

SIDNEI DIAS MONTEIRO JUNIOR



RENDIMENTOS E CARACTERÍSTICAS DA BIOMASSA TORRADA E CARBONIZADA
DO CLONE DE *Eucalyptus urograndis*

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para conclusão do curso superior de Tecnologia em Biocombustíveis da Universidade Federal do Paraná – Setor Palotina.

Orientadora: Prof^a. Dra^a. Adriana Ferla de Oliveira

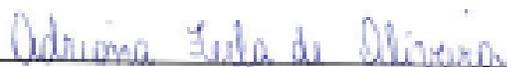
PALOTINA
2014

TERMO DE APROVAÇÃO

SIDNEI DIAS MONTEIRO JUNIOR

RENDIMENTOS E CARACTERÍSTICAS DA BIOMASSA TORRADA E
CARBONIZADA DO CLONE DE *Eucalyptus urograndis*

Trabalho apresentado como requisito parcial a obtenção do grau de Tecnólogo em Biocombustíveis no curso de graduação de Tecnologia em Biocombustíveis, pela seguinte banca examinadora:



Prof.^a. Dr.^a. Adriana Ferra de Oliveira
Orientadora – Setor Palotina da Universidade Federal do Paraná



Prof.^a. Dr.^a. Eliane Hermes
Setor Palotina da Universidade Federal do Paraná



Prof. Dr. Rodrigo Sequinel
Setor Palotina da Universidade Federal do Paraná

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai por me apoiar sempre e pelos esforços durante todo meu período na faculdade.

À minha orientadora Adriana Ferla de Oliveira pela paciência, dedicação e pelos incentivos.

A todas as pessoas das quais tive contato durante minha graduação, mesmo que hoje os caminhos tenham nos levados a lugares opostos.

Aos professores da Universidade Federal do Paraná - Setor Palotina pelo aprendizado e pela dedicação com o curso de Tecnologia em Biocombustíveis.

Aos professores Rodrigo Sequinel e Eliane Hermes por terem aceitado o convite para a banca examinadora do trabalho.

À empresa C. Vale por fornecer as amostras utilizadas no presente trabalho.

À minha amiga Débora pela ajuda no tratamento dos dados do trabalho.

Aos técnicos laboratoriais que algumas vezes ficavam por tempo a mais de seu expediente se necessário.

Ao meu amigo Rodrigo pela ajuda na realização das análises.

A todos que, direta ou indiretamente, auxiliaram na elaboração deste trabalho e que, involuntariamente, tenham tido seus nomes aqui omitidos.

Um soberano não deve empreender uma guerra num ataque de ira, nem deve enviar suas tropas num momento de indignação. Quando a situação lhe for favorável, entre em ação; quando for desfavorável, não aja. Deve ser entendido que, um homem que está enfurecido voltará a ser feliz, e aquele que está indignado voltará a ser honrado, mas um estado que pereceu nunca poderá ser reavivado, nem um homem que morreu poderá ser ressuscitado.

Sun Tzu

RESUMO

O desenvolvimento da economia e a preocupação com o meio ambiente têm voltado atenção para o uso da biomassa como fonte de energia. Com a evolução da silvicultura no Brasil, o Eucalipto tornou-se a espécie mais usada em florestas plantadas no Brasil. O objetivo deste trabalho foi caracterizar a biomassa in natura, torrada e carbonizada de um híbrido de *Eucalyptus urograndis* com 5 anos de idade. O *E. urograndis* estudado neste trabalho com 5 anos de idade foi coletado na área de reflorestamento da empresa C.VALE na cidade de Palotina-Paraná. Realizou-se a torrefação e a carbonização da biomassa, determinando o rendimento gravimétrico destes processos, o teor de lignina, a densidade básica e a análise química imediata (teor de umidade, teor de materiais voláteis, teor de cinzas, teor de carbono fixo) do material in natura, torrado e carbonizado. Os resultados obtidos foram satisfatórios e são condizentes com os encontrados na literatura. Obteve-se rendimentos médios de 31,59% e 50,30% para carbonização e torrefação respectivamente.

Palavras-chave: Carbonização, Torrefação, Análise imediata.

ABSTRACT

The development of the economy and concern for the environment have turned attention to the use of biomass as an energy source. With the development of forestry in Brazil, Eucalyptus has become the most species used in planted forests in Brazil. The objective of this study was to characterize the biomass fresh, crisp and charred a Eucalyptus hybrid urograndis with 5 years. The E. urograndis studied in this work with 5 years of age were collected in the reforestation area C.VALE company in city Palotina-Paraná. Held torrefaction and carbonization of biomass, determining the gravimetric yield of these processes, the lignin content, the basic density and the chemical analysis (moisture, volatiles, ash content, fixed carbon content) the material fresh, crisp and charred. The results were satisfactory and are consistent with those found in the literature. Was obtained average yields of 31.59% and 50.30% for carbonization and torrefaction respectively.

Keywords Carbonization, Torrefaction, Immediate analysis.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: ESQUEMA DA HIBRIDIZAÇÃO DO <i>E. urograndis</i>	14
FIGURA 2: HISTÓRICO DE PLANTIOS DE FLORESTAIS DE <i>Eucalyptus</i> NO BRASIL.	18
FIGURA 3: DISTRIBUIÇÃO DA ÁREA DE PLANTIOS DE <i>Eucalyptus</i> POR ESTADO	19
FIGURA 4: ÁREA DE PLANTIO DA EMPRESA C. VALE.....	27
FIGURA 5: AMOSTRAS EM ENVELOPES DE PAPEL FILTRO.....	30
FIGURA 6: EQUIPAMENTO PARA A EXTRAÇÃO DE LIGNINA	31
FIGURA 7: AMOSTRAS EM BANHO MARIA.	32
FIGURA 8: BOMBA UTILIZADA PARA FILTRAÇÃO A VÁCUO.....	32
FIGURA 9: ANÁLISE DO TEOR DE CINZAS DAS AMOSTRAS.....	36

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: PLANTIOS DE <i>Eucalyptos</i> POR ESTADO.....	18
TABELA 2: FAIXAS DE TEMPERATURAS E EFEITOS ACARRETADOS.....	25
TABELA 3: ÁRVORES REFERENTES AOS CLONES DO HÍBRIDO <i>E. urograndis</i>	37
TABELA 4: RESULTADOS DAS ANÁLISES DE DENSIDADE BÁSICA.....	38
TABELA 5: MÉDIA DO TEOR DE LIGNINA DAS AMOSTRAS.	39
TABELA 6: MÉDIA DA ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA DO MATERIAL IN-NATURA DO HÍBRIDO <i>E. urograndis</i>	40
TABELA 7: MÉDIA DA ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA DO TORRADO DOS HÍBRIDOS <i>E. urograndis</i>	41
TABELA 8: RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO DO MATERIAL TORRADO.....	42
TABELA 9: MÉDIA DA ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA DO CARBONIZADO DOS CLONES DO <i>E. urograndis</i>	43
TABELA 10: RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO DA CARBONIZAÇÃO	44

LISTA DE ABREVIATURAS

A - teor de cinzas

b.s.- base seca

b.u. - base úmida

CAP - circunferência à altura do peito (1,30 m do solo)

cm - centímetros

CV - Coeficiente de variação (medida relativa de dispersão)

DAP - diâmetro à altura do peito

E. urograndis - *Eucalyptus urograndis*

F - teor de carbono fixo

g/cm³ - gramas por centímetros cúbicos

ha - hectare

m - metros

sd - sem data

V - teor de materiais voláteis

W - teor de umidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 SILVICULTURA.....	16
3.1.1 EUCALIPTO	17
3.2 PARÂMETROS FÍSICO – QUÍMICOS DA MADEIRA	20
3.3 TRANSFORMAÇÕES DA BIOMASSA.....	22
3.3.1 Torrefação	22
3.3.2 Carbonização	22
3.4 FATORES QUE INFLUENCIAM A CARBONIZAÇÃO E A PIRÓLISE	24
3.4.1 Temperatura.....	24
3.4.2 Tempo de residência	25
3.4.3 Taxa de aquecimento	25
3.4.4 Velocidade da reação.....	26
3.4.5 Pressurização.....	26
4 MATERIAL E MÉTODOS	27
4.1 DENSIDADE BÁSICA	28
4.1.1 Método de imersão baseado na variação do peso líquido	28
4.2 ANÁLISE DO TEOR DE LIGNINA.....	29
4.3 CARBONIZAÇÃO.....	33
4.4 TORREFAÇÃO	33
4.5 ANÁLISE IMEDIATA DE BIOMASSA E RESÍDUOS.....	34
4.5.1 Determinação do teor de umidade	34
4.5.2 Determinação do teor de carbono fixo.....	35

4.5.3	Determinação do teor de voláteis	35
4.5.4	Determinação do teor de cinzas	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1	AMOSTRAGEM DOS CLONE DE <i>E. urograndis</i>	37
5.2	ANÁLISE DE DENSIDADE BÁSICA	38
5.4	ANÁLISE IMEDIATA	40
5.4.1	Propriedades do material in-natura	40
5.4.2	Propriedades do material Torrado	41
5.4.3	Propriedades do carvão vegetal	43
6	CONCLUSÃO	46
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
8	APÊNDICES	52

1 INTRODUÇÃO

A Biomassa pode ser definida como um recurso natural que dispõe de bioenergia e que pode ser processada para fornecer uma forma mais adequada ao uso final (BNDES; CGEE, 2008).

Dados da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAAF, 2013) mostraram que em 2012 a biomassa correspondeu a 7 % da oferta de energia elétrica no Brasil, e que as regiões Sul e Sudeste possuem o maior potencial de geração de energia a partir de biomassa devido a alta concentração de plantios florestais e de cana-de-açúcar, esse cenário tende a crescer ainda mais com os incentivos governamentais que estão sendo aplicados a esse setor.

Dentre as ações do governo brasileiro direcionadas à diversificação da matriz energética nacional, destaca-se o projeto de lei 3.529/2012 que instituirá a política nacional de geração de energia elétrica a partir da biomassa, estabelecendo a obrigatoriedade da contratação da bioenergia na composição da geração elétrica nacional. Com a sanção desta lei, a geração de energia elétrica a partir da biomassa será inevitável e a participação das fontes renováveis será ainda maior (ABRAF, 2013).

De um modo geral, a biomassa pode ser queimada diretamente, para geração de energia térmica, ou, passar por processos sequenciais de extração e conversão específicos, para obtenção de combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos.

Dentre os processos de conversão para biocombustíveis sólidos pode-se destacar a carbonização e a torrefação, que são processos de degradação térmica da biomassa.

Segundo Benittes *et al.* (2010), o desenvolvimento de processos que permitam transformar a biomassa e seus coprodutos em compostos com características mais apropriadas e com maiores rendimentos é altamente desejável e estratégico para o setor florestal brasileiro e a indústria.

O carvão vegetal é amplamente empregado em vários setores industriais brasileiros, dentre eles destaca-se o setor siderúrgico como o maior consumidor de carvão vegetal (ROSILLO-CALLE *et al.* 2005).

No setor siderúrgico carvão exerce duplo papel na fabricação do aço, como combustível permite alcançar altas temperaturas (cerca de 1.500° Celsius) necessárias à fusão do minério e como redutor associa-se ao oxigênio que se desprende do minério com a alta temperatura, deixando livre o ferro. O processo de remoção do oxigênio do ferro para ligar-se ao carbono chama-se redução e ocorre dentro de um equipamento chamado alto forno (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2009).

A forma e as propriedades do carvão vegetal não são absolutamente fixas, mas dependem fundamentalmente do tipo de madeira e do processo de carbonização (LUENGO;EMMERICH,1997).

A torrefação da biomassa desenvolve-se entre 220 °C e 300 °C (SCHOWB,1985). O material torrefeito apresenta características intermediárias à carbonização e a madeira in natura, apresenta também um rendimento que varia entre 60% e 80% em função da temperatura que se desenvolve o processo (ANTAL JR. ET AL., 1990).

O processo de torrefação tem como objetivo concentrar a energia em curto tempo e obter altos rendimentos empregando baixas taxas de aquecimento e temperaturas moderadas para permitir que os voláteis de maior poder calorífico fiquem retidos no produto sólido (DOAT, 1985).

Considerando que o eucalipto tem uma área plantada bastante grande no Brasil, voltada principalmente para a geração de energia e levando-se em conta que sua madeira pode ser aproveitada cada vez mais precocemente ocupa uma posição de grande importância neste setor.

O gênero *Eucalyptus* conta com mais de 600 espécies e grande variedade de híbridos e apresenta uma característica de grande interesse, a facilidade entre a hibridização das espécies (ANDRADE, 1961).

O *Eucalyptus urograndis* é resultante do cruzamento do *Eucalyptus urophylla* e do *Eucalyptus grandis* (Figura 1), quando se realiza a hibridização de espécies tem-se

como objetivo a união de uma ou mais características de interesse no híbrido resultante do processo.

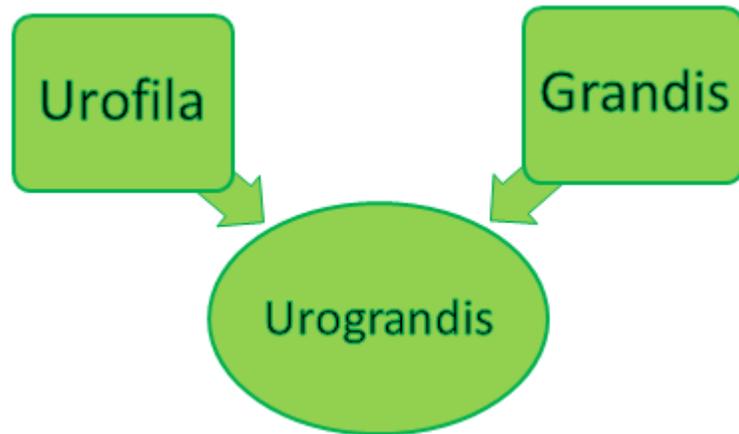


FIGURA 1: ESQUEMA DA HIBRIDIZAÇÃO DO *E. urograndis*.

O *E. urograndis* apresenta ótima resistência à deficiência hídrica, a madeira é considerada moderadamente leve, o ritmo de crescimento e o rendimento volumétrico são, geralmente, superiores, quando comparados a outras espécies convencionais (crescimento em diâmetro 20% superior a outras espécies), pode chegar até 15% mais do que a altura convencional e é uma espécie com capacidade comprovada de adaptação em todas as regiões do país (BENTEC, sd).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente estudo tem como objetivo caracterizar a biomassa in natura, torrada e carbonizada de um clone de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* com 5 anos de idade.

Para isso tem-se como objetivos específicos:

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a densidade das amostras;
- Determinar o teor de Lignina;
- Torrar e carbonizar as amostras;
- Determinar o rendimento gravimétrico da biomassa torrada e carbonizada;
- Realizar a análise imediata (voláteis, umidade, carbono fixo e cinzas) das amostras in natura, torrada e carbonizada.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A obtenção da madeira pode se dar por meio de florestas nativas ou florestas plantadas. As florestas nativas têm servido de reserva energética por séculos, porém os métodos de extração dessa biomassa, por muitas vezes, dão-se de maneira não sustentável. As árvores necessitam de tempo para crescer e não podem ser consideradas como uma fonte inesgotável de energia, portanto constituem recursos que necessitam ser adequadamente manejados para que continuem disponíveis. Uma atitude puramente extrativa tem outras sérias consequências além do esgotamento de madeira, como o empobrecimento do solo e o aumento da erosão (NOGUEIRA, 2005).

3.1 SILVICULTURA

A silvicultura visa o estudo das maneiras naturais e artificiais de restaurar e melhorar o povoamento nas florestas, para atender às exigências do mercado. Este estudo pode ser aplicado na manutenção, no aproveitamento e no uso consciente das florestas (AGEITEC, sd).

A silvicultura pode ser dividida em clássica e moderna, a clássica abrange as florestas naturais, buscando forças produtivas provenientes dos sítios ecológicos, e as restrições são determinadas pela necessidade de não prejudicar a estabilidade natural do ecossistema, já a moderna, opera com as florestas plantadas, que são mantidas artificialmente. O objetivo de ambas é a produção de madeira, porém, a silvicultura moderna não tem apenas a finalidade de produzir madeira, mas também serviços e bens (AGEITEC, sd).

Estimativas apontam que em 2012 o setor florestal manteve 4,4 milhões de postos de empregos, incluindo empregos diretos (0,6 milhão), empregos indiretos (1,3 milhão) e empregos resultantes do efeito-renda (2,4 milhões). Além da geração de empregos diretos e indiretos o setor florestal brasileiro é também relevante em relação aos impostos recolhidos, a estimativa do total de tributos arrecadados pelo setor de florestas plantadas em 2012 somou BRL 7,6 bilhões (ABRAF, 2013).

Os estados de Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Bahia, Santa Catarina, Mato Grosso do Sul e Rio Grande do Sul se destacaram no cenário nacional como detentores de 87,1% da área total de plantios florestais (ABRAAF, 2013).

Com a evolução da silvicultura no Brasil, ficou clara a necessidade de desenvolvimento de árvores mais adaptadas a diferentes solos e condições climáticas, agregando características de interesse econômico e social, como aumento de produtividade e maior capacidade de adaptação, resistência a algumas doenças e pragas e tolerância a condições de estresse. (EMBRAPA, 2011).

3.1.1 EUCALIPTO

O eucalipto ganhou destaque na silvicultura brasileira pelo seu excelente desempenho silvicultural. O eucalipto é uma árvore nativa da Austrália, do Timor e da Indonésia, sendo exótico em todas as outras partes do mundo. Os primeiros plantios datam do início do século XVIII, na Europa, na Ásia e na África. Já no século XIX, começou a ser plantado em países como Espanha, Índia, Brasil, Argentina e Portugal (PRYOR, 1976; FAO, 1981).

O gênero *Eucalyptus* pertence à família *Mirtaceae* e conta com cerca de 600 espécies e grande número de variedades e híbridos, sendo espécie mais usada em reflorestamento no Brasil (ANDRADE, 1961).

As principais espécies cultivadas atualmente no Brasil incluem o *Eucalyptus grandis*, o *Eucalyptus camaldulensis*, o *Eucalyptus saligna* e o *Eucalyptus urophylla*, entre outras (EMBRAPA, 2011).

Além disso, foram desenvolvidos cruzamentos entre as espécies, resultando em híbridos, como é o caso do *Eucalyptus urograndis* (*E. grandis* X *E. urophylla*) (EMBRAPA, 2011).

Em 2012, a área ocupada por plantios florestais de *Eucalyptus* no Brasil totalizou 5.105.245 ha (ABRAF, 2013). Na figura 2 observa-se que desde 2006 a área cultivada com eucalipto vem crescendo.

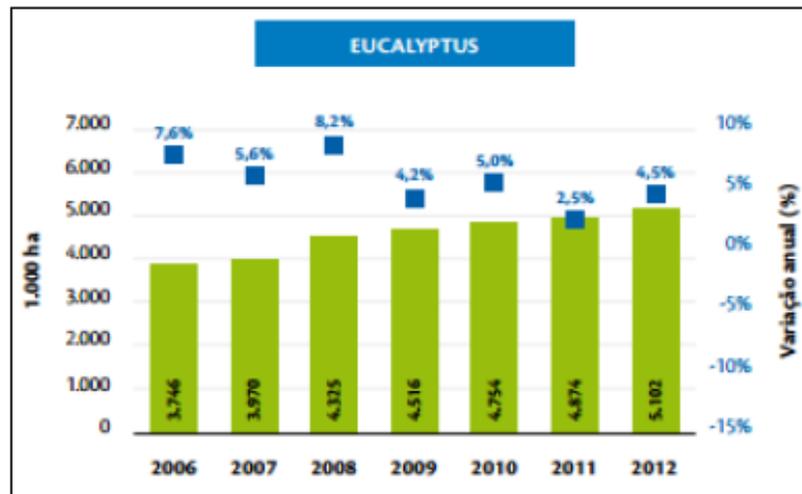


FIGURA 2: HISTÓRICO DE PLANTIOS DE FLORESTAIS DE *Eucalyptus* NO BRASIL.
 FONTE: ABRAF (2013).

A tabela 1 ilustra o crescimento do plantio de eucalipto em ha do ano de 2006 até 2012 e a figura 3 a distribuição dos plantios de *Eucalyptus* por estado, destaca-se a expressiva participação das regiões sul e sudeste nesta distribuição.

TABELA 1: PLANTIOS DE *Eucalyptos* POR ESTADO.

UF	Plantios de <i>Eucalyptus</i> (ha)						
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
MG	1.181.429	1.218.212	1.278.210	1.300.000	1.400.000	1.401.787	1.438.971
SP	915.841	911.908	1.001.080	1.029.670	1.044.813	1.031.677	1.041.695
PR	121.908	123.070	142.430	157.920	161.422	188.153	197.835
BA	540.172	550.127	587.610	628.440	631.464	607.440	605.464
SC	70.341	74.008	77.440	100.140	102.399	104.686	106.588
RS	184.245	222.245	277.320	271.980	273.042	280.198	284.701
MS	119.319	207.687	265.250	290.890	378.195	475.528	587.310
ES	207.800	208.819	210.410	204.570	203.885	197.512	203.349
PA	115.806	126.286	136.290	139.720	148.656	151.378	159.657
MA	93.285	106.802	111.120	137.360	151.403	165.717	173.324
GO	49.637	51.279	56.880	57.940	58.519	59.624	38.081

FONTE: ABRAF (2013)

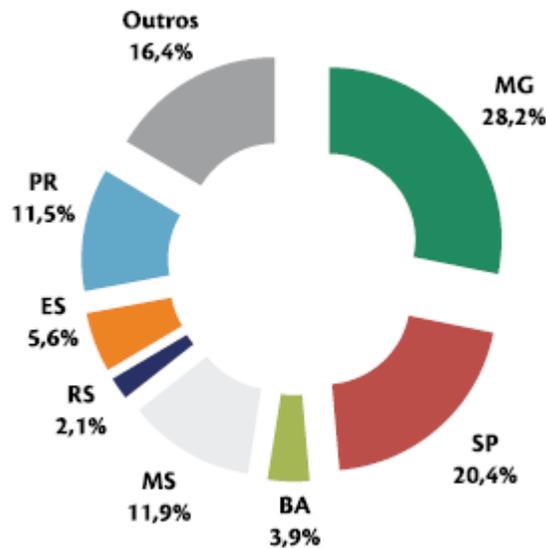


FIGURA 3: DISTRIBUIÇÃO DA ÁREA DE PLANTIOS DE *Eucalyptus* POR ESTADO
 FONTE: ABRAAF (2013).

Florestas energéticas enquadram-se no conceito de silvicultura moderna, sendo seu conceito introduzido na década de 80, para definir as plantações florestais com grande número de árvores por hectare e, conseqüentemente, de curta duração que tinham como finalidade a produção do maior volume de biomassa por área em menor espaço de tempo (MAGALHÃES, 1982).

Com a evolução da silvicultura no Brasil, ficou clara a necessidade de desenvolvimento de árvores mais adaptadas a diferentes solos e condições climáticas, agregando características de interesse econômico [...].

Uma das grandes vantagens do eucalipto é a facilidade que essa planta oferece para a obtenção de cruzamentos entre diferentes espécies, processo conhecido como hibridação [...].

O *Eucalyptus urograndis* apresenta ótima resistência à deficiência hídrica, ritmo de crescimento e o rendimento superiores, quando comparados a outras espécies (crescimento em diâmetro 20% superior a outras espécies), pode chegar até 15% mais do que a altura convencional (EMBRAPA, 2011).

3.2 PARÂMETROS FÍSICO – QUÍMICOS DA MADEIRA

As variações nas composições químicas, físicas e anatômicas da madeira são grandes entre espécies, embora dentro da mesma espécie elas também ocorram, em função principalmente da idade, fatores genéticos e ambientais (EMBRAPA, 2011).

Todas as espécies produtoras de madeira possuem variações naturais em suas características, que são provenientes de diferenças genotípicas, bem como de diferentes respostas às condições ambientais que a árvore está se desenvolvendo (PANSHIN; DE ZEEUW, 1964) *apud* GONÇALVES, 2004).

Biomassa vegetal é uma composição estruturada de três famílias de compostos químicos: hemicelulose, celulose e lignina. A hemicelulose e a celulose estão agrupadas formando a holocelulose, a qual dispõe as paredes das fibras. A lignina é um polímero tridimensional com finalidade de manter as fibras juntas (BARRETO *et al.*, 2008).

O teor de lignina varia 15 a 30 % da constituição das plantas devido à características da planta, região do corte e o local onde foi realizada a coleta (VELOSO *et al.*, 1992).

A composição imediata de uma amostra é o conteúdo em porcentagem de massa de carbono fixo (F), voláteis (V), umidade (W) e cinzas (A)

De acordo com Nogueira e Lora (2003), a diferença entre a fração de carbono e o teor de cinzas na amostra é chamado de carbono fixo.

Collet (1955) estudando uma série de madeiras demonstrou que a quantidade de carbono fixo, fornecida por unidade de madeira enforada, é função da porcentagem de lignina da Madeira.

A densidade é considerada como um índice universal para determinar a qualidade da madeira, no gênero *Eucalyptus* a densidade varia de acordo com a idade, vigor da espécie, com o local onde crescem dentre outros fatores (PINHEIRO, 1999).

Com relação à densidade é bem aceito o conceito de que madeira mais densa dá como resultado um carvão mais denso. Para um mesmo volume de Madeira, a

obtenção de carvão mais denso resulta num maior rendimento volumétrico de carbonização (Forest products laboratory, 1961; Doat *et al*, 1975).

De acordo com Nogueira e Lora (2003), o teor de umidade é a medida da quantidade de água livre na biomassa e que pode ser avaliada pela diferença de massa de uma amostra, antes e logo após ser submetida à secagem.

Quirino *et al.* (2005) destacou que o teor de umidade da madeira gira em torno de 35 a 65 % em base úmida, a perda de calor na forma de vapor d'água acaba sendo inevitável.

Quando a biomassa está úmida, parte da energia liberada na combustão é usada na vaporização da água. Desta forma quanto mais seca a matéria prima, mais energia estará disponível para o aquecimento (JARA, 1989).

O teor de cinzas pode ser elevado por contaminação durante o processo de colheita, transporte e manuseio.

As cinzas são componentes indesejáveis nos processos industriais e, principalmente, no uso doméstico da biomassa por que quanto mais alto o teor de cinzas do material, menor o poder calorífico do combustível, conseqüentemente, há maior quantidade de resíduos para ser removido no final da combustão. Além disso o contato desse resíduo com partes metálicas favorecem o aparecimento da corrosão diminuindo a vida útil do equipamento (RICHARDSON *et al.*, 2002).

3.3 TRANSFORMAÇÕES DA BIOMASSA

3.3.1 Torrefação

As primeiras publicações sobre tecnologias de torrefação de madeira datam do início do século XX, mas o termo torrefação já era utilizado na França para designar o processo de aquecimento intenso de materiais para eliminar a umidade. Na década de 1930 já existiam patentes registradas sobre o processo de torrefação da madeira (BOUTEILLE, 1939).

A torrefação da biomassa desenvolve-se entre 220 °C e 300 °C, embora alguns autores recomendem não ultrapassar o limite de 280 °C (Schwob,1985). Nessas condições, a umidade é removida e a hemicelulose degrada, provocando a liberação de ácido acético, frações de fenol e outros compostos de baixo poder calorífico, a lignina e a celulose também sofrem ligeira despolimerização. O rendimento de conversão varia entre 60 % e 80 % em função das condições de temperatura em que se realiza o processo. O material resultante apresenta características intermediárias entre o carvão e a biomassa original (ANTAL JR. *et al.*, 1990; DOAT, 1985).

As propriedades da biomassa torrefeita variam em função do tempo de residência e da temperatura de processamento. Para cada combinação dessas variáveis, podem-se obter diferentes propriedades energéticas, pois os teores de voláteis e carbono fixo variam em função de cada combinação realizada (BOURGEOIS, 1994).

3.3.2 Carbonização

A carbonização da madeira é o mais antigo dos tratamentos térmicos de biomassa. A madeira, queimada em ambientes fechados, tornava-se preta e friável,

resultando num combustível que não produzia fumaça nem chama e gerava um calor mais intenso que a própria madeira. Começou-se assim, a produção de carvão vegetal para utilização como fonte de energia nas habitações, sem enchê-las de fumaça (JUVILLAR, 1980).

Segundo Gomes e Oliveira (1982), a madeira sofre um processo de carbonização quando aquecida em atmosfera de pouco oxigênio, em temperaturas acima de 300°C, desprendendo vapor d'água, líquidos orgânicos e gases não condensáveis, ficando como produto o carvão. A produção de carvão vegetal é o mais antigo processo de transformação química para a utilização da madeira.

Cada componente da biomassa vegetal participa de maneira diferente do processo de carbonização, gerando diferentes produtos devido à natureza de sua composição química. A degradação da celulose processa-se em temperaturas entre 200 °C e 280 °C com uma degradação progressiva que inclui despolimerização e desidratação (ROFFAEL; SCHALLER 1971).

As hemiceluloses começam a perder peso em temperaturas próximas a 225°C, sendo o componente menos estável, uma vez que a sua degradação é quase completa na temperatura de 325°C, perdendo peso continuamente sob a ação do calor. (TRUGILHO, 2005).

A lignina é termicamente mais resistente que os demais carboidratos que compõem a madeira. Sua degradação térmica está situada entre 225 °C e 450 °C, com a presença de reações exotérmicas (SCHNIEWIND, 1985).

A lignina é o componente químico mais importante da madeira o qual se objetiva a produção de carvão vegetal, *Oparina et al.*, (1971), *apud* Gonçalves, (2004) afirma que a presença de um mais alto teor de substâncias de natureza aromática tais como, extrativos e lignina, dá como consequência um carvão com maior densidade e mais resistente em termos de propriedades físico-mecânicas. Satanoka (1963) *apud* Gonçalves por sua vez afirma que madeiras com maior teor em lignina resultam em carvão com maior poder calorífico.

A lignina é o componente mais resistente termicamente da madeira, sua degradação térmica situa-se entre 225 °C e 450 °C, ao contrário da celulose e das hemiceluloses, cuja degradação ocorre em temperaturas mais amenas (SCHNIEWIND,

1985).

Em termos de rendimento, a carbonização vegetal bem conduzida pode gerar até 40 kg de carvão vegetal a partir de 100 kg de biomassa seca; ou seja, um rendimento de 40% (BENITTES *et al.*, 2010).

A forma e as propriedades do carvão vegetal não são absolutamente fixas, mas dependem fundamentalmente do tipo de madeira e do processo de carbonização (LUENGO *et al.*, 1997).

A porcentagem da concentração de carbono varia de acordo principalmente com a temperatura, tempo de residência e taxa de aquecimento (MEIRA, 2002).

3.4 FATORES QUE INFLUENCIAM A CARBONIZAÇÃO E A PIRÓLISE

3.4.1 Temperatura

São muitas as reações químicas que ocorrem durante esses processos e os fenômenos de reação estão estreitamente relacionados com a temperatura à qual a biomassa é submetida (GOMES *et al.*, 1980). O aumento na temperatura de pirólise causa diminuição de sólido produzido (carvão), aumento nos produtos gasosos e aumento da concentração de carbono fixo da fração sólida (SYRED *et al.*, 2006).

TABELA 2: FAIXAS DE TEMPERATURAS E EFEITOS ACARRETADOS.

Fase	Temperatura	Fenômeno
I	Até 200 °C	<ul style="list-style-type: none"> - Processo denominado pirólise lenta. - Liberação de vapor d'água e gases. - A madeira não se igniza. - Existência de algumas reações exotérmicas de oxidação. - Mudança de cor.
II	200 a 280 °C	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento de reação química e eliminação de gases. - Ocorrência de reações exotérmicas primárias sem inflamação. - Temperatura considerada como a temperatura de ignição. - Fase conhecida como pirólise rápida.
III	280 a 380 °C	<ul style="list-style-type: none"> - Produção de grandes quantidades de destilados, principalmente ácidos acéticos e metanol. - O resíduo final dessa fase já é carvão vegetal, mas que ainda apresenta compostos volatilizáveis em sua estrutura - Fase exotérmica.
IV	380 a 500 °C	<ul style="list-style-type: none"> - Redução da emissão de gases. - Produção de ácido acético, metanol, alcatrão e diversas substâncias gasosas condensáveis. - A perda de massa é da ordem de 70% em relação à massa original. - Fase exotérmica.
V	Acima de 500 °C	<ul style="list-style-type: none"> - Término da carbonização e início da gaseificação do carvão. - O carvão é o resíduo principal. - No interior da madeira permanece a temperatura das fases I, II e III. - Fase exotérmica.

FONTE: FIGUEROA (2009).

3.4.2 Tempo de residência

Quanto maior o tempo de residência combinados com baixas taxas de aquecimento maximizam a produção de carvão. (LUENGO *et al.*, 2008).

3.4.3 Taxa de aquecimento

Quando o processo ocorre com aumento muito rápido da temperatura, as reações químicas favorecem a formação de frações voláteis (gases e líquidos). Por outro lado, quando o aquecimento ocorre de forma gradual, as reações favorecem a formação de frações sólidas (LUENGO *et al.*, 2008).

3.4.4 Velocidade da reação

Parâmetro básico para estabelecer as condições dos processos de transformações. Para determinar essa velocidade de reação se deve avaliar a influência de vários parâmetros como a velocidade de aquecimento, a temperatura máxima que pode ser alcançada, as condições da atmosfera em que ocorre o processo e as características da estrutura e composição química da matéria prima (GÓMEZ, 2008).

3.4.5 Pressurização

A pressão também é um parâmetro de processo que afeta o rendimento. A influência favorável da pressão sobre o rendimento em carvão provém da maior concentração da fase gasosa, composta pelos voláteis, no interior do reator de carbonização, e não simplesmente pelo aumento de pressão do sistema. Além dos seus efeitos sobre o rendimento em carvão, altas pressões melhoram a transferência de calor dentro do reator, produzindo um carvão mais uniforme e reduzindo o tempo requerido para o aquecimento (ANTAL *et al.*, 1996).

4 MATERIAL E MÉTODOS

A coleta do material foi realizada na cidade de Palotina, na região Oeste do Paraná. A cidade apresenta um clima subtropical úmido e uma temperatura média de 20 °C, está a uma altitude de aproximadamente 335 m acima do nível do mar (IAPAR, sd).

As amostras foram coletadas na área de reflorestamento da empresa C. Vale, o experimento analisou amostras de *Eucalyptus urograndis* denominado H13 de um plantio de 5 anos de idade e espaçamento 3 x 2 m, a figura 4 representa a área onde as amostras foram retiradas.



FIGURA 4: ÁREA DE PLANTIO DA EMPRESA C. VALE.
FONTE: GOOGLE MAPS (2014).

Delimitou-se uma parcela de 10 x 20 m e determinou-se a altura com um clinômetro e o CAP (Circunferência a Altura do Peito), a 1,30 m do solo das árvores, dividiu-se então o CAP por π e obteve-se então o DAP. Estabeleceu-se as medidas médias para essas dimensões, e coletou-se amostras de 5 árvores com valores aproximados a essa média.

Das árvores amostradas foram retirados discos de 10 cm de altura cada no CAP. Após secos em estufa à 105 °C por um período 72 horas, esses discos passaram por uma plaina elétrica onde foram reduzidos à um material particulado semelhante a

maravalha. Na sequência o material foi reduzido em um moinho de facas, e selecionado em um peneirador utilizando peneiras de 35 e 80 mesh com intenção de homogeneizar e preparar as amostras para as próximas análises, as análises foram realizadas no laboratório de química orgânica da Universidade Federal do Paraná setor Palotina.

4.1 DENSIDADE BÁSICA

Para determinação da densidade utilizou-se o método descrito por Trugilho *et al.* (1990). Foram retiradas 3 amostras de tamanhos 2x3x5 cm dos discos das árvores, totalizando 15 amostras.

4.1.1 Método de imersão baseado na variação do peso líquido

O método de determinação da densidade básica foi o de imersão baseado na variação do peso líquido, que é fundamentado pelo princípio de Arquimedes, em que a diferença de massa indicada na balança corresponde ao volume da amostra, dado que se considera a densidade da água igual a 1,00 g. cm³.

Primeiramente, as amostras passaram por uma secagem a 105 ± 3 °C por 72 horas na estufa, em seguida foram colocadas em recipientes plásticos com água e tampados, mantidas durante 20 dias.

Este método é baseado na variação do peso do líquido, no qual a perda aparente de peso de um corpo imerso em um líquido é igual ao peso do líquido deslocado (Princípio de Arquimedes). Sendo calculada utilizando-se a expressão:

$$DB = PAS/DPE \text{ _____ (eq. 1)}$$

Sendo:

DB = Densidade básica da amostra (g/cm^3).

PAS = Peso da amostra absolutamente seca (g).

DPE = Diferença de peso da amostra devido ao empuxo (g), que corresponde ao seu volume.

4.2 ANÁLISE DO TEOR DE LIGNINA

Para determinação do teor de lignina seguiu-se a norma TAPPI T222 om-98. Realizou-se essa análise em duplicata, pesou-se aproximadamente 1g de fibra absolutamente seca, em saquinhos de papel filtro grampeados e identificados (FIGURA 5). Determinou-se a massa de amostra a ser utilizada baseando-se na seguinte equação:

Peso equivalente a 1,0000g = $(1,0000 / \% \text{ a.s.}) \times 100$ _____ (eq. 2)

Onde: % a.s. representa a % da amostra absolutamente seca.



FIGURA 5: AMOSTRAS EM ENVELOPES DE PAPEL FILTRO

Após preparados e identificados os saquinhos foram transferidos para o corpo do extrator onde ficaram dois saquinhos por extrator. Preparou-se uma solução tolueno-álcool na proporção de 2:1 e então essa mistura foi homogeneizada.

Inicialmente balões de 250 mL contendo as pérolas de vidro e juntamente com o extrator soxhlet foram secos em estufa. Montou-se o sistema balão + extrator soxhlet + condensador sobre uma bateria Sebelin (FIGURA 6) e iniciou-se a fervura de 200 mL da mistura tolueno-álcool (2:1) mantendo durante 6 horas, após esse período a mistura foi substituída por uma solução de 200 mL contendo apenas álcool e prosseguiu-se com a extração por mais 6 horas, após o término deixou-se então esfriar.

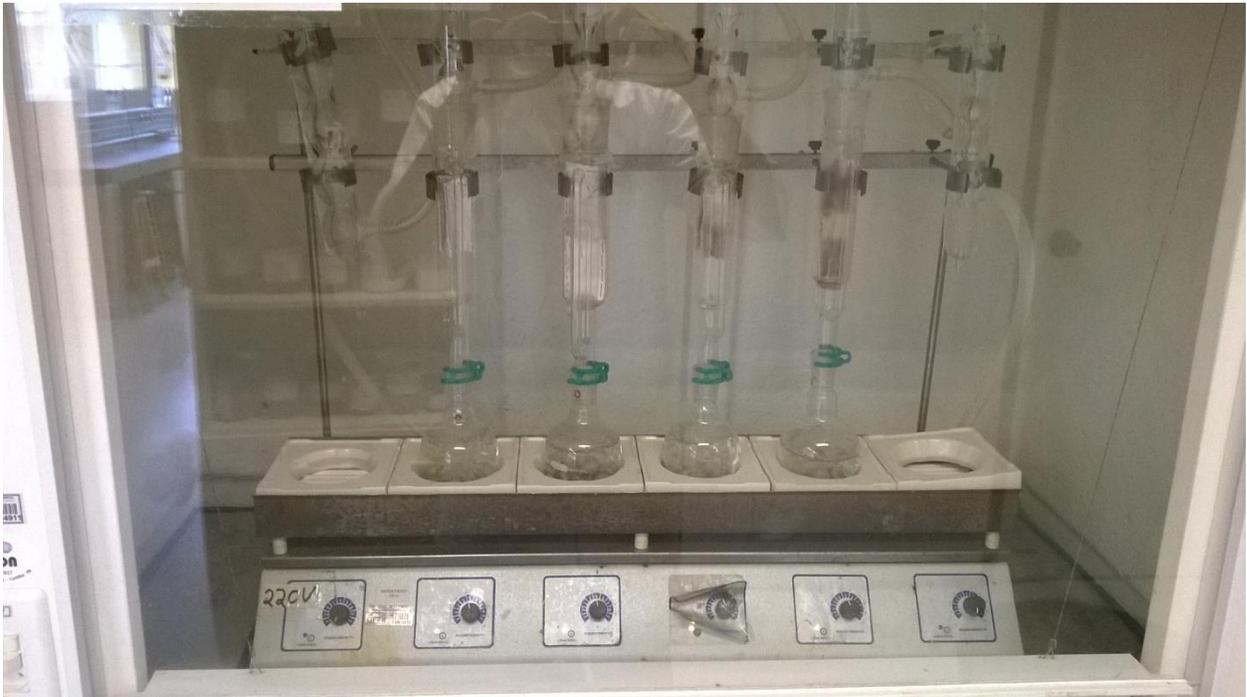


FIGURA 6: EQUIPAMENTO PARA A EXTRAÇÃO DE LIGNINA

Os saquinhos foram retirados dos extratores e realizou-se então a extração com água quente, usou-se três porções de água quente, uma por hora totalizando então três horas de extração.

As amostras foram então deixadas secando ao ar livre durante 48 horas, após secas foram transferidas para béqueres e adicionaram-se então 15 mL de uma solução de H_2SO_4 72% em cada amostra com a finalidade de digerir os componentes da amostra liberando assim os polímeros, essas amostras foram então mantidas em banho de gelo durante 2 horas (FIGURA 7).

Cada amostra foi transferida para um erlenmeyer de 1 L usando 560 mL de água destilada mantidas em banho maria à 100 °C durante 4 horas conforme a figura 7, após decorridas as 4 horas esperou-se a lignina sedimentar.



FIGURA 7: AMOSTRAS EM BANHO MARIA.

Realizou-se então uma filtração à vácuo (FIGURA 8) em um cadinho de vidro sinterizado de porosidade fina (nº 2). Após ser seco em estufa à 110 °C foi transferido para um dessecador e pesou-se.



FIGURA 8: BOMBA UTILIZADA PARA FILTRAÇÃO A VÁCUO.

A porcentagem de lignina foi então calculada pela seguinte equação:

$$\%Lignina = (\text{Peso do resíduo}/1,0000)\times 100 \quad \text{(eq. 3)}$$

4.3 CARBONIZAÇÃO

Para a realização da carbonização os materiais escolhidos foram cunhas opostas em um disco de madeira, a carbonização das amostras seguiu a metodologia descrita por Trugilho *et al.*, (2005).

As amostras foram colocadas em cadinhos de porcelana e secas em estufa a 103 °C até massa constante e pesou-se. Em seguida foram carbonizadas em forno elétrico do tipo mufla à uma taxa de aquecimento de 1,67 °C por minuto, a temperatura inicial foi a temperatura ambiente por volta dos 32 °C e a temperatura máxima final foi de 450 °C mantida durante 30 minutos, totalizando aproximadamente 4,5 horas. O rendimento gravimétrico (%) foi então determinado pela razão peso do produto pós-processo-peso inicial das cunhas e multiplicando-se por 100.

4.4 TORREFAÇÃO

A torrefação foi realizada por metodologia descrita por Trugilho *et al.*, (2012). As amostras colocadas em cadinhos de porcelana foram secas em estufa à 103 °C até massa constante e pesou-se. Em seguida torradas em forno elétrico do tipo mufla à uma taxa de aquecimento de 3,00 °C por minuto, a temperatura inicial foi a temperatura ambiente por volta dos 32 °C e a temperatura máxima final foi de 250 °C mantida durante 60 minutos. O rendimento gravimétrico (%) foi então determinado pela razão peso do produto pós-processo-peso inicial das cunhas e multiplicando-se por 100.

4.5 ANÁLISE IMEDIATA DE BIOMASSA E RESÍDUOS

Realizou-se a análise química imediata para determinar o teor de umidade, carbono fixo, materiais voláteis e cinzas. As análises foram feitas em duplicata conforme o método ASTM (D-3. 172 até D-3. 175).

4.5.1 Determinação do teor de umidade

Para determinar-se o teor de umidade os cadinhos e suas respectivas tampas foram previamente secos em estufa à 103 °C durante uma hora. Após esse tempo foram transferidos para dessecador por 30 minutos e pesou-se.

Adicionou-se aproximadamente 1,0000 g de amostra em cada cadinho, em seguida os cadinhos com amostra e suas tampas foram levados à estufa onde ficaram destampados à uma temperatura de 103 °C durante duas horas.

Colocou-se os cadinhos tampados no dessecador por 30 minutos até que esfriassem e então pesou-se.

Repetiu-se o procedimento de secagem na estufa por 30 minutos e pesou-se novamente. Caso não houvesse variação no peso, passa-se à etapa seguinte, caso contrário, repetia-se o procedimento de secagem da amostra.

Os cadinhos com as amostras foram colocadas no dessecador para o procedimento seguinte (análise de carbono fixo).

O teor de umidade foi calculado pela seguinte equação:

$$W = [\text{Amostra seca (g)} / \text{Massa de amostra úmida (g)}] \times 100 \text{_____ eq. (4)}$$

4.5.2 Determinação do teor de carbono fixo

Os cadinhos e as tampas foram mantidos em estufa à 103 °C durante 1 hora, após esse tempo foram transferidos para dessecador por 30 minutos até esfriarem, e pesou-se.

Usou-se em cada ensaio aproximadamente 1,000 grama de amostra, em seguida os cadinhos com amostra e suas tampas foram levados à estufa à uma temperatura de 103 °C onde permaneceram destampados durante duas horas.

Colocou-se os cadinhos no dessecador por 30 minutos até que esfriassem e então pesou-se.

Repetiu-se o procedimento de secagem na estufa por 30 minutos e pesou-se novamente. Caso não houvesse variação no peso, passa-se à etapa seguinte, caso contrário, repetia-se o procedimento de secagem da amostra.

A análise foi realizada em forno elétrico do tipo mufla, aquecia-se então até a temperatura de 950 °C colocava-se então os cadinhos na mufla tampados e mantinha-os durante 6 minutos.

O teor de carbono fixo dado em (%) foi calculado pela seguinte equação:

$$F = \{[\text{Massa de carbono (g)} - \text{Massa de cinzas (g)}] / \text{Massa amostra seca}\} \times 100 \text{__eq. (5)}$$

4.5.3 Determinação do teor de voláteis

Obtido através da variação de massa durante a análise de carbono fixo, foi calculado pela seguinte equação:

$$V = \{[\text{amostra seca (g)} - \text{Massa de carbono (g)}] / \text{Massa amostra seca (g)}\} \times 100 \text{__eq. (6)}$$

4.5.4 Determinação do teor de cinzas

Com a mufla fria ou com a temperatura inferior a 300°C, colocou-se os cadinhos destampados, e então aqueceu-se lentamente até a temperatura de 750 °C mantida durante duas horas, a Figura 9 representa as amostras prontas para o início da análise do teor de cinzas.



FIGURA 9: ANÁLISE DO TEOR DE CINZAS DAS AMOSTRAS.

Após as duas horas as amostras eram colocadas no dessecador e tampadas. Deixava-se durante 1 hora ou mais e então pesava. O teor de cinzas foi calculado pela equação:

$$A = [\text{Massa de cinzas (g)} / \text{Massa de amostra seca (g)}] \times 100 \text{ eq. (7)}$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 AMOSTRAGEM DOS CLONE DE *E. urograndis*

Como a área de coleta era limitada a 33 árvores as chances de encontrar medidas exatas eram reduzidas, portanto escolheram-se os híbridos 1, 4, 7, 21 e 23, pois eram as árvores mais aproximadas à média e determinou-se 1, 2, 3, 4 e 5 respectivamente.

A tabela 3 representa os valores médios dos híbridos H13 de *Eucalyptus urograndis*. Os valores dos demais híbridos utilizados para determinar a média estão representados no Apêndice 1.

TABELA 3: ÁRVORES REFERENTES AOS CLONES DO HÍBRIDO *E. urograndis*

Árvore	1	2	3	4	5	Média	Variância	CV (%)
CAP (cm)	44,00	44,00	46,00	45,00	44,00	44,60	0,69	1,85
ALT (m)	20,60	21,40	20,00	22,20	22,50	21,34	0,89	4,41
DAP	14,01	14,01	14,64	14,32	14,01	14,20	0,06	1,77

Santana (2009) estudando as propriedades da madeira do *E. urograndis* nas idades de 34, 48, 61, 74, 86 meses, observou que para a idade de 34 meses os valores encontrados para altura e DAP, respectivamente foram 21,29 m e 12,42 cm, estudando essas mesmas variáveis para 48 meses a altura encontrada foi de 23,42 m e o DAP foi de 15,02 cm para 61 meses a altura foi de 25,60 m e o DAP foi de 17,59 cm, para a idade de 74 meses encontrou-se para a altura o valor médio de 24,43 m e para o DAP o valor médio de 15,83 cm e, para a última idade estudada de 86 meses obteve-se para altura o valor de 24,77 m e para o DAP 16,86 cm .

Os resultados obtidos neste estudo apresentam-se dentro da faixa dos citados na literatura para árvores com idades similares.

Acredita-se que a estabilidade fenotípica das plantas clonais é dependente das interações com ambiente explicitado pela fertilidade do solo, déficit hídrico, fotoperiodismo, umidade do solo e regime de chuvas no local e espaçamento (BRAGA, 2008).

5.2 ANÁLISE DE DENSIDADE BÁSICA

Na tabela 4 estão representados os resultados da densidade básica (DB) dos híbridos de *Eucalyptus urograndis* com idade de 5 anos.

TABELA 4: RESULTADOS DAS ANÁLISES DE DENSIDADE BÁSICA

Árvore	Densidade (g/cm ³)
1	0,42
2	0,45
3	0,45
4	0,43
5	0,46
Média	0,44
Variância	0,000216
CV (%)	3,33

A madeira do híbrido *E. urograndis* apresenta valores médios de densidade básica (0,510 g/cm³), dentro do esperado para o gênero *Eucalyptus* (BHAT *et al.*, 1990) *apud* Gonçalves, (2004).

Silva *et al.* (2012) estudando *E. urograndis* com idade de 6,2 anos sugere densidades entre 0,478 a 0,492 g/cm³, por sua vez Carvalho (1997) estudando híbridos com idade de 4, 7 e 9 anos sugere densidades entre 0,451 a 0,512 g/cm³.

O valor médio encontrado considerando o desvio padrão está de acordo com o citado acima.

5.3 ANÁLISE DO TEOR DE LIGNINA

Os valores obtidos nas análises do teor de lignina estão representados na Tabela 5.

TABELA 5: MÉDIA DO TEOR DE LIGNINA DAS AMOSTRAS.

ÁRVORE	Teor de lignina % (b.s)
1	22,30
2	21,76
3	22,27
4	22,26
5	20,15
Média	21,75
Variância	0,68
CV (%)	3,79

O teor de lignina presente na madeira varia entre 15% a 30%, dependendo da espécie vegetal. (SANTOS, 2008).

Silva (2001) ao analisar espécies de eucalipto, chegou a um percentual de 15 a 25% de lignina sem mencionar a idade das árvores. Milagres (2009) estudou o clone *E. urograndis* de idade de três anos e encontrou para o teor de lignina o valor de 27,9 %.

Trugilho *et. al.* (1996) destacam que as espécies mais jovens tendem a possuir uma maior proporção de madeira juvenil, que é mais rica em lignina, do que a madeira adulta.

No geral os resultados deste estudo quando ao teor de lignina puderam ser considerados como satisfatórios.

5.4 ANÁLISE IMEDIATA

5.4.1 Propriedades do material in-natura

A tabela 6 representa as médias obtidas nas análises do material in-natura do *Eucalyptus urograndis*, nos parâmetros: Teor de Umidade (W), Materiais Voláteis (V), Teor de Cinzas (A) e Teor de Carbono Fixo (F).

TABELA 6: MÉDIA DA ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA DO MATERIAL IN-NATURA DO HÍBRIDO *E. urograndis*

Árvore	1	2	3	4	5	Média	Variância	CV (%)
Umidade (W) % b.u.	0,62	0,96	1,11	1,02	1,08	0,96	0,03	18,44
Carbono (F) % b.s.	11,43	11,09	11,06	11,63	9,97	11,04	0,33	5,20
Voláteis (V) % b.s.	87,96	88,21	88,46	87,88	89,17	88,34	0,22	0,53
Cinzas (A) % b.s.	0,61	0,70	0,48	0,49	0,85	0,63	0,02	22,10

O Anuário Brasileiro das Indústrias brasileiras de biomassa e energias renováveis (2013), sugere um teor de carbono entre 15 à 25 %, por sua vez Lora (1997) sugere um teor de carbono de 17,82 %, mas sem se referir às idades das árvores em questão.

Brito e Barrichelo (1978) estudando oito espécies de eucalipto com idades entre quatro e cinco anos, constataram que a média do teor de carbono fixo ficou entre 9,6 à 16,7 %.

Além disso, Brito e Barrichelo (1978) também estudando o teor de materiais voláteis com oito espécies de eucalipto entre quatro e cinco anos de idade contataram uma média de 77,5 à 89,9 %.

Quanto maior for o teor de voláteis, mais rápido será a queima (PEREIRA *et al.*, 2000).

A porcentagem de cinzas ficou entre 0,48 e 0,85 %, Lora (1997) sugere uma porcentagem de 0,79 %.

Fengel; Wegener (1989) descreveram que, frequentemente valores em torno de 5 % de cinzas podem ser encontrados em madeiras tropicais.

Os resultados encontrados foram satisfatórios e de acordo com os citados na literatura.

5.4.2 Propriedades do material Torrado

A tabela 7 representa as médias obtidas nas análises do material torrado do *Eucalyptus urograndis*, nos parâmetros: Teor de Umidade (W), Materiais Voláteis (V), Teor de Cinzas (A) e Teor de Carbono Fixo (F).

TABELA 7: MÉDIA DA ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA DO TORRADO DOS HÍBRIDOS *E. urograndis*

Árvore	1	2	3	4	5	Média	Variância	CV (%)
Umidade (W) % b.u.	1,37	1,44	1,19	1,27	1,73	1,40	0,03	13,26
Carbono (F) % b.s.	53,96	51,37	54,57	53,93	50,16	52,80	2,95	3,26
Voláteis (V) % b.s.	45,49	48,25	45,04	44,66	49,33	46,55	3,52	4,03
Cinzas (A) % b.s.	0,56	0,37	0,39	1,42	0,51	0,65	0,15	60,24

Phanphanich e Mani (2011) estudando o processo de torrefação observaram que, alguns dos compostos voláteis altamente reativos são removidos na forma de vapores, resultando em uma biomassa sólida, escura com maior densidade energética.

Segundo Almeida (2010), o teor de cinzas de *E. grandis* e *E. saligna*, e suas cascas, o teor de cinzas é muito baixo sem a casca (0,3 % b.s.), mas muito maior na casca (>3,5 % b.s.).

Arias *et al.* (2008) estudando a torrefação de *Eucalyptos sp.* tratada à 280 °C por uma hora encontrou teores de 61,5 % de materiais voláteis e 34,8 % de carbono fixo.

A tabela 8 ilustra os dados do rendimento gravimétrico do processo de torrefação das amostras do *E. urograndis*.

TABELA 8: RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO DO MATERIAL TORRADO.

Árvore	Rendimento gravimétrico (%)
1	43,39
2	55,33
3	59,91
4	49,47
5	43,40
Média	50,30
Variância	42,74
CV (%)	13,00

A perda de massa do material devido à torrefação varia de acordo principalmente com o tipo de biomassa, temperatura, taxa de aquecimento e tempo de residência. A perda de massa se dá pela degradação dos componentes químicos da madeira, especialmente hemiceluloses, que são mais sensíveis à degradação térmica, e componentes voláteis (YLDIZ *et al.*, 2006).

5.4.3 Propriedades do carvão vegetal

A tabela 9 representa as médias obtidas nas análises do carvão do *Eucalyptus urograndis*, nos parâmetros: Teor de Umidade (W), Materiais Voláteis (V), Teor de Cinzas (A) e Teor de Carbono Fixo (F).

TABELA 9: MÉDIA DA ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA DO CARBONIZADO DOS CLONES DO *E. urograndis*.

Árvore	1	2	3	4	5	Média	Variância	CV (%)
Umidade (W) % b.u.	0,57	0,59	0,57	1,07	0,63	0,69	0,04	28,17
Carbono (F) % b.s.	81,44	78,05	81,50	79,96	79,95	80,18	0,02	1,57
Voláteis (V) % b.s.	15,39	20,70	18,21	19,62	18,82	18,55	3,19	9,63
Cinzas (A) % b.s.	3,17	1,25	0,29	0,41	1,23	1,27	1,06	81,16

Barreto *et al.* (2008) destacam que altos teores de umidade causam perda de poder calorífico, perdas de energia, baixa ignição, baixa durabilidade e menor tempo de estocagem, características totalmente indesejáveis.

O perfil de teor de umidade depende da origem e dos processos pelo qual a madeira foi submetida.

Trugilho *et al.* (2001), estudando *E. urograndis* com idade de 7 anos, e obteve valores para materiais voláteis em torno de 18,85% e 21,91%, em carbono fixo entre 77,58% e 81,59% e nos teores de cinzas 0,33% e 0,53%, valores estes próximos aos encontrados neste trabalho exceto, no teor de cinzas que apresentou níveis elevados quando comparados com os apresentados.

Santos (2008) estudando carvão para o uso siderúrgico sugeriu que o carvão deve apresentar até 25% de teor de materiais voláteis, já que maiores teores significam menores teores de carbono fixo, o que compromete a eficiência do carvão vegetal no alto-forno.

A presença de cinzas no carvão vegetal deve ser a mínima possível, uma maior concentração de cinzas no carvão vegetal resulta na redução de seu poder calorífico.

Arantes (2009), ao avaliar o teor de cinzas encontrou teores médios de 0,18% no carvão vegetal do *Eucalyptus urograndis* aos 6 anos de idade, e cita que árvores mais jovens demandam maior quantidade de minerais pois estão em uma fase onde o metabolismo é mais acelerado, justificando assim um maior teor de cinzas.

Garcia (2013), estudando *E. urograndis* observou que a porcentagem encontrada no teor de cinzas ficou entre 0,40% e 1,19%. Segundo Garcia (2013) os teores altos são encontrados porque os materiais analisados são compostos de casca e madeira.

Para Brito e Barrichello (1978), com relação aos teores de cinzas, casca sempre se mostrou com valores superiores à madeira.

A Tabela 10 traz os rendimentos gravimétricos encontrados na realização da carbonização.

TABELA 10: RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO DA CARBONIZAÇÃO

Árvore	Rendimento gravimétrico (%)
1	31,31
2	31,89
3	31,00
4	31,27
5	32,47
Média	31,59
Variância	0,28
CV (%)	1,67

Estudando clones de eucalipto aos sete anos de idade, Santos *et al.*, (2011), encontrou valores médios para o rendimento gravimétrico em carvão vegetal variando entre 28,27% e 30,21%, valores estes próximos à média encontradas nesse estudo.

Procura-se obter elevado rendimento gravimétrico em carvão vegetal durante os processos de carbonização, pelo simples fato de que conseqüentemente ocorrerá maior aproveitamento da madeira nos fornos de carbonização e a produção de energia será maior (NEVES *et al.*, 2011; PROTÁSIO *et al.*, 2011).

6 CONCLUSÃO

Obteve-se valores médios de CAP igual à 44,6 cm, DAP de 14,01 cm e de altura de 21,34 m, valores estes condizentes com a literatura. O valor encontrado quando se analisou a densidade básica também se enquadrou com o citado por diversos autores, a análise de lignina apresentou resultados que podem ser considerados satisfatórios comparando-os à literatura.

Os valores encontrados para o teor de carbono quando se analisou a madeira in natura do *E. urograndis*, ficaram dentro dos já citados na literatura quanto à outras árvores com a mesma idade, mas abaixo do recomendado pelo Anuário Brasileiro das Indústrias Brasileiras de Biomassa e Energias Renováveis, mas não deve ser descartada a precocidade desses híbridos, quando levado em conta os outros parâmetros são condizentes com o observado na literatura.

No estudo da torrefação a amostra 4 apresentou teores excessivos de cinzas quando comparados com a literatura, o que pode ter sido causado por contaminação da amostra ou efeito de casca mas, no geral ficou de acordo com a literatura que trata da torrefação de *Eucalyptos sp* e apresentou um rendimento gravimétrico de 50,30%.

No estudo da carbonização as características de teor de carbono, voláteis e umidade ficaram de acordo com o citado na literatura, entretanto o teor de cinzas exceto nas amostras 3 e 4, se mostrou maior do que o recomendado, isso pode ter sido causado por contaminação da amostra ou efeito de casca e apresentou um rendimento médio de 31,59 %.

No geral os resultados encontrados puderam ser considerados satisfatórios e os objetivos deste trabalho foram atingidos, entretanto o uso desses híbridos nessa idade necessita de mais estudos quando a sua viabilidade econômica.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF, Associação brasileira de produtores de florestas plantadas, **Anuário estatístico ABRAF 2013 – Ano Base 2012.**

ABRAF, Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário estatístico ABRAF 2012 - Ano base 2011.**

AGEITEC, Agência Embrapa de informação tecnológica, **Silvicultura**. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fmcbqchw02wyiv80kxlb36vbkge01.html>>. Acesso em 18/11/2014.

ANDRADE, E. N. **O Eucalipto**, Jundiaí, 2 ed., Cia. Paulista de Estradas de Ferro, p. 667 , 1961.

ARANTES, M. D. C. **Variação nas Características da Madeira e do Carvão de um Clone de Eucalyptus urograndis**, p. 149 Tese (doutorado) – Universidade federal de Lavras, Lavras, MG, 2009.

Arias, B., Pevida, C., Feroso, J., Plaza, M. G., Rubiera, F., and Pis, J. J. (2008). "Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass," Fuel Process. Technol. 89(2), 169-175.

ANTAL Jr., M. J.;MOK, W. S. L.; VARHETI, G e ZELEI, B. **Review of Methods for Improving the Yield of Charcoal of Biomass**. Energy & Fuels. 1990. V.4,American Chemical Society, p. 221-225.

ANTAL Jr., M. J.; CROISSET, E.; DAI, X.; ALMEIDA, C. de; MOK, W. S.; NOBERG, N. **High-Yield Biomass Charcoal** . Energy & Fuels. 1996. V.10. p. 652-658.

BARRETO, E. J. F. **Tecnologias de Energias Renováveis**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

BENITES, V. M.; TEIXEIRA, W. G. T.; REZENDE, M. E. R.; PIMENTA, A. S. P. **Utilização de Carvão e subprodutos da Carbonização vegetal na agricultura:**

Aprendendo com as Terras Pretas de Índio. Disponível em:
<www.biochar.org/joomla/images/stories/Cap_22_Vinicius.pdf>. Acesso em:
24/11/2014.

BENTEC, Sementes Insumos e Tecnologia, *Eucalypto urograndis*. Disponível em:
<http://www.bentecsementes.com.br/eucalypto-urograndis>. Acesso em: 11/12/2014.

BNDES e CGEE. **Bioetanol de Cana-De-Açúcar: Energia para o Desenvolvimento Sustentável.** Rio de Janeiro/R J. 2008. 316p

Bourgeois, J. –P **Torrefed Wood from temperate na tropical species, advantages and prospects**, Bioenergy 84, vol. III. Londres: Egneus & Ellegard, 1984, PP. 65 – 70.
BOURGOIS, JP. **Torrefied Wood from temperate and tropical species, advantages and prospects.** BIOENERGY 84, p153-159, 1985.

Bouteille, J. **Perfectionnements aux fours à torrifié Le bois.** FR patent 839732, abr., 1939.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E. G. **Características do Eucalypto como Combustível: Análise Química Imediata Da Madeira E Da Casca.** IPEF n.16, p.63-70, 1978.

CAMPOS, Ana Carolina Maioli. **Carvão de *Eucalyptus* : Efeito dos Parâmetros da Pirólise sobre a Madeira e seus Componentes Químicos e Predição da Qualidade pela Espectroscopia NIR.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Lavras, 2008. 118p.

COLLET, F - 1955 - Estudo comparativo, em escala de laboratório, de diversas madeiras utilizadas na fabricação de carvão vegetal - **Boletim da Associação Brasileira de Metais**, 42 (12): 5-14.

EMBRAPA, **O guia do eucalypto.** Disponível em:
<http://biblioembrapa.wordpress.com/2011/09/20/guia-do-eucalypto> acesso em:
18/11/2014.

Phanphanich, M; S. Mani. **Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass.** Bioresource Technology, 102: 1246-1253.

Fengel, D.; Wegener, G. **Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions**. Berlin: Walter de Gruyter, 1989. p 613.

FOREST PRODUCTS LABORATORY - 1961 - **Charcoal, Production Marketing and Use**. U.S. Department of Agriculture - Forest Service - 137p.

GARCIA, E.A. **Qualidade Energética Da Madeira De Eucalipto Em Função Do Espaçamento, Da Adubação E Da Idade Conduzida No Sistema Florestal De Curta Rotação**. Tese de Doutorado. BOTUCATU-SP, Nov./ 2013.

GÓMEZ, A.; KLOSE, W.; RINCÓN, S. **Pirólisis de Biomassa: Cuesco de Biomasa**. Departamento de Ingeniería Mecánica Y Mecatrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colômbia, Bogotá, Colômbia e Instituto de Ingeniería Térmica, Facultad de Ingeniería Mecânica. Universidad de Kassel. Kassel Alemanha. 2008. p.123.

GOMES, P.A. ; OLIVEIRA, J. B. **Teoria da carbonização da madeira. Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais/CETEC, 1982.

Ju Villar, J. B. **Tecnologia de transformação de Madeira em carvão**, in *Uso da Madeira para fins energéticos*. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, vol I; 1980, pp 67-82.

Luengo, C. A.; Emmerich, F. **Fabricação de Carvão Vegetal**. São Paulo: Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia, 1997, p 81.

Magalhães, J.G.R. Tecnologia de obtenção da madeira. *In Uso da madeira para fins energéticos*. Belo horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, CETEC, 2983, PP. 56 – 66.

MEIRA, Ana Maria. **Caracterização sócio-ambiental e tecnológica da produção de carvão vegetal no município de Pedra Bela, estado de São Paulo**. 2002.

NEVES, T. A.; PROTÁSIO T. de P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; VIEIRA, C. M. M. **Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal**. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319-330, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/104336/2011.pfb.31.68.319>>.

Acesso em: 28 novembro 2014.

NOGUEIRA, L. A. H., **Bioenergias e Sustentabilidade**. São Paulo, 2005.

NOGUEIRA, L. A. H., LORA, E. E. S. **Dendroenergia: Fundamentos e aplicações**. 2^a Ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003; p 199.

OPARINA, L. V. et alii - 1971 - **Sb. Tr. VNII GIDROLIZA Rast Mater** 19: 176-86.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. New York: McGraw Hill, Vol. I, Second edition, 643p., 1964.

PINHEIRO, A. L. Considerações sobre taxonomia, filogenia, ecologia, genética, melhoramento florestal e a fertilização mineral e seus reflexos na anatomia da madeira. **SIF**, Viçosa, MG, 144 p., 1999.

Richardson, J.; Bjorheden, R.; Hakkila, P.; Lowe, A. T.; Smith, C. T. **Bioenergy from Sustainable forestry**. Guiding principles and practice. *Forestry Sciences*, v. 17 Kluwer Academic Publishers, 2002 p 364.

ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, V. S.; ROTHMAN, H.; **Uso da Biomassa para a Produção de Energia na Indústria Brasileira**. Tradutores: José Dilcio Rocha e Maria Paula G. D. Rocha. Campinas, SP: Editora Unicamp, 2005.

SATANOKAS, S. - 1963 - **Hokkaido Daigaku, enshurin Hokoku**, 22(2): 609-814.
From: C.A.

SANTANA, W. M. S. **Crescimento, Produção e Propriedades da Madeira de um Clone de Eucalyptus grandis e E. urophylla com Enfoque Energético**. 91 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Área da Concentração em Processamento e Utilização da Madeira, Lavras, Minas Gerais, 2009.

SANTOS, I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica e contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado**. 57 f. Dissertação (Mestrado

em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília; Faculdade de Tecnologia; Departamento de Engenharia Florestal, Brasília, 2008.

SILVA, D. **Avaliação da eficiência energética em uma indústria de painéis compensados**. 182 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

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

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. DA; FRAZÃO F. J. L.; MATOS, J. L. M. DE; **COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA EM MADEIRA**. ACTA Amazônica, 20: 307-319, 1990.

Trugilho, F. P.; Lima, B.; Mendes, R. F.; Ribeiro, M. X.; Leite, E. R. S.; Protásio; T. P. **Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café**. Rev. bras. eng. agríc. ambient. vol.16 no.11 Campina Grande Nov. 2012.

TRUGILHO, F.P.; LIMA, J.T. MORI, A.F. LINO, A.L. **Avaliação De Clones De Eucalyptus Para Produção De Carvão Vegetal**. Cerne, V.7, N.2, P.104-114, 2001.

VELOSO, P. D.; MORAIS, S. A. L.; NASCIMENTO, E. A. **Isolamento e análise estrutural das ligninas**. Departamento de Química - UFUB e UFMG, Belo Horizonte, MG, 1992.

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

8 APÊNDICES

APÊNDICE 1 ÁRVORES TRATAMENTO H13.

ÁRVORE	CAP (cm)	ALTURA (m)	DAP	ÁRVORE	CAP (m)	ALTURA (m)	DAP	ÁRVORE	CAP (m)	ALTURA (m)	DAP	CAP médio (cm)	ALTURA MÉDIA (m)	DAP MÉDIO
1	44	20,6	14,01	12	47	20,8	14,96	23	44	22,5	14,01	45,52	21,08	14,49
2	52	24,8	16,55	13	38	21	12,10	24	47	21,8	14,96			
3	52	24,2	16,55	14	47	22,3	14,96	25	43	22,9	13,69			
4	44	21,4	14,01	15	47	22	14,96	26	57	20,6	18,14			
5	34	17	10,82	16	60	23	19,10	27	43	20,5	13,69			
6	36	19	11,46	17	50	24	15,92	28	25	13,8	7,96			
7	46	20	14,64	18	49	24	15,60	29	58	23,7	18,46			
8	62	21,3	19,74	19	59	23,4	18,78	30	29	16,5	9,23			
9	42	20,2	13,37	20	39	21	12,41	31	62	23	19,74			
10	36	18,8	11,14	21	45	22,2	14,32	32	23	14	7,32			
11	50	22,9	15,92	22	42	20,3	13,37	33	51	22	16,23			