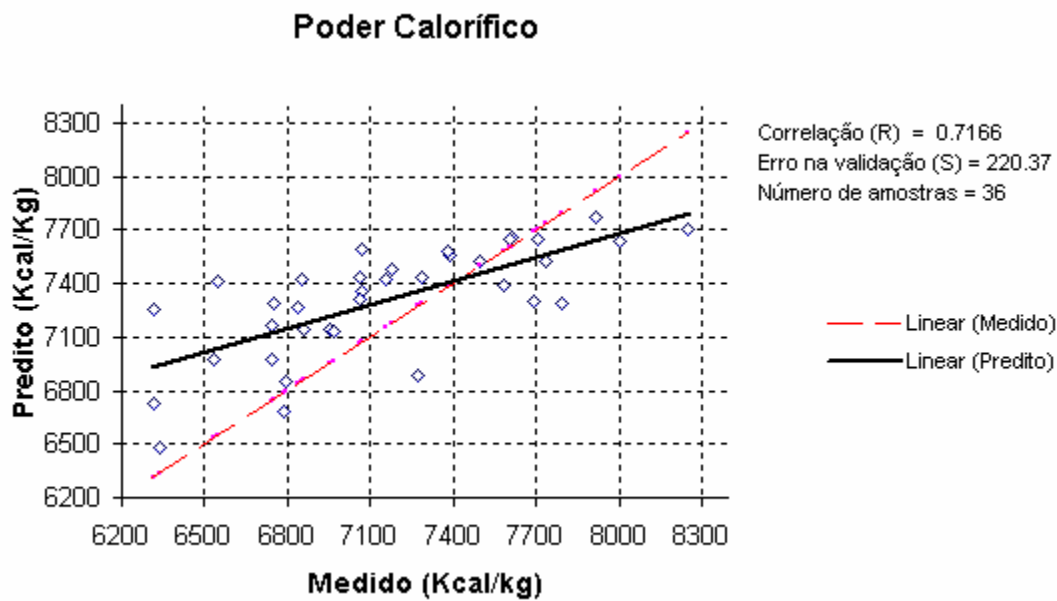


Figura 28 – Validação para poder calorífico do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1700 e 1800 nm)

4.9.3.3.1 Modelos de Calibração por Espécie

A Tabela 32 apresenta os modelos, constantes e variáveis de calibração e validação por espécie para poder calorífico na faixa de 1700-1800 nm. Das doze espécies, onze apresentaram melhores coeficientes de correlação na calibração em relação ao ajuste realizado para todas as espécies. Na validação, nove das doze espécies apresentaram um maior coeficiente de correlação quando comparado ao ajuste realizado para todas as espécies. O maior coeficiente de correlação foi obtido em *Eucalyptus cloeziana* (R=0,92), a partir do modelo $Y = a + \left(\frac{b}{x}\right)$, e o menor foi em *Eucalyptus camaldulensis* (R=0,61), a partir do modelo $Y=a+bx$. Na validação, os maiores coeficientes de correlação foram obtidos a partir do *Eucalyptus cloeziana* (R=0,99), *Eucalyptus urophylla* clonado (R=0,99), *Caryocar brasiliense* (R=0,99), *Piptadenia gonoacantha* (R=0,99) e *Dipteryx alata* (R=0,99) e o menor valor, em *Eucalyptus camaldulensis* (R=0,51).

Tabela 32 – Modelos, constantes (a,b), erro padrão da calibração (Epc), coeficiente de correlação da calibração (Rc), erro padrão da validação (Epv), coeficiente de correlação da validação (Rp) e erro padrão da predição (Epp) para o poder calorífico na faixa de 1700-1800 nm

Espécie	Modelo	a	b	Epc	Rc	Epv	Rp	Epp
1-12	$y=ax/(b+x)$	5896,58	-7,77	338,96	0,70	220,37	0,72	381,00
1	$y=ax/(b+x)$	5830,38	-9,85	272,89	0,84	424,79	0,85	418,66
2	$y=a+b/x$	5051,98	104880,7	207,77	0,92	49,91	0,99	686,07
3	$y=a+bx$	8731,73	-33,11	209,47	0,91	77,89	0,97	547,28
4	$y=a+bx$	8410,45	-21,99	293,01	0,61	144,41	0,51	533,19
5	$y=ax/(b+x)$	6095,5	-7,90	204,99	0,89	48,96	0,99	213,45
6	$y=ax/(b+x)$	4990,06	-11,92	352,94	0,76	39,76	0,99	162,95
7	$y=ax/(b+x)$	5323,85	-9,18	243,79	0,88	628,54	0,67	454,97
8	$y=a+bx$	8179,8	-25,56	191,9	0,68	69,36	0,80	332,9
9	$y=a+bx$	9784,14	-54,26	220,48	0,90	798,24	0,80	580,11
10	$y=ax/(b+x)$	5860,75	-7,78	376,68	0,74	217,05	0,44	612,41
11	$y=ax/(b+x)$	5436,85	-10,66	257,81	0,82	88,86	0,99	329,24
12	$y=ax/(b+x)$	5994,24	-6,93	349,77	0,68	0,46	0,99	394,32

Em que {1} = *E. spp (Lyptus)*; {2} = *E. cloeziana*; {3} = *E. urophylla*; {4} = *E. camaldulensis*; {5} = *E. urophylla* (clone); {6} *Caryocar brasiliense*; {7} = *Qualea grandiflora*; {8} = *Magonia pubescens*; {9} = *Inga laurina*; {10} = *Bowdichia virgiloides*; {11} = *Piptadenia gonoacantha*; {12} = *Dipterix alata*.

4.9.3.4 Média dos espectros entre 1900-2000 nm

Os valores estimados a partir do modelo ajustado $Y = ax/(b+x)$ foram utilizados na calibração/validação. Na calibração, considerando todas as espécies, obteve-se um coeficiente de correlação (R) igual 0,71, enquanto que, na validação, o coeficiente de correlação (R) foi de 0,72. As Figuras 29 e 30 mostram a distribuição dos pontos na calibração e validação, respectivamente. Observou-se que os coeficientes de correlação na calibração e validação são maiores e o erro padrão é menor na faixa de 1900-2000 nm em relação às demais faixas (1500-2000, 1500-1600 e 1700-1800 nm).

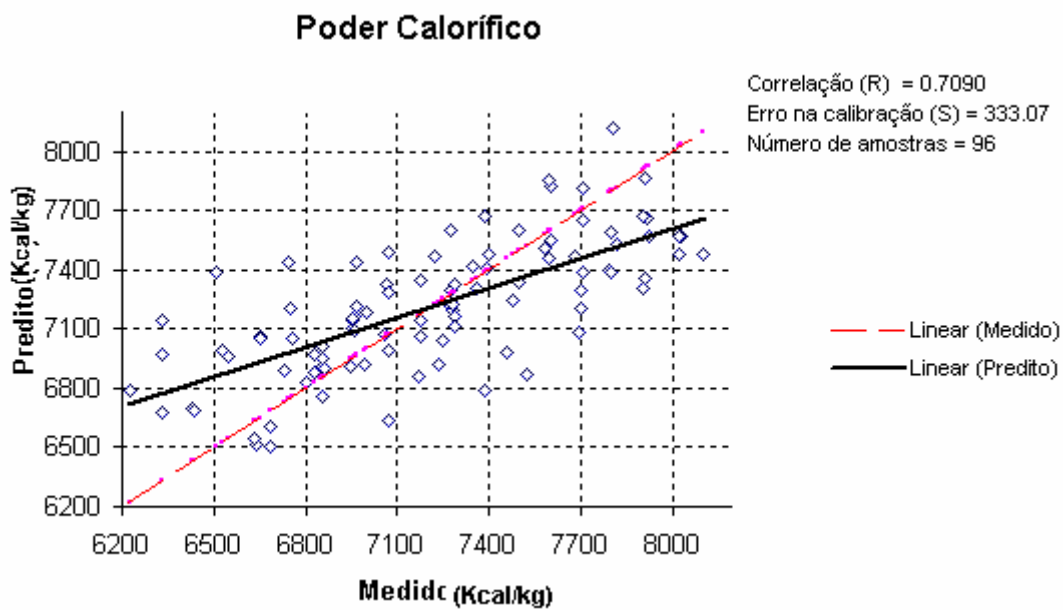


Figura 29 – Calibração para o poder calorífico do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1900 e 2000 nm)

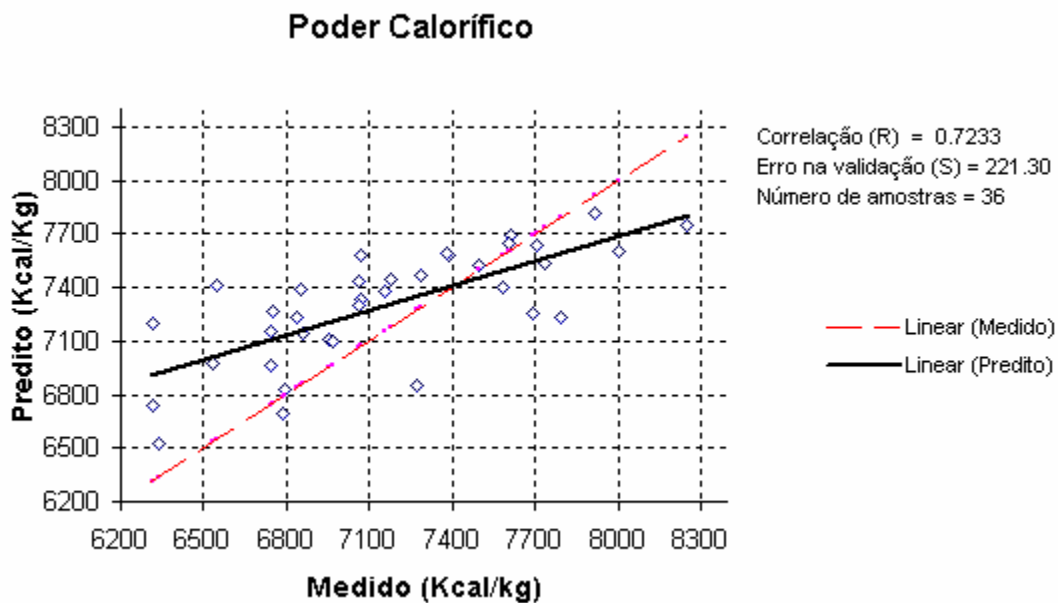


Figura 30 – Validação para o poder calorífico do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1900 e 2000 nm)

4.9.3.4.1 Modelos de Calibração por Espécie

A Tabela 33 apresenta os modelos, constantes e variáveis de calibração e validação por espécie para poder calorífico na faixa de 1900-2000 nm. Das doze espécies, onze apresentaram melhores coeficientes de correlação na calibração em relação ao ajuste realizado para todas as espécies. Na validação, nove das doze espécies apresentaram um maior coeficiente de correlação quando comparados com o ajuste realizado para todas as espécies. O maior coeficiente de correlação foi obtido em *Eucalyptus cloeziana* (R=0,94), a partir do modelo $Y = a + \left(\frac{b}{x}\right)$, e o menor foi em *Eucalyptus camaldulensis* (R=0,63), a partir do modelo $Y=a+bx$. Na validação, os maiores coeficientes de correlação foram obtidos em *Eucalyptus cloeziana* (R=0,99), *Eucalyptus urophylla* clonado (R=0,99), *Caryocar brasiliense* (R=0,99), *Piptadenia gonoacantha* (R=0,99) e *Dipteryx alata* (R=0,99) e o menor valor, em *Eucalyptus camaldulensis* (R=0,57).

Tabela 33 – Modelos, constantes (a,b), erro padrão da calibração (Epc), coeficiente de correlação da calibração (Rc), erro padrão da validação (Epv), coeficiente de correlação da validação (Rp) e erro padrão da predição (Epp) para o poder calorífico na faixa de 1900-2000 nm.

Espécie	Modelo	a	b	Epc	Rc	Epv	Rp	Epp
1-12	$y=ax/(b+x)$	5973,58	-7,89	333,07	0,71	221,31	0,73	375,42
1	$y=a+b/x$	5593,83	93493,50	238,45	0,88	416,74	0,84	402,41
2	$y=a+b/x$	5245,59	105712	175,79	0,94	57,57	0,99	723,83
3	$y=a+bx$	8655,21	-29,03	228,38	0,88	65,11	0,98	547,19
4	$y=a+bx$	8314,37	-18,20	286,31	0,63	144,59	0,57	521,71
5	$y=ax/(b+x)$	6169,48	-8,00	208,01	0,88	19,01	0,99	233,62
6	$y=ax/(b+x)$	5141,97	-11,83	339,25	0,78	9,93	0,99	146,57
7	$y=ax/(b+x)$	5439,99	-9,05	219,98	0,91	535,1	0,69	399,53
8	$y=a+bx$	8126,69	-22,34	182,56	0,71	72,61	0,84	321,46
9	$y=a+bx$	9640,52	-43,03	226,71	0,89	720,6	0,81	547,06
10	$y=ax/(b+x)$	5870,7	-8,30	350,77	0,78	258,69	0,90	608,16
11	$y=ax/(b+x)$	5516,33	-11,10	242,64	0,85	99,51	0,99	356,22
12	$y=ax/(b+x)$	6026,65	-7,21	340,06	0,71	1,52	0,99	378,3

Em que {1} = *E. spp (Lyptus)*; {2} = *E. cloeziana*; {3} = *E. urophylla*; {4} = *E. camaldulensis*; {5} = *E. urophylla* (clone); {6} *Caryocar brasiliense*; {7} = *Qualea grandiflora*; {8} = *Magonia Pubencens*; {9} = *Inga laurina*; {10} = *Bowdichia virgiloides*; {11} = *Piptadenia gonoacantha*; {12} = *Dipterix alata*.

4.9.4 Estimativa das cinzas e massa específica aparente do carvão utilizando NIR

Não foi possível estimar massa específica aparente e cinzas para todas as faixas avaliadas a partir da reflectância do NIR. No caso do teor de cinzas, a dificuldade no ajuste se deve a característica dos compostos inorgânicos, que, geralmente, não são infravermelho-ativos. Pode ser verificado o insucesso da tentativa de utilização do NIR para o teor de cinzas na *Figura 31* (Anexo).

No caso da massa específica aparente do carvão, a dificuldade no ajuste de modelos pode-ser explicada pela metodologia utilizada quando se fez moagem do carvão, destruindo-lhe a estrutura; de certa forma, tal procedimento altera a variável volume, provavelmente interferindo nos resultados da massa específica aparente do carvão. Pode ser verificado o insucesso da tentativa de utilização do NIR para massa específica aparente nas Figuras 35 a 37 (Anexo).

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

Massa específica básica da madeira: As espécies nativas, apresentaram maior variabilidade na massa específica dos que as espécies do gênero *Eucalyptus*. Destacaram-se o *Dypteryx alata* (0,67 g/cm³) com maior massa específica básica e a *Qualea grandiflora* (0,41 g/cm³) com a menor massa específica básica entre todas as espécies.

Teor de carbono fixo do carvão: O teor de carbono fixo para o grupo dos eucaliptos não foi afetado pela espécie. No grupo das espécies nativas, a espécie *Qualea grandiflora* (64,03%) apresentou o menor valor em carbono fixo. A marcha de carbonização afetou o teor de carbono fixo, apresentando uma correlação positiva com a temperatura final de carbonização.

Teor de matérias voláteis do carvão: O teor de matérias voláteis não foi afetado pela espécie no gênero *Eucalyptus*. No grupo das espécies nativas, destacaram-se a *Qualea grandiflora* (30,09%) com maior valor médio em teor de matérias voláteis e a *Magonia pubences* (24,64%), com menor valor médio. A marcha de carbonização afetou o teor de matérias voláteis, observando-se uma correlação negativa entre esta propriedade e o tempo e temperatura final de carbonização.

Teor de cinzas do carvão: O teor de cinzas foi afetado pela espécie. No gênero *Eucalyptus* destacou-se o *Eucalyptus urophylla* (3,48%), com maior valor médio. No grupo das espécies nativas, destacaram-se a *Qualea grandiflora* (5,66%) e *Dypteryx alata* (3,13%) com maior e menor valor médio em teor de cinzas, respectivamente. As marchas de carbonização não afetaram o teor de cinzas.

Poder calorífico do carvão: O poder calorífico não foi afetado pela espécie no gênero *Eucalyptus*. Entre as espécies nativas, destacou-se a *Qualea grandiflora* que apresentou o menor valor médio em poder calorífico (6673,14 kcal/kg) e *Inga laurina* com maior valor médio (7373,90 kcal/kg). As marchas de carbonização afetaram o poder calorífico, observando-se uma correlação positiva entre poder calorífico e tempo e temperatura final de carbonização.

Massa específica aparente do carvão: A massa específica aparente do carvão foi afetada pela espécie. No grupo dos eucaliptos, destacaram-se o *Eucalyptus urophylla* (0,49 g/cm³) e o *Eucalyptus camaldulensis* (0,36 g/cm³), com o maior e menor valor médio, respectivamente. Entre as nativas, destacaram-se o *Dypteryx alata* (0,58 g/cm³) e a *Piptadenia gonoacantha* (0,34 g/cm³), com o maior e menor valor médio, respectivamente. As marchas de carbonização não afetaram a massa específica aparente.

Rendimento gravimétrico do carvão: O rendimento gravimétrico foi afetado pela espécie. Destacou-se o *Eucalyptus urophylla* clonado (31,17%), que apresentou o menor valor em rendimento gravimétrico. Entre as nativas destacou-se a *Qualea grandiflora* (41,39%) que apresentou maior valor em rendimento gravimétrico. As marchas de carbonização afetaram o rendimento gravimétrico, observando-se uma correlação negativa entre rendimento gravimétrico e tempo e temperatura final de carbonização.

Umidade do carvão: A umidade do carvão não foi afetada pela espécie. As marchas de carbonização afetaram a umidade do carvão, observando-se para a “marcha 3”, um valor médio de 6,68%, valor significativamente superior às demais marchas, que apresentaram um teor médio de umidade igual a 5,72%.

Estimativa das propriedades a partir dos espectros: Os espectros realizados na região do infravermelho se mostraram adequados para prever os

teores de carbono fixo, matérias voláteis e poder calorífico do carvão em todas as faixas estudadas.

A faixa 1900- 2000 nm apresentou os maiores coeficientes de correlação com as propriedades do carvão, em todas as situações analisadas. Nessa faixa, obtiveram-se os coeficientes de correlação de 0,83; 0,84; e 0,71, respectivamente, para determinação do teor de carbono fixo, matérias voláteis e poder calorífico, para as doze espécies estudadas

O ajuste de modelos por espécie apresentou, na maioria dos casos, maiores coeficientes de correlação quando se ajustaram os modelos, levando-se em consideração mais de uma espécie.

As faixas do infravermelho próximo possibilitaram a previsão das propriedades do carvão; a faixa que resultou em melhores coeficientes de correlação para todas as propriedades foi aquela compreendida entre 1900-2000 nm. Analisando individualmente as espécies, os maiores coeficientes de correlação foram encontrados no clone de *Eucalyptus urophylla*, com 0,97; 0,96 e 0,91, respectivamente, para os teores de carbono fixo, matérias voláteis e poder calorífico. É de se esperar que a madeira clonada tenha uma maior homogeneidade, favorecendo a previsibilidade das propriedades, a partir da espectroscopia.

Uma pequena faixa do espectro infravermelho foi suficiente para a previsão de algumas propriedades importantes do carvão. Isso indica a possibilidade de uso de um aparelho de baixo custo, com faixa estreita de leitura no infravermelho para prever propriedades do carvão.

Não foi possível prever o teor de cinzas e a massa específica aparente do carvão por espectroscopia.

6 RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados e conclusões, recomendam-se

- Cautela na extrapolação dos dados por se tratar de situações muito específicas, em vista do material e das técnicas de avaliação utilizadas.
- Realização de pré-testes para identificar a melhor combinação dos fatores envolvidos.
- Ampliação da base de informação sobre as possibilidades de uso intensivo das técnicas de espectroscopia nas avaliações do carvão vegetal.
- Os ensaios de espectroscopia devem ser realizados em condições padronizadas, sob restritos cuidados com as técnicas laboratoriais, as análises estatísticas e interpretação dos resultados.
- A distância entre a amostra e o ponto de emissão e recepção de luz deve ser constante, para evitar quaisquer interferências nos resultados.
- Recomendam-se cuidados com a grande variação nos espectros, resultantes da superfície irregular das amostras sólidas de carvão.

- Quando possível, recomenda-se realizar espectros com o pó do carvão, a fim de se obter leituras espectrais constantes, para algumas propriedades do carvão.
- Deve-se utilizar amostras com ampla variação de suas propriedades, de forma que o ajuste de equações seja realizado de maneira eficiente, permitindo uma predição adequada em outras amostras.
- Para novos estudos, recomendam-se:
 - Classificar o pó em várias faixas granulométricas e realizar espectros verificando os coeficientes de correlação obtidos entre granulometrias diferenciadas.
 - Utilizar a mesma amostra (moída) para se realizar os espectros e as análises químicas.
 - Desenvolver um método para transferência entre calibrações para os aparelhos.
 - Utilizar métodos matemáticos diferentes, que façam uso de uma maior quantidade de dados obtidos a partir de um espectrômetro: análise multivariada por componentes principais e outras transformações de variáveis.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6923/81 – Carvão Vegetal - Amostragem e preparação da amostras** . Rio de Janeiro-RJ.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5734/83 - Peneiras para ensaio – especificação** . Rio de Janeiro-RJ.

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

ABRAF. Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário estatístico da ABRAF – ano base 2005**. Brasília, 85p. 2006

ALMEIDA, J. M. Efeito da Temperatura Sobre o Rendimento e Propriedades dos Produtos da Carbonização de *E. grandis* W. Hilll ex Maiden. Viçosa-MG, 39 p. 1983. UFV. (Tese de Mestrado)

ALMEIDA, M. R., REZENDE, M.E.A. O Processo de carbonização contínua da madeira. In: **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte - MG, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC. 393p. 1982.

ALZATE, S. B. A. Caracterização da Madeira de Clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus Saligna* e *Eucalyptus grandis x urophylla*. Piracicaba – SP. ESALQ/USP. 151p. 2004 (Tese de Doutorado).

AMS - ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA. **Anuário: consumo de carvão vegetal (1000 mdc) – Brasil.** [17.08.2005a]. (http://www.silviminas.com.br/anuario%202003/2003_1.htm). 2005a

AMS - ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA-AMS. **Anuário: consumo de carvão por estado (1000 mdc).** [17.08.2005b]. (http://www.silviminas.com.br/anuario%202003/2003_3.htm). 2005b.

ANDRADE, A. M. Influência da Casca de *Eucalyptus grandis* W. HILL ex MAIDEN no Rendimento e Qualidade de Carvão Vegetal. Viçosa-MG. UFV. 86p. 1989. (Tese de Mestrado).

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

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-2015-66 Gross calorific value of solid fuel by the adiabatic bomb calorimeter.** Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D-1762-64 – Chemical analysis of wood charcoal.** Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials.

ASSIS, J. B. A Política Florestal em Minas Gerais. In: **Biomassa: Energia nos Trópicos em Minas Gerais**, p. 115-131. 2001

BALDUINO, A. P. C. Estrutura da Vegetação Lenhosa de Cerrado Strictu Sensu e sua Relação com o Solo na Estação Florestal de Experimentação de Paraopeba – MG. Viçosa – MG. UFV. 83 p. 2001 (Tese de Mestrado).

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional.** Brasília –

DF. 169p. 2004.

BARBOSA, J. A. Avaliação Qualitativa e Quantitativa do Carvão e dos Condensados Produzidos na Carbonização da Madeira de Algaroba (*Prosopis juliflora* DC.) Viçosa – MG. UFV. 47 p. 1986 (Tese de Mestrado)

BRITO, J. O. BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I – densidade e teor de lignina da madeira de Eucalipto. **IPEF**, n. 14, p. 09-20, 1977

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

BRITO, J. O; CINTRA, T. C. Madeira para Energia no Brasil: Realidade, Visão estratégica e Demanda de Ações. **Revista Biomassa e Energia**, v. 1, n. 2, abril junho, p. 157-163, 2004.

BRITO, J. O. Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira. **Documentos Florestais**, v. 9, p.1 – 21, 1990.

CARMO, J. S. Propriedades Físicas e Químicas do Carvão Vegetal Destinado à Siderurgia e Metalurgia. Viçosa - MG. 1988. (Monografia).

CEMIG - COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **19º Balanço energético do Estado de Minas Gerais: 2003**. Belo Horizonte: CEMIG, 2004. (Cd-Room).

COUTINHO, A. R. Qualidade do Carvão Vegetal Correlacionada com as Características da Madeira de *Eucaliptus saligna* e Temperatura de Carbonização. Piracicaba – SP. ESALQ/USP. 76 p. 1984. (Tese de Mestrado).

COUTO, L., MULLER, M. D., DIAS, A. N., TSUKAMOTO, A. de A., FONSECA, E. M. B. Espécies cultivada para Produção de Biomassa para Geração de Energia. **Companhia Energética de Minas Gerais**. Belo Horizonte – Minas Gerais – Brasil. 2003.

COUTO, L. C. C., COUTO, L., WATZLAVIC. L. F., FARINHA, L. Vias de Valorização Energética. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 1, p.71-92, 2004.

COTTA, A. M. G. Qualidade do Carvão Vegetal para Siderurgia. Viçosa - MG. 1996. (Monografia).

CUNHA, F. C. Modelos de calibração multivariada associados à espectroscopia vibracional para análise de misturas diesel- óleos vegetais. Brasília – UNB. 107 p. 2006. (Tese de mestrado)

CHEMICALNET. O mundo da química – Espectroscopia. [26/03/2005] <http://geocities.yahoo.com.br/chemicalnet/espectro.htm> . 2005

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS
Statistical Databases: FAOSTAT-Forestry. FAO. 2004. [21.10.2004].
(<http://www.faostat.fao.org/faostat>).

FARDIM, J., P.; FERREIRA, M. M. C.; DURAN, N. Multivariate calibration for quantitative analysis of eucalypt Kraft pulp by NIR spectrometry. **Journal of Wood Chemistry an Technology**. 22(1); 67-81. 2002.

FRANCO, L. M. L.; UMMUS, M. E.; LUZ, R. A. A Distribuição do Pequi (*Caryocar brasiliense*) na estação ecológica de Itirapina – SP. **Relatório de Pesquisa da USP**. [26/03/2005]. http://www.igeo.uerj.br/VICBG-2004/Eixo2/E2_110.htm#_ednref1. 2005

FERREIRA, M. Estudo da variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. Piracicaba- SP. ESALQ/USP. 62p. 1971 (Tese de Mestrado)

FERREIRA, M. Escolha de Espécies de Eucalipto. **Circular Técnica IPEF**, v.47, p.1-30, 1979.

FERREIRA, M. Melhoramento e Silvicultural Clonal Intensiva. **Circular Técnica IPEF**, n. 45, p. 22-30, 1992.

FONTES, A. A. A Cadeia Produtiva da Madeira para Energia. Viçosa - MG, UFV. 134 p. 2005 (Tese de Doutorado).

GINDL, W.; TEISCHINGER, A.; SCHANNINGER, M; HINTERSTOISSER, B. The

relationship between near infrared spectra of radial wood surfaces and wood mechanical properties. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**. 9 (4): 255-261 2001.

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

GRIFFIN, A. R.; RIVELLI, J. A. A comment on clonal eucalypt plantation. **Eucalyptus Improvement and Silviculture**, v. 1, n. 1, 5 p. 1993

KRUG, T. et al. Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases do Efeito Estufa – Emissões de Gases do Efeito Estufa da Queima de Biomassa no Cerrado Não Antrópico Utilizando Dados Orbitais. **Ministério da Ciência e Tecnologia**. Brasília – DF. 53 p. 2002.

LOPES, C. R. G. Produção de madeira, carvão e carbono em plantações de Eucalyptus cloeziana. **Revista Árvore**, v.25, p. 89-95, 1998.

LORA, E. E. da S. Perspectivas da utilização da biomassa com fins energéticos. XXVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. In: **Simpósio: Tecnologia e Aplicação Racional de Energia Elétrica e de Fontes Renováveis na Agricultura**. Campina Grande: UFPB.176p. 1997.

LORENZI, H. **Árvores Brasileiras: Manual de Identificação e Cultivo de Plantas Arbóreas Nativas do Brasil**. Nova Odessa – SP: Editora Plantarum. 350 p.ilust. 1992.

LORENZI, H. **Árvores Brasileiras: Manual de Identificação e Cultivo de Plantas Arbóreas Nativas do Brasil, Vol 2**. Nova Odessa – SP: Editora Plantarum. 350 p.ilust. 1998.

WIKIPEDIA. A enciclopédia livre. **Espectroscopia**. [15/03/2006]
<http://pt.wikipedia.org/wiki/Espectroscopia>. 2006a.

WIKIPÉDIA. A enciclopédia livre. **Espectroscopia de Infravermelho** [15/03/2006]
http://pt.wikipedia.org/wiki/Espectroscopia_de_infravermelho. 2006b.

WIKIPÉDIA. A enciclopédia livre. **Espectroscópio**. [15/03/2006]

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Espectrosc%C3%B3pio> . 2006c.

MACHADO, F. S.; ANDRADE, A. M. Propriedades Termoquímicas dos Finos de Carvão Vegetal e de Carvão mineral para a Injeção nas Ventaneiras de Altos-Fornos Siderúrgicos. **Revista Biomassa e Energia**, v. 1, n.4, p. 353-363, 2004.

MAGALHÃES, J. R. 2001. A Energia que vem da Floresta. In: **Biomassa; Energia que vem dos Trópicos em Minas Gerais**. p. 133-144.

MATARELLI, F. A.; LOPES, L. E. F.; CASTRO, L. F. A. Siderurgia a Carvão Vegetal. In: **Biomassa: Energia nos Trópicos em Minas Gerais**. 2001, 145 a 161p.

MEIRA, A. M. Diagnóstico Sócio-Ambiental e Tecnológico da Produção de Carvão Vegetal do Município de Pedra Bela Estado de São Paulo. Piracicaba- SP. ESALQ/USP. 99p. 2002 (Tese de Mestrado).

MICHELL, A. J.; HIGGINS, H. G. Infrared Spectroscopy in Australian Forest. Products Research. **CSIRO Forestry an Forest Products**, Melbourne. 56p. 2002.

MOURA, V. P. G. O germoplasma de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell no Brasil. **Comunicado Técnico**. Embrapa. Brasília – DF. Setembro de 2003.

MOURA, V. P. G. O germoplasma de *Eucalyptus urophylla* S. T Blake no Brasil. **Comunicado Técnico**. Embrapa. Brasília – DF. Dezembro de 2004.

MORA, A. L.; GARCIA, C. H. **A Cultura do Eucalipto no Brasil**. São Paulo: SBS, 112p. 2000.

NISGOSKI, S. Espectroscopia no Infravermelho Próximo no Estudo de Características da Madeira e Papel de *Pinus taeda* L. Curitiba – PR. UFPR 160p. 2005. (Tese de Doutorado).

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta, LORA, Electo Eduardo Silva, TROSSERO, Miguel Angel, FRISK, Torsten. **Dendroenergia: Fundamentos e Aplicações**. Brasília: ANEEL, 2000.

NUNES, W. H. ANDRADE, A. M. Pirólise do estipe de *Euterpe edulis* (palmitheiro). **Revista Floresta e Ambiente**, v 7, n. 1, p. 217-226, 2000.

OLIVEIRA , E. et. al. Estrutura antômica da Madeira e qualidade do carvão de *Mimosa tenuiflora* Willd Poir. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 30, n. 2, p. 311-318, 2006.

OLIVEIRA, E. de. Correlação Entre Parâmetros de Qualidade da Madeira e do Carvão de *Eucalyptus grandis* (W. Hill ex-Maiden).Viçosa – MG. UFV. 47 p. 1988. (Tese Mestrado).

OLIVEIRA, J. T.; S. HELLMEISTER, J. C.; SIMÕES, J. W.; FILHO, M. T. Caracterização da Madeira de Sete Espécies de Eucaliptos para a Construção Civil: 1- Avaliações Dendrométricas das Árvores. **Scientia Forestalis** n. 56, p. 113-124, dez. 1999.

OLIVEIRA, J. B. de., GOMES, P.A., ALMEIDA, M. R. Propriedades do carvão vegetal. In: **Carvão vegetal: destilação, carvoejamento, controle de qualidade**. Belo Horizonte – MG. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC. 173p. 1982a.

OLIVEIRA, J. B. de.,VIVACQUA FILHO, A., GOMES, P.A. Produção de carvão vegetal - aspectos técnicos. In: **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte – MG. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC. 393p. 1982b.

OLIVEIRA, J. B.; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R. DE. Estudos Preliminares de Normalização de Testes de Controle de Qualidade do Carvão Vegetal. In: **Carvão Vegetal: destilação, carvoejamento, propriedades, controle de qualidade**. Belo Horizonte – MG. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais -CETEC. 173p. 1982c.

PAULA, J. E.; SILVA JUNIOR, F. G.; SILVA, A. P. P. Caracterização Anatômica de Madeiras Nativas de Matas Ciliares do Centro-Oeste Brasileiro. **Revista Scientia forestalis**, n. 58, p. 73-89, dezembro 2002.

PAULA, J. E. Caracterização Anatômica de Madeiras Nativas do Cerrado com Vistas a Produção de Energia. **Revista Cerne**, v.5, n.2, p. 026-040, 1999.

PAULA, J. E. Caracterização anatômica de madeiras de espécies nativas do cerrado com visando sua utilização na produção de energia. **Revista Cerne**, v.11, n.1, p. 090-100, 2005.

PINHEIRO P. C. C.; SAMPAIO, R. Fornos de carbonização utilizados no Brasil. In: **Primeiro Congresso Internacional de Uso da Biomassa Plantada para Produção de Metais e Geração de Eletricidade**. Belo Horizonte – MG. Versão em CD-ROM. 2001.

RAAD, T. J. et. al. Equação geral de mecanismos cinéticos da carbonização de *Eucalyptus* spp. **Revista Cerne**, v. 12, n. 2, p. 93-106, 2006

RAYMOND, C. A.; SCHIMLECK, L. R. Development of near infrared reflectance analysis calibration for estimating genetic parameters for cellulose content in *Eucalyptus globules*. **Canadian Journal of Forest Research**. 32 (2) 170-176. 2002.

RIZZINI, C.T. **Árvores e Madeiras Úteis do Brasil: Manual de Dendrologia Brasileira**. São Paulo: E. Blucher, 1971. 294p.

ROCHA, F. T.; FLORSHEIM, S. M. B.; COUTO, H. T. Z. Variação das Dimensões dos Elementos Anatômicos da Madeira de Árvores de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden aos sete anos. **Rev. Inst. Flor.**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 43-55, jun. 2004.

RUY, O. F. **Variação da Qualidade da Madeira em Clones de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake da Ilha de Flores, Indonésia**. Piracicaba – SP. ESALQ/USP. 69 p. 1998 (Dissertação de Mestrado)

SANTOS, E. R. Análise florística e estrutura fitossociológica da vegetação lenhosa de um trecho de Cerrado strictu sensu do parque estadual do lajeado de Palmas – TO. Viçosa – MG. UFV. 64p. 2000. (Tese de Mestrado).

SANTIAGO, A. R. ANDRADE, A. M. Carbonização de resíduos do processamento mecânico da madeira de Eucalipto. **Revista Ciência Florestal**, v. 15, n. 1, p 01-07.

2006

SCANAVACA JUNIOR, L.; GARCIA, J. N. Determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla*. **Revista Scientia forestalis**, n. 65, p. 120-129, jun. 2004.

SCHIMLECK, L. R.; MICHELL, A. J.; RAYMOND, C. A.; MUNERY, A. Estimation of basic density of *Eucalyptus globules* using near-infrared spectroscopy. **Canadian Journal of Forest Research**. 29 (2): 194-201. 1999.

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

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.

SILVA, P. R. V. **Histórico da Espectroscopia do Infravermelho Próximo (NIR - Near Infrared)**. [26/03/2006] <http://www.angelfire.com/ab/prvs/> . 2006.

SILVA, J.C.; ASSIS, T.F.; OLIVEIRA, J.T. Melhoramento genético para a qualidade da madeira. **Revista da Madeira**, n.75, 10 p, 2003.

SILVA, J. C. Caracterização da Madeira de *Eucalyptus grandis* HILL ex. MAIDEN, de Diferentes Idades, Visando a sua Utilização na indústria Moveleira. Curitiba – PR. UFPR. 160p. 2002. (Tese de Doutorado).

SILVA, J. C. Endocarpos de Babaçu (*Orbigua spp.* Mart.) e de Macaúba (*Acrocomia sclerocarpa* Mart.) Comparados a Madeira de *Eucalyptus grandis* W. HILL Ex MAIDEN para a Produção de Carvão Vegetal. Piracicaba – SP. ESALQ-USP. 112p. 1986.

SWAIN, P. H.; DAVIS, S. M. **Remote sensing: The quantitative approach**. New York: McGraw-Hill. 1978. 396p.

TASSARO, H. **Frutas no Brasil**. São Paulo. Empresa das artes. [15/02/2006] no site <http://www.bibvirt.futuro.usp.br/especiais/frutasnobrasil/> . 1996.

TIENNE, L.; DESCHAMPS, M. C.; ANDRADE, A. M. Produção de Carvão e Subprodutos da Pirólise da Casca e do Bagaço da Laranja (*Citrus sinensis*). **Revista Biomassa e Energia** v. 1, n.2, p. 191-197, 2004.

THUMM, A.; MEDER, R. Stiffness prediction of *radiata pine* clearwood test pieces using near infrared spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy** 9 (2): 117-122. 2001.

TRUGILHO, P. F. et. al. Avaliação de clones de Eucalyptus para a produção de carvão vegetal. **Revista Cerne**, v. 7, n.2, p. 104-114, 2001

TRUGILHO, P. F. et. al. Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. **Revista Cerne**, v. 11, n. 2, p. 178-186, 2005

VALE, A. T. Estudo do Comportamento de Madeiras de Angico Vermelho (*Piptadenia peregrina* Benth) e Jacaré (*Piptadenia comunis* Benth), Quanto a Produção de Carvão Vegetal e de Subprodutos de Carbonização. Viçosa – MG – UFV . 1988. 77p (Tese de Mestrado).

VALE, A T.; COSTA, A F. ; GONÇALEZ, J. C.; NOGUEIRA, M. Relações entre a densidade básica da madeira, o rendimento e a qualidade do carvão vegetal de espécies do Cerrado. **Revista Árvore**, v.25, p. 89-95, 2001.

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

VALE, A. T.; FIEDLER, N. C. ; SILVA, G. F. Avaliação energética da biomassa do Cerrado em função do diâmetro das árvores. **Revista Ciência Florestal**, v. 12 n. 2, p. 115-126. 2002b.

VALVERDE, S. R.; SOARES, N. S.; SILVA, M. L.; JACOVINE, L. A. G.; NEIVA, S. A.

O Comportamento do Mercado da Madeira de Eucalipto no Brasil. **Revista Biomassa e Energia**, v 1, n. 4, p. 393-403, 2004.

VITAL, B. R. **Métodos de Determinação da Densidade da Madeira**. Viçosa, MG. Documento SIF. 21 p. 1984.

VITAL, B. R. et. al. Características de crescimento de árvores e de qualidade da madeira de *Eucalyptus camaldulensis* para a produção de carvão. **IPEF**, n. 47, p. 22-28, 1994.

VITAL, B. R. et. al. Influencia da casca no rendimento e na qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis*. **IPEF**, n. 41/42, p. 44-49, 1989.

8 ANEXOS

8.1 Propriedades do carvão organizadas por temperatura final de carbonização

Tabela 34 – Valores médios do teor de carbono fixo do carvão para as diferentes espécies em função da temperatura final de carbonização

Espécie	C1 (350 °C)	C2 (450 °C)	C3 (550 °C)
<i>Eucalyptus spp.</i>	59,28	69,42	79,65
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	61,19	71,11	80,25
<i>Eucalyptus urophylla</i>	61,61	68,14	78,20
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	64,10	73,67	80,62
<i>Eucalyptus urophylla (clone)</i>	61,88	73,27	80,60
<i>Caryocar brasiliense</i>	57,17	70,64	76,97
<i>Qualea grandiflora</i>	53,58	64,25	74,26
<i>Magonia pubescens</i>	64,18	71,54	74,70
<i>Inga laurina</i>	60,70	70,80	77,64
<i>Bowdichia virgiloides</i>	58,41	68,24	76,25
<i>Piptadenia gonoacantha</i>	62,83	68,80	78,58
<i>Dipteryx alata</i>	56,51	66,89	76,90
Média geral	60,12	69,73	77,89

Tabela 35 – Valores médios do teor de matérias voláteis do carvão para as diferentes espécies em função da temperatura final de carbonização

Espécie	C1 (350 °C)	C2 (450 °C)	C3 (550 °C)
<i>Eucalyptus spp.</i>	39,66	29,69	18,83
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	37,88	28,14	19,09
<i>Eucalyptus urophylla</i>	34,59	28,31	18,70
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	34,32	24,46	17,78
<i>Eucalyptus urophylla (clone)</i>	37,18	25,68	17,71
<i>Caryocar brasiliense</i>	38,91	25,95	19,23
<i>Qualea grandiflora</i>	41,88	29,06	19,99
<i>Magonia pubescens</i>	31,10	24,32	18,52
<i>Inga laurina</i>	36,67	25,98	18,41
<i>Bowdichia virgiloides</i>	35,58	26,77	18,95
<i>Piptadenia gonoacantha</i>	32,95	27,12	18,23
<i>Dipteryx alata</i>	40,36	29,62	20,31
Média geral	36,76	27,09	18,81

Tabela 36 – Valores médios do teor de cinzas (%) do carvão para as diferentes espécies em função da temperatura final de carbonização

Espécie	C1 (350 °C)	C2 (450 °C)	C3 (550 °C)
<i>Eucalyptus spp.</i>	1,07	0,87	1,52
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	0,93	0,75	0,92
<i>Eucalyptus urophylla</i>	3,80	3,55	3,10
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	1,58	1,88	1,60
<i>Eucalyptus urophylla (clone)</i>	0,95	1,05	1,69
<i>Caryocar brasiliense</i>	3,92	3,42	3,80
<i>Qualea grandiflora</i>	4,55	6,69	5,75
<i>Magonia pubescens</i>	4,73	4,15	6,79
<i>Inga laurina</i>	2,64	3,22	3,95
<i>Bowdichia virgiloides</i>	6,01	4,99	4,80
<i>Piptadenia gonoacantha</i>	4,22	4,08	3,19
<i>Dipteryx alata</i>	3,14	3,50	2,79
Média geral	3,13	3,18	3,33

Tabela 37 – Valores médios do poder calorífico do carvão (kcal/kg) para as diferentes espécies em função da temperatura final de carbonização

Espécie	C1 (350 °C)	C2 (450 °C)	C3 (550 °C)
<i>Eucalyptus spp.</i>	6.963,86	7.462,25	7.830,32
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	6.830,26	7.375,15	7.863,89
<i>Eucalyptus urophylla</i>	6.874,05	7.200,42	7.575,83
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	7.063,44	7.481,51	7.683,05
<i>Eucalyptus urophylla (clone)</i>	7.039,11	7.491,58	7.832,07
<i>Caryocar brasiliense</i>	6.567,90	7.060,10	7.496,60
<i>Qualea grandiflora</i>	6.332,14	6.539,08	7.148,22
<i>Magonia pubencens</i>	6.873,94	7.066,82	7.417,17
<i>Inga laurina</i>	6.946,41	7.267,69	7.907,60
<i>Bowdichia virgiloides</i>	6.800,99	7.062,80	7.725,93
<i>Piptadenia gonoacantha</i>	6.863,88	7.095,68	7.728,43
<i>Dipteryx alata</i>	6.749,29	6.980,60	7.567,82
Média	6.825,44	7.173,64	7.648,08

Tabela 38 –Valores médios da massa específica aparente do carvão (kcal/kg) para as diferentes espécies em função da temperatura final de carbonização

Espécie	C1 (350 °C)	C2 (450 °C)	C3 (550 °C)
<i>Eucalyptus spp.</i>	0,44	0,30	0,35
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	0,44	0,44	0,42
<i>Eucalyptus urophylla</i>	0,50	0,50	0,46
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	0,38	0,35	0,36
<i>Eucalyptus urophylla (clone)</i>	0,39	0,40	0,40
<i>Caryocar brasiliense</i>	0,41	0,37	0,38
<i>Qualea grandiflora</i>	0,35	0,37	0,39
<i>Magonia pubencens</i>	0,39	0,40	0,41
<i>Inga laurina</i>	0,41	0,42	0,40
<i>Bowdichia virgiloides</i>	0,45	0,40	0,42
<i>Piptadenia gonoacantha</i>	0,33	0,33	0,35
<i>Dipteryx alata</i>	0,58	0,58	0,59
Média geral	0,42	0,41	0,41

Tabela 39 – Valores médios do rendimento gravimétrico do carvão, base seca (%) para as diferentes espécies em função da temperatura final de carbonização

Espécie	C1 (350 °C)	C2 (450 °C)	C3 (550 °C)
<i>Eucalyptus spp.</i>	45,17	35,42	32,37
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	38,85	35,09	32,62
<i>Eucalyptus urophylla</i>	43,66	36,01	33,79
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	44,07	32,80	29,11
<i>Eucalyptus urophylla (clone)</i>	38,42	29,82	25,29
<i>Caryocar brasiliense</i>	47,11	37,99	31,39
<i>Qualea grandiflora</i>	49,95	38,64	35,60
<i>Magonia pubescens</i>	39,74	34,52	32,70
<i>Inga laurina</i>	40,51	34,09	29,68
<i>Bowdichia virgiloides</i>	40,33	34,67	30,82
<i>Piptadenia gonoacantha</i>	38,32	34,70	31,63
<i>Dipteryx alata</i>	44,35	36,20	32,63
Média geral	42,54	35,00	31,47

Tabela 40 –Valores médios da umidade do carvão (%) para as diferentes espécies em função da temperatura final de carbonização

Espécie	C1 (350 °C)	C2 (450 °C)	C3 (550 °C)
<i>Eucalyptus spp.</i>	5,98	6,30	6,84
<i>Eucalyptus cloeziana</i>	6,60	6,08	6,83
<i>Eucalyptus urophylla</i>	6,18	5,83	6,69
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	5,57	5,46	6,56
<i>Eucalyptus urophylla (clone)</i>	5,40	5,47	6,63
<i>Caryocar brasiliense</i>	5,96	6,12	6,44
<i>Qualea grandiflora</i>	6,26	6,34	6,93
<i>Magonia pubescens</i>	6,03	5,37	7,40
<i>Inga laurina</i>	5,38	5,35	7,23
<i>Bowdichia virgiloides</i>	5,28	5,13	6,26
<i>Piptadenia gonoacantha</i>	5,37	5,60	6,14
<i>Dipteryx alata</i>	4,64	5,64	6,32
Média geral	5,72	5,72	6,68

8.2 Propriedades do carvão organizadas por espécies

Tabela 41 – Média e desvio padrão das propriedades do carvão de *Eucalyptus grandis* para os diferentes tratamentos térmicos aplicados.

<i>Eucalyptus spp</i>		Propriedades	Carbonização		
			C1 (350 °C)	C2 (450 °C)	C3 (550 °C)
Matérias Voláteis (%)	Média		39,66	29,69	18,83
	Desvio Padrão		5,18	2,14	4,49
Cinzas (%)	Média		1,07	0,87	1,52
	Desvio Padrão		0,34	0,44	1,08
Carbono Fixo (%)	Média		59,28	69,42	79,65
	Desvio Padrão		5,30	2,56	4,11
Poder Calorífico (kcal/kg)	Média		6963,86	7462,25	7830,32
	Desvio Padrão		379,47	241,16	100,71
Rendimento Base Seca (%)	Média		45,17	35,42	32,37
	Desvio Padrão		5,26	1,55	1,15
Densidade Aparente (g/dm³)	Média		0,44	0,30	0,35
	Desvio Padrão		0,08	0,04	0,02

Tabela 42 – Média e desvio padrão das propriedades do carvão de *Eucalyptus cloeziana* para os diferentes tratamentos térmicos aplicados.

<i>Eucalyptus cloeziana</i>		Propriedades	Carbonização		
			C1 (350 °C)	C2 (450 °C)	C3 (550 °C)
Matérias Voláteis (%)	Média		37,88	28,14	19,09
	Desvio Padrão		3,03	0,79	5,04
Cinzas (%)	Média		0,93	0,75	0,92
	Desvio Padrão		0,29	0,42	0,52
Carbono Fixo (%)	Média		61,19	71,11	80,25
	Desvio Padrão		2,97	0,72	4,61
Poder Calorífico (kcal/kg)	Média		6830,26	7375,15	7863,89
	Desvio Padrão		212,72	145,53	59,62
Rendimento Base Seca (%)	Média		38,85	35,09	32,62
	Desvio Padrão		2,12	1,69	3,25
Densidade Aparente (g/dm³)	Média		0,44	0,44	0,42
	Desvio Padrão		0,02	0,03	0,02

Tabela 43 – Média e desvio padrão das propriedades do carvão de *Eucalyptus urophylla* para os diferentes tratamentos térmicos aplicados.

<i>Eucalyptus urophylla</i>		Carbonização		
Propriedades		C1 (350 °C)	C2 (450 °C)	C3 (550 °C)
Matérias Voláteis (%)	Média	34,59	28,31	18,70
	Desvio Padrão	4,28	3,53	3,51
Cinzas (%)	Média	3,80	3,55	3,10
	Desvio Padrão	0,90	0,84	2,35
Carbono Fixo (%)	Média	61,61	68,14	78,20
	Desvio Padrão	5,07	3,45	2,68
Poder Calorífico (kcal/kg)	Média	6874,05	7200,42	7575,83
	Desvio Padrão	480,86	412,20	197,60
Rendimento Base Seca (%)	Média	43,66	36,01	33,79
	Desvio Padrão	11,43	3,10	4,79
Densidade Aparente (g/dm³)	Média	0,50	0,50	0,46
	Desvio Padrão	0,03	0,02	0,05

Tabela 44 – Média e desvio padrão das propriedades do carvão de *Eucalyptus camaldulensis* para os diferentes tratamentos térmicos aplicados.

<i>Eucalyptus camaldulensis</i>		Carbonização		
Propriedades		C1 (350 °C)	C2 (450 °C)	C3 (550 °C)
Matérias Voláteis (%)	Média	34,32	24,46	17,78
	Desvio Padrão	1,88	1,88	4,08
Cinzas (%)	Média	1,58	1,88	1,60
	Desvio Padrão	0,63	0,20	1,15
Carbono Fixo (%)	Média	64,10	73,67	80,62
	Desvio Padrão	2,14	1,93	3,26
Poder Calorífico (kcal/kg)	Média	7063,44	7481,51	7683,05
	Desvio Padrão	229,37	338,38	194,31
Rendimento Base Seca (%)	Média	44,07	32,80	29,11
	Desvio Padrão	10,35	0,68	1,05
Densidade Aparente (g/dm³)	Média	0,38	0,35	0,36
	Desvio Padrão	0,02	0,02	0,02

Tabela 45 – Média e desvio padrão das propriedades do carvão de *Eucalyptus urophylla* clonado para os diferentes tratamentos térmicos aplicados.

<i>Eucalyptus urophylla</i> (clone)		Carbonização		
Propriedades		C1 (350 °C)	C2 (450 °C)	C3 (550 °C)
Matérias Voláteis (%)	Média	37,18	25,68	17,71
	Desvio Padrão	5,93	1,40	4,26
Cinzas (%)	Média	0,95	1,05	1,69
	Desvio Padrão	0,60	0,71	1,81
Carbono Fixo (%)	Média	61,88	73,27	80,60
	Desvio Padrão	5,73	1,49	4,61
Poder Calorífico (kcal/kg)	Média	7039,11	7491,58	7832,07
	Desvio Padrão	277,91	244,39	387,48
Rendimento Base Seca (%)	Média	38,42	29,82	25,29
	Desvio Padrão	6,04	0,41	1,33
Densidade Aparente (g/dm³)	Média	0,39	0,40	0,40
	Desvio Padrão	0,02	0,02	0,03

Tabela 46 – Média e desvio padrão das propriedades do carvão de *Caryocar brasiliense* para os diferentes tratamentos térmicos aplicados.

<i>Caryocar brasiliense</i>		Carbonização		
Propriedades		C1 (350 °C)	C2 (450 °C)	C3 (550 °C)
Matérias Voláteis (%)	Média	38,91	25,95	19,23
	Desvio Padrão	4,39	1,80	4,49
Cinzas (%)	Média	3,92	3,42	3,80
	Desvio Padrão	1,08	0,09	1,82
Carbono Fixo (%)	Média	57,17	70,64	76,97
	Desvio Padrão	4,98	1,82	3,02
Poder Calorífico (kcal/kg)	Média	6567,90	7060,10	7496,60
	Desvio Padrão	189,56	408,78	287,72
Rendimento Base Seca (%)	Média	47,11	37,99	31,39
	Desvio Padrão	5,46	0,27	5,36
Densidade Aparente (g/dm³)	Média	0,41	0,37	0,38
	Desvio Padrão	0,04	0,02	0,05

Tabela 47 – Média e desvio padrão das propriedades do carvão de *Qualea grandiflora* para os diferentes tratamentos térmicos aplicados.

<i>Qualea grandiflora</i>		Carbonização		
Propriedades		C1 (350 °C)	C2 (450 °C)	C3 (550 °C)
Matérias Voláteis (%)	Média	41,88	29,06	19,99
	Desvio Padrão	2,57	4,87	3,18
Cinzas (%)	Média	4,55	6,69	5,75
	Desvio Padrão	0,51	0,69	1,90
Carbono Fixo (%)	Média	53,58	64,25	74,26
	Desvio Padrão	3,05	4,63	3,47
Poder Calorífico (kcal/kg)	Média	6332,14	6539,08	7148,22
	Desvio Padrão	86,27	425,58	348,24
Rendimento Base Seca (%)	Média	49,95	38,64	35,60
	Desvio Padrão	3,86	3,97	0,96
Densidade Aparente (g/dm³)	Média	0,35	0,37	0,39
	Desvio Padrão	0,01	0,05	0,08

Tabela 48 – Média e desvio padrão das propriedades do carvão de *Magonia pubescens* para os diferentes tratamentos térmicos aplicados.

<i>Magonia pubescens</i>		Carbonização		
Propriedades		C1 (350 °C)	C2 (450 °C)	C3 (550 °C)
Matérias Voláteis (%)	Média	31,10	24,32	18,52
	Desvio Padrão	1,47	4,13	2,27
Cinzas (%)	Média	4,73	4,15	6,79
	Desvio Padrão	1,51	0,87	1,40
Carbono Fixo (%)	Média	64,18	71,54	74,70
	Desvio Padrão	2,06	3,53	1,25
Poder Calorífico (kcal/kg)	Média	6873,94	7066,82	7417,17
	Desvio Padrão	53,52	144,60	162,89
Rendimento Base Seca (%)	Média	39,74	34,52	32,70
	Desvio Padrão	0,71	1,97	2,74
Densidade Aparente (g/dm³)	Média	0,39	0,40	0,41
	Desvio Padrão	0,03	0,01	0,05

Tabela 49 – Média e desvio padrão das propriedades do carvão de *Inga laurina* para os diferentes tratamentos térmicos aplicados.

<i>Inga laurina</i>		Carbonização		
Propriedades		C1 (350 °C)	C2 (450 °C)	C3 (550 °C)
Matérias Voláteis (%)	Média	36,67	25,98	18,41
	Desvio Padrão	1,59	2,28	3,40
Cinzas (%)	Média	2,64	3,22	3,95
	Desvio Padrão	0,09	0,97	1,33
Carbono Fixo (%)	Média	60,70	70,80	77,64
	Desvio Padrão	1,66	2,43	4,09
Poder Calorífico (kcal/kg)	Média	6946,41	7267,69	7907,60
	Desvio Padrão	216,36	132,63	276,11
Rendimento Base Seca (%)	Média	40,51	34,09	29,68
	Desvio Padrão	2,07	1,06	3,67
Densidade Aparente (g/dm³)	Média	0,41	0,42	0,40
	Desvio Padrão	0,02	0,03	0,03

Tabela 50 – Média e desvio padrão das propriedades do carvão de *Bowdichia virgiloides* para os diferentes tratamentos térmicos aplicados.

<i>Bowdichia virgiloides</i>		Carbonização		
Propriedades		C1 (350 °C)	C2 (450 °C)	C3 (550 °C)
Matérias Voláteis (%)	Média	35,58	26,77	18,95
	Desvio Padrão	1,70	3,82	2,30
Cinzas (%)	Média	6,01	4,99	4,80
	Desvio Padrão	1,23	1,02	2,65
Carbono Fixo (%)	Média	58,41	68,24	76,25
	Desvio Padrão	2,67	4,72	3,63
Poder Calorífico (kcal/kg)	Média	6800,99	7062,80	7725,93
	Desvio Padrão	183,45	364,19	291,28
Rendimento Base Seca (%)	Média	40,33	34,67	30,82
	Desvio Padrão	2,80	1,85	3,67
Densidade Aparente (g/dm³)	Média	0,45	0,40	0,42
	Desvio Padrão	0,07	0,04	0,03

Tabela 51 – Média e desvio padrão das propriedades do carvão de *Piptadenia gonoacantha* para os diferentes tratamentos térmicos aplicados.

<i>Piptadenia gonoacantha</i>		Carbonização		
Propriedades		C1 (350 °C)	C2 (450 °C)	C3 (550 °C)
Matérias Voláteis (%)	Média	32,95	27,12	18,23
	Desvio Padrão	1,62	4,27	1,26
Cinzas (%)	Média	4,22	4,08	3,19
	Desvio Padrão	1,04	1,18	1,41
Carbono Fixo (%)	Média	62,83	68,80	78,58
	Desvio Padrão	1,17	5,45	1,55
Poder Calorífico (kcal/kg)	Média	6863,88	7095,68	7728,43
	Desvio Padrão	104,86	177,50	138,21
Rendimento Base Seca (%)	Média	38,32	34,70	31,63
	Desvio Padrão	2,46	0,71	1,33
Densidade Aparente (g/dm³)	Média	0,33	0,33	0,35
	Desvio Padrão	0,02	0,05	0,02

Tabela 52 – Média e desvio padrão das propriedades do carvão de *Dipteryx alata* para os diferentes tratamentos térmicos aplicados.

<i>Dipteryx alata</i>		Carbonização		
Propriedades		C1 (350 °C)	C2 (450 °C)	C3 (550 °C)
Matérias Voláteis (%)	Média	40,36	29,62	20,31
	Desvio Padrão	3,21	4,18	3,57
Cinzas (%)	Média	3,14	3,50	2,79
	Desvio Padrão	1,01	1,40	0,62
Carbono Fixo (%)	Média	56,51	66,89	76,90
	Desvio Padrão	2,38	3,05	3,29
Poder Calorífico (kcal/kg)	Média	6749,29	6980,60	7567,82
	Desvio Padrão	59,00	177,46	136,84
Rendimento Base Seca (%)	Média	44,35	36,20	32,63
	Desvio Padrão	5,07	1,39	1,76
Densidade Aparente (g/dm³)	Média	0,58	0,58	0,59
	Desvio Padrão	0,01	0,03	0,01

8.3 Análises de variância

Tabela 53 - ANOVA para umidade do carvão

Fontes de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrado	Quadrado médio	F	Significância
Total	143	189,46			
Total de redução	35	56,26	1,61	1,3	0,1521
Espécie	11	15,97	1,45	1,18	0,3111
Carbonização	2	29,83	14,91	12,09	0,0000
Espécie x carbonização	22	10,45	0,47	0,39	*****
Resíduo	108	133,19	1,23		

Coefficiente de variação = 18,38

Tabela 54 - ANOVA para matérias voláteis

Fontes de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrado	Quadrado médio	F	Significância
Total	143	9636,51			
Total de redução	35	8372,23	239,21	20,43	0,0000
Espécie	11	409,64	37,24	3,18	0,0009
Carbonização	2	7740,95	3870,48	330,63	0,0000
Espécie x carbonização	22	221,63	10,07	0,86	*****
Resíduo	108	1264,28	11,71		

Coefficiente de variação = 12,42

Tabela 55 - ANOVA para cinzas

Fontes de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrado	Quadrado médio	F	Significância
Total	143	557,73			
Total de redução	35	410,80	11,73	8,63	0,0000
Espécie	11	371,70	33,79	24,84	0,0000
Carbonização	2	0,99	0,50	0,37	*****
Espécie x carbonização	22	38,09	1,73	1,27	0,2066
Resíduo	108	146,93	1,36		

Coefficiente de variação = 36,34

Tabela 56 - ANOVA para carbono fixo

Fontes de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrado	Quadrado médio	F	Significância
Total	143	9857,76			
Total de redução	35	8574,69	244,99	20,62	0,0000
Espécie	11	731,49	66,49	5,60	0,0000
Carbonização	2	7592,53	3796,26	319,54	0,0000
Espécie x carbonização	22	250,68	11,39	0,96	*****
Resíduo	108	1283,07	11,88		

Coefficiente de variação = 4,97

Tabela 57 - ANOVA para poder calorífico

Fontes de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrado	Quadrado médio	F	Significância
Total	143	0,3068 x 10 ⁸			
Total de redução	35	0,2358 x 10 ⁸	673723,40	10,24	0,0000
Espécie	11	6343085,00	576644,10	8,77	0,0000
Carbonização	2	0,1637 x 10 ⁸	8184533,00	124,46	0,0000
Espécie x carbonização	22	868168,20 x 10 ⁸	39462,19	0,60	*****
Resíduo	108	7102396,00	65762,93		

Número de dados = 144

Tabela 58 - ANOVA para rendimento base seca

Fontes de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrado	Quadrado médio	F	Significância
Total	143	5853,72			
Total de redução	35	4220,23	120,58	7,97	0,0000
Espécie	11	866,48	78,77	5,21	0,0000
Carbonização	2	3070,41	1535,21	101,50	0,0000
Espécie x carbonização	22	283,33	12,87	0,85	*****
Resíduo	108	1633,49	15,12		

Coeficiente de variação = 10,70

Tabela 59 - ANOVA para densidade aparente do carvão

Fontes de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrado	Quadrado médio	F	Significância
Total	143	0,7988			
Total de redução	35	0,6496	$0,185 \times 10^{-1}$	13,44	0,0000
Espécie	11	0,5921	$0,538 \times 10^{-1}$	38,97	0,0000
Carbonização	2	$0,485 \times 10^{-2}$	$0,243 \times 10^{-2}$	1,76	0,17772
Espécie x carbonização	22	$0,526 \times 10^{-1}$	$0,239 \times 10^{-2}$	1,73	0,0340
Resíduo	108	0,1491	$0,138 \times 10^{-2}$		

Coefficiente de variação = 9,00

Tabela 60 - ANOVA para umidade do carvão

Fontes de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrado	Quadrado médio	F	Significância
Total	143	189,45			
Total de redução	35	56,28	1,61	1,3	0,1521
Espécie	11	15,97	1,45	1,18	0,3111
Carbonização	2	29,83	14,91	12,09	0,000
Espécie x carbonização	22	10,45	0,47	0,39	*****
Resíduo	108	133,19	1,23		

Coefficiente de variação = 18,38

Tabela 61 – Valores médios para o teor de cizas por temperatura final de carbonização

Carbonização	Média
<i>Marcha 1 (350 °C)</i>	3,13
<i>Marcha 2 (450 °C)</i>	3,18
<i>Marcha 3 (550 °C)</i>	3,33

Tabela 62 – valores médios de umidade do carvão por espécie

Espécie	Média
<i>Qualea grandiflora</i>	6,37
<i>Caryocar brasiliense</i>	6,50
<i>E. urophylla</i>	6,23
<i>Dipteryx alata</i>	5,86
<i>E. spp (Lyptus)</i>	5,83
<i>Magonia pubescens</i>	6,17
<i>E. cloeziana</i>	6,51
<i>E. camaldulensis</i>	6,26
<i>Bowdichia virgiloides</i>	5,98
<i>Piptadenia gonoacantha</i>	5,55
<i>Inga laurina</i>	5,70
<i>E. urophylla (clone)</i>	5,53

Tabela 63 – Valores médios da massa específica aparente do carvão por marcha de carbonização

Carbonização	Média
<i>Marcha 2 (450 °C)</i>	0,40
<i>Marcha 3 (550 °C)</i>	0,41
<i>Marcha 1 (350 °C)</i>	0,42

Tabela 64 – Modelos testados na calibração/validação dos modelos

Modelos
$y = a+bx$
$y = a+bx+cx^2$
$y=a*\exp(b*x)$
$y = a*\exp(b/x)$
$y = a+b*\ln(x)$
$y = 1/(a+b*\ln(x))$
$y = \exp(a+b/x+c*\ln(x))$
$y= a*x^b$
$y = a*b^x$
$y = a*(x-b)^c$
$y = a*x^(b*x)$
$y = a*x^(b/x)$
$y = a^(1/x)$
$y = a*(b^x)*(x^c)$
$y = a*b^(1/x)*(x^c)$
$y = 1 / (a + bx)$
$y = 1 / (a + bx + cx^2)$
$y = (a + bx) ^ (-1/c)$
$y = 1 / (a + bx^c)$
$y = a*(1-\exp(-bx))$
$y = a*(b-\exp(-cx))$
$y = ax / (b + x)$
$y = a * \exp (-\exp(b - cx))$
$y = a / (1 + \exp (b - cx))$
$y = a / (1 + \exp(b - cx))^(1/d)$
$y = (ab + cx^d)/(b + x^d)$
$y = a + b*\cos(c*x + d)$
$y = a*\exp((-x - b)^2)/(2*c^2)$
$y = a + b/x$
$y = a + bx + c/x^2$
$y = (a + bx) / (1 + cx + dx^2)$

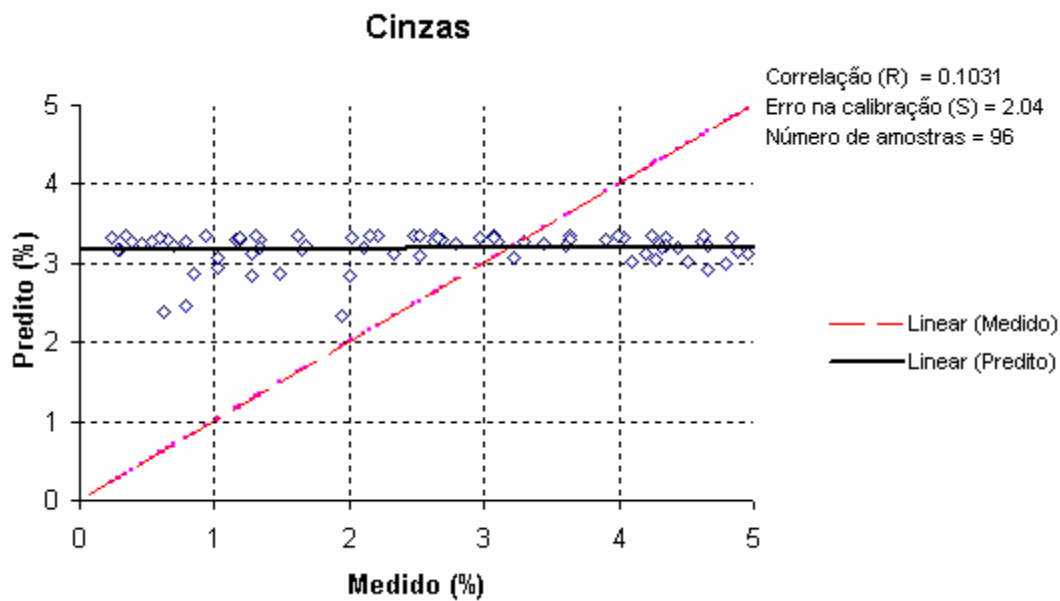


Figura 31 – Calibração para o teor de cinzas do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 2000 nm)
 Modelo $y = a+bx +c/x^2$. Constantes: **a** = 6,34; **b** = -0,0426 e **c** = -2176,31

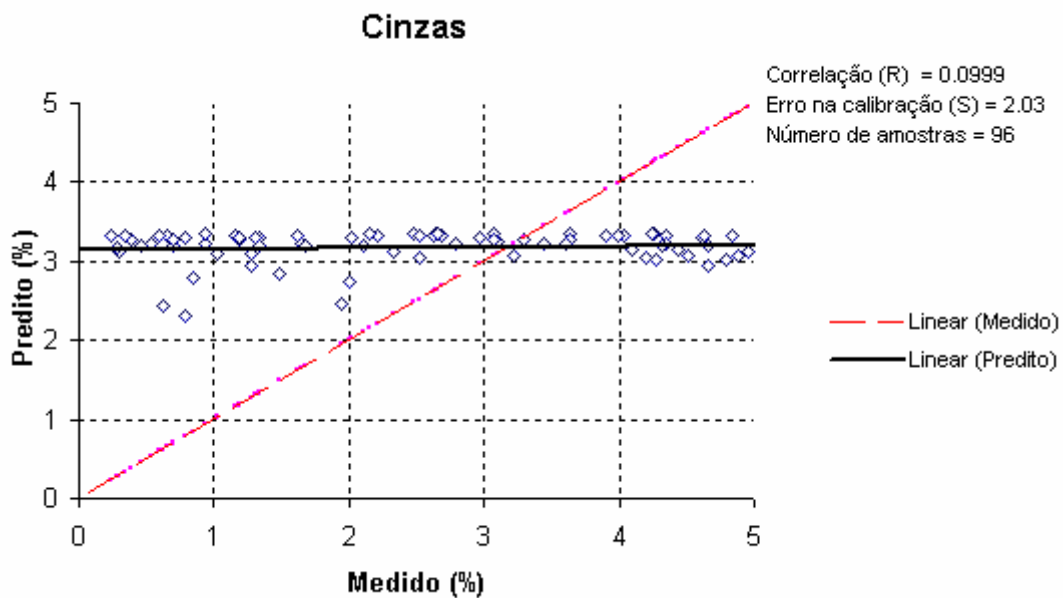


Figura 32 – Calibração para o teor de cinzas do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 1600 nm)
 Modelo $y = a+bx +c/x^2$. Constantes: **a** = 7,42; **b** = -0,0601 e **c** = -2778,72

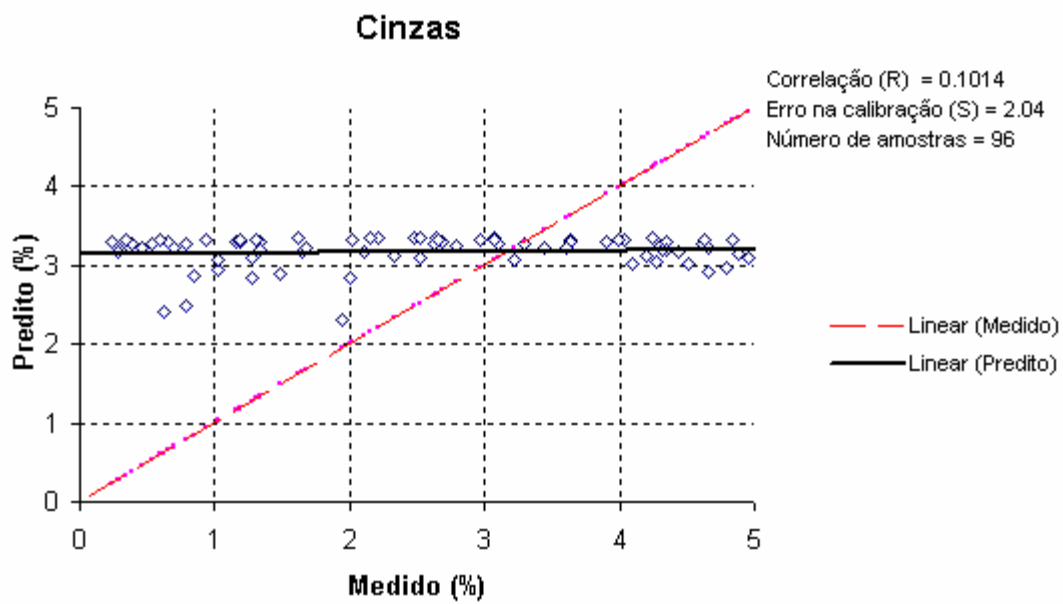


Figura 33 – Calibração para o teor de cinzas do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1700 e 1800 nm)
 Modelo: $y = a+bx +c/x^2$. Constantes: **a** = 6,10; **b** = -0,0396 e **c** = -1978,07

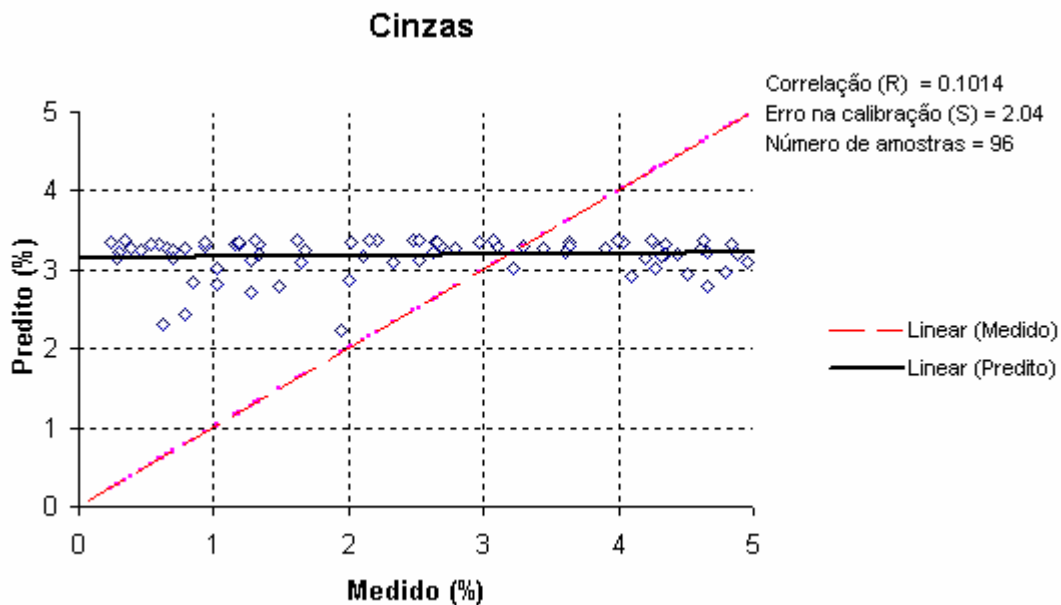


Figura 34 – Calibração para o teor de cinzas do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1900 e 2000 nm)
 Modelo: $y = a+bx +c/x^2$. Constantes: **a** = 6,30; **b** = -0,0393 e **c** = -2393,41

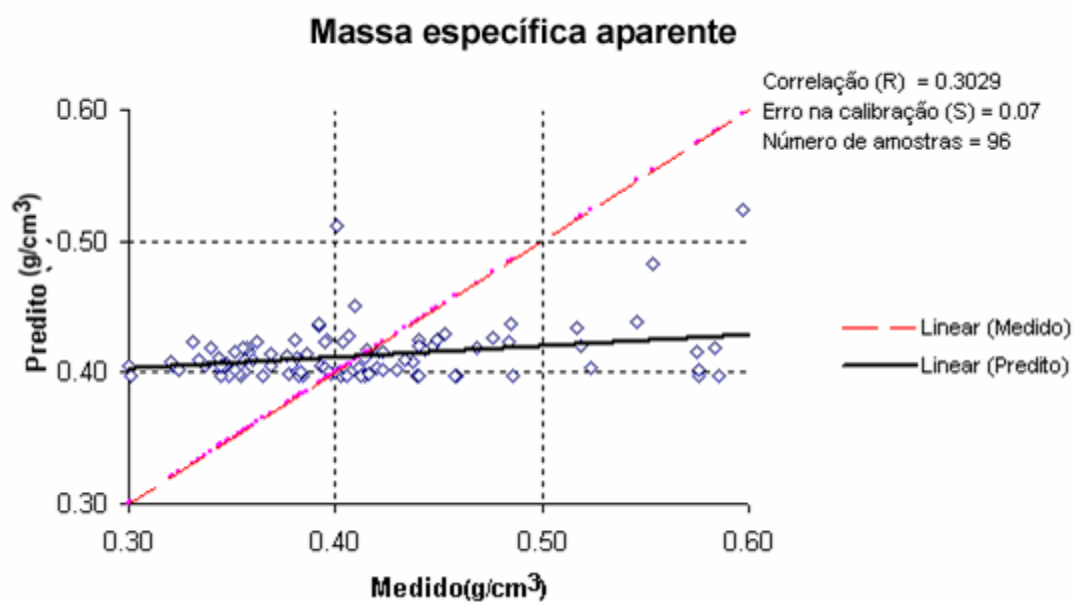


Figura 35 – Calibração para massa específica aparente do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 2000 nm)
 Modelo: $y = a+bx +cx^2$. Constantes: **a** = 0,6674; **b** = -0,0104 e **c** = 0,0001

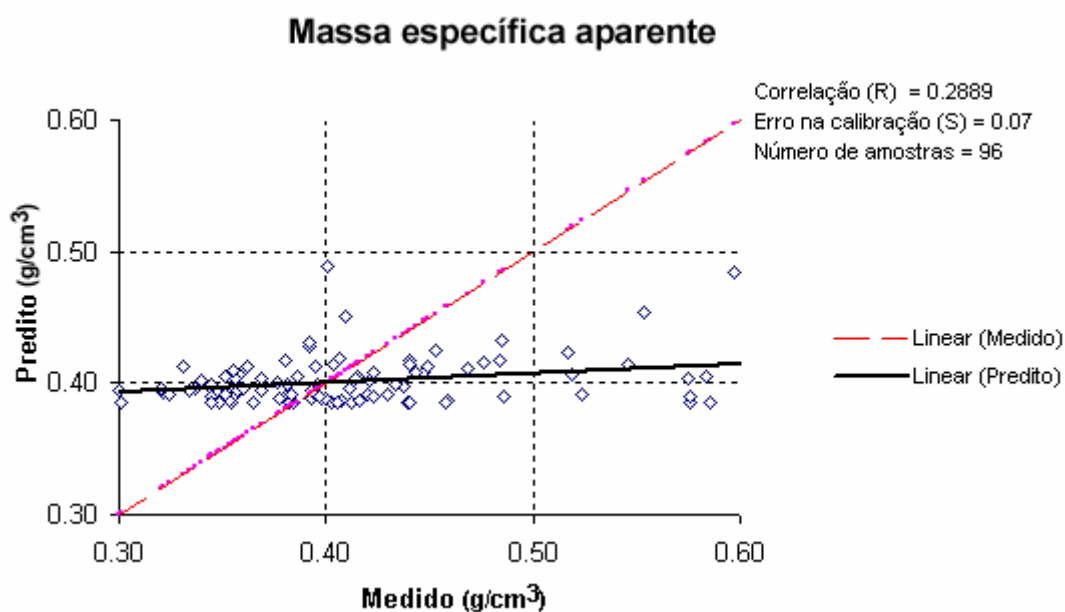


Figura 36 – Calibração para massa específica aparente do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1500 e 1600 nm)
 Modelo: $y = a+bx +cx^2$. Constantes: **a** = 0,7701; **b** = -0,0157 e **c** = 0,00016

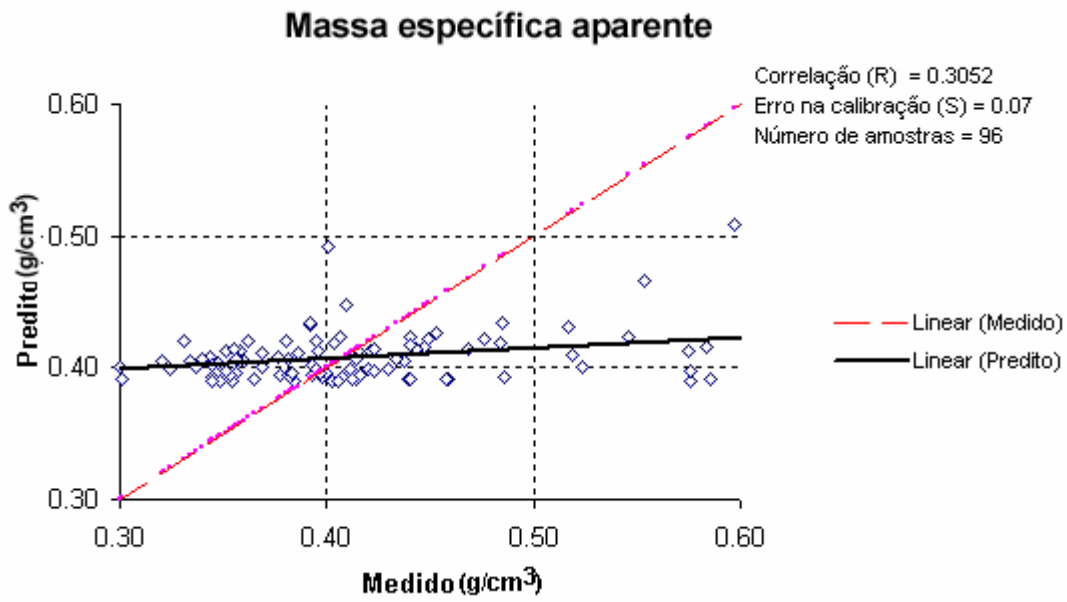


Figura 37 – Calibração para massa específica aparente do carvão paratodas as espécies (média da faixa compreendida entre 1700 e 1800 nm)
 Modelo: $y = a+bx +cx^2$. Constantes: **a** = 0,6464; **b** = -0,0096 e **c** = 0,00009

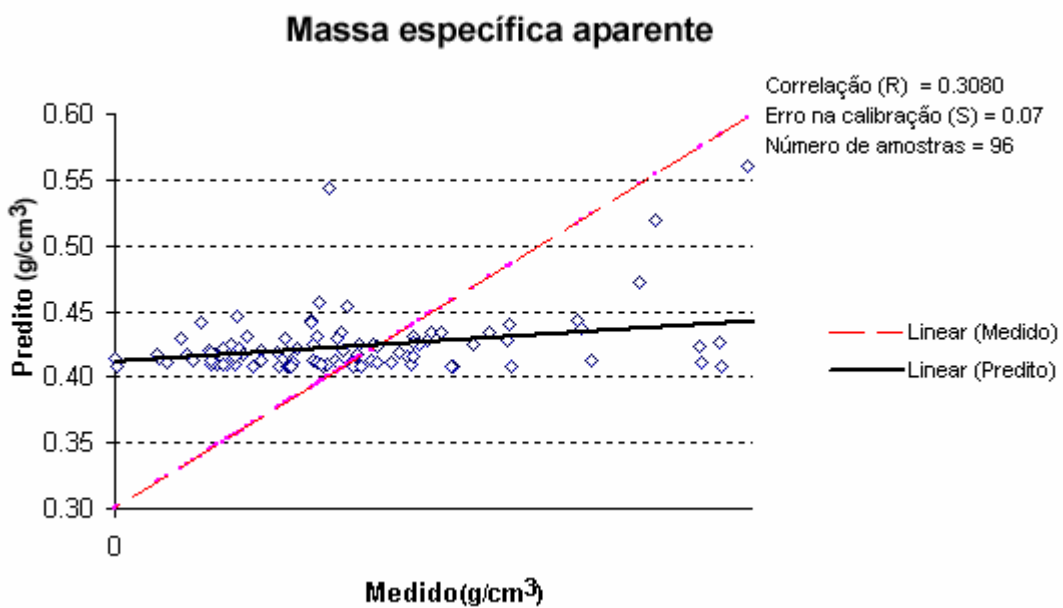


Figura 38 – Calibração para massa específica aparente do carvão para todas as espécies (média da faixa compreendida entre 1900 e 2000 nm)
 Modelo: $y = a+bx +cx^2$. Constantes **a** = 0,6393; **b** = -0,0086 e **c** = 0,00006

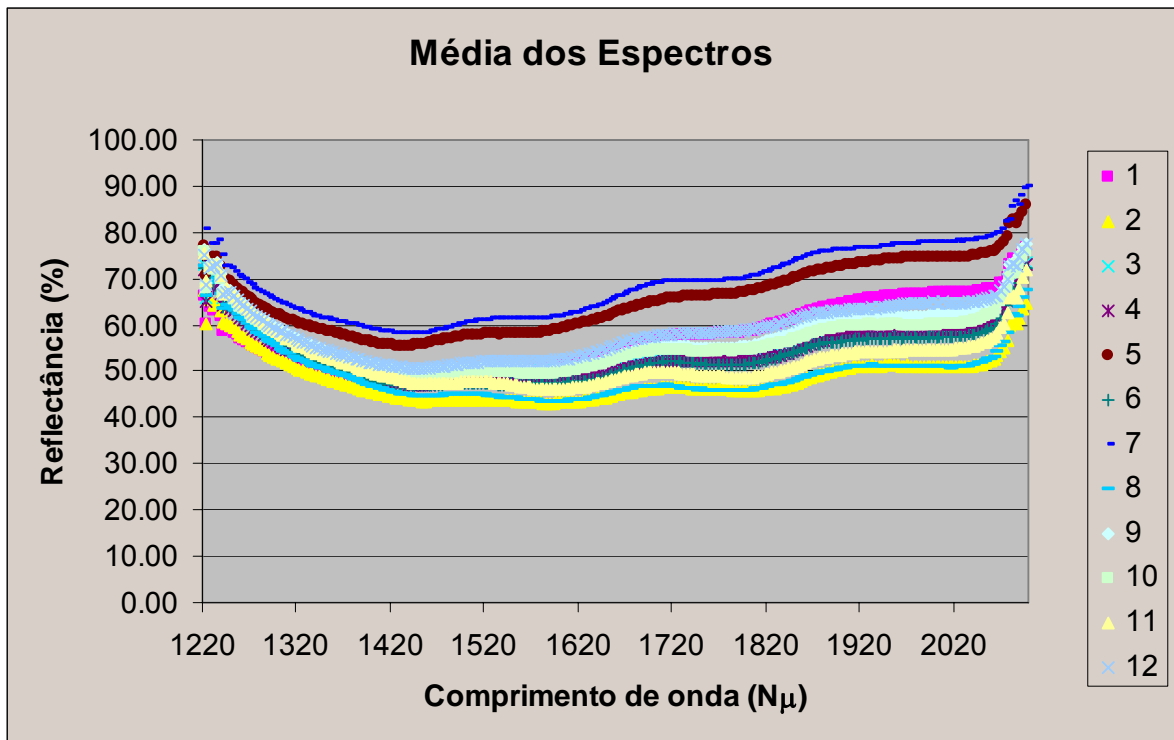


Figura 39 – Médias das Curvas espectrais por espécie obtidas para marcha de carbonização “1”, temperatura final de 350 °C

Em que {1} = *E. grandis*; {2} = *E. cloeziana*; {3} = *E. urophylla*; {4} = *E. camaldulensis*; {5} = *E. urophylla* (clone); {6} *Caryocar brasiliense*; {7} = *Qualea grandiflora*; {8} = *Magonia pubescens*; {9} = *Inga laurina*; {10} = *Bowdichia virgiloides*; {11} = *Piptadenia gonoacantha*; {12} = *Dipterix alata*.

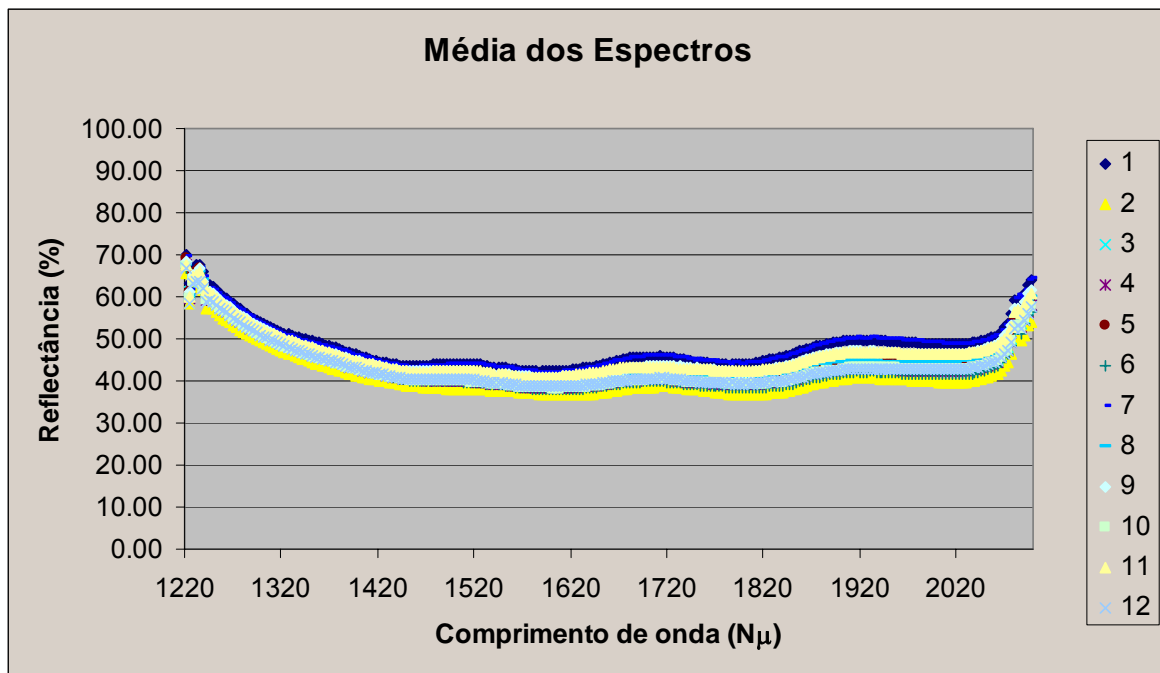


Figura 40 – Médias das Curvas espectrais obtidas por espécie para marcha de carbonização “2”, temperatura final de 450 °C

Em que {1} = *E. grandis*; {2} = *E. cloeziana*; {3} = *E. urophylla*; {4} = *E. camaldulensis*; {5} = *E. urophylla* (clone); {6} *Caryocar brasiliense*; {7} = *Qualea grandiflora*; {8} = *Magonia pubescens*; {9} = *Inga laurina*; {10} = *Bowdichia virgiloides*; {11} = *Piptadenia gonoacantha*; {12} = *Dipterix alata*.

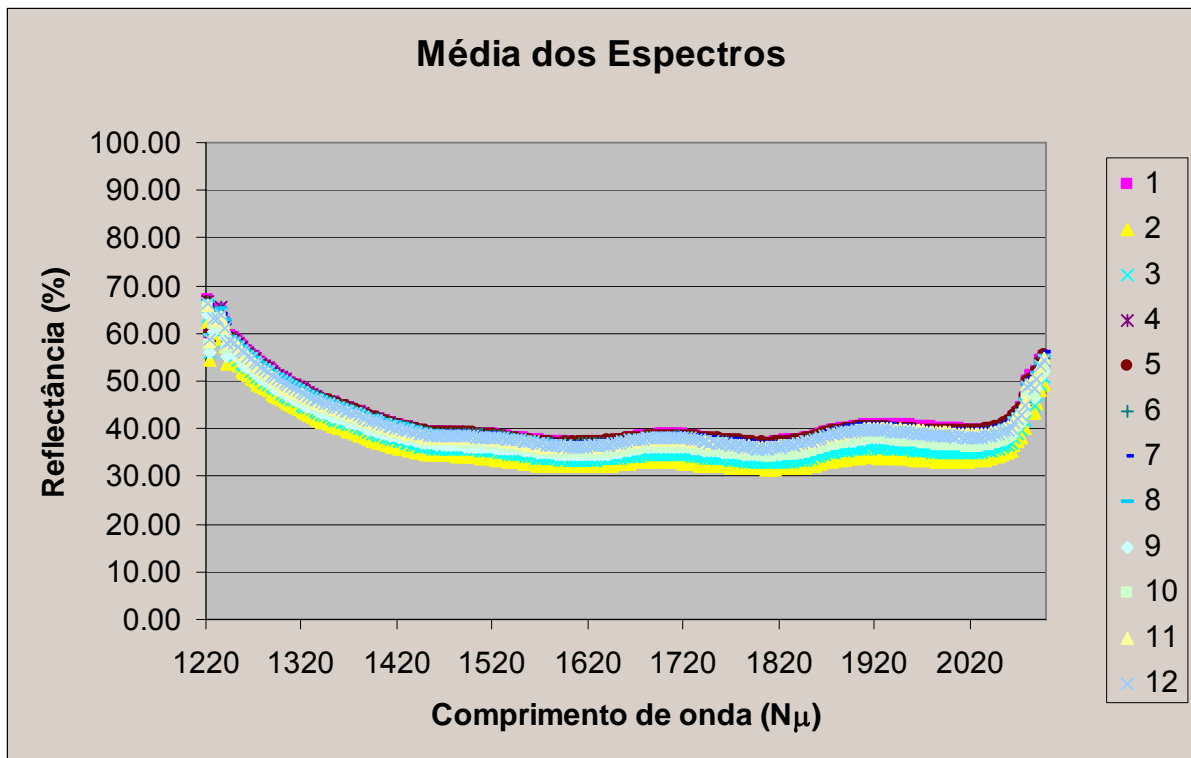


Figura 41 – Médias das curvas espectrais por espécie obtidas para marcha de carbonização “3”, temperatura final de 550 °C.

Em que {1} = *E. grandis*; {2} = *E. cloeziana*; {3} = *E. urophylla*; {4} = *E. camaldulensis*; {5} = *E. urophylla* (clone); {6} *Caryocar brasiliense*; {7} = *Qualea grandiflora*; {8} = *Magonia pubescens*; {9} = *Inga laurina*; {10} = *Bowdichia virgiloides*; {11} = *Piptadenia gonoacantha*; {12} = *Dipterix alata*.