



UnB

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS
TECNOLOGIA E UTILIZAÇÃO DOS PRODUTOS FLORESTAIS

**POTENCIAL ENERGÉTICO DA ESPÉCIE *Arundo donax* L. (CANA-DO-REINO)
DE OCORRÊNCIA NATURAL NO DISTRITO FEDERAL – DF**

GIORDANO BRUNO DA SILVA OLIVEIRA

ORIENTADOR

DR. AILTON TEIXEIRA DO VALE

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

BRASÍLIA, DISTRITO FEDERAL

2014

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

POTENCIAL ENERGÉTICO DA ESPÉCIE *Arundo donax* (CANA DO REINO)
DE OCORRÊNCIA NATURAL NO DISTRITO FEDERAL


GIORDANO BRUNO DA SILVA OLIVEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL, DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

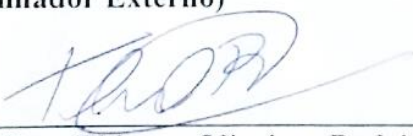
APROVADA POR:



Prof^o Dr. Ailton Teixeira do Vale (Departamento de Engenharia Florestal, UnB);
(Orientador)



Prof^a Dra. Claudene Menezes Atayde Calderon (Universidade Federal do Acre,
UFAC);
(Examinador Externo)



Prof^o Dr. Thiago Oliveira Rodrigues (Fundação de Tecnologia Florestal e
Geoprocessamento, FUNTEC);
(Examinador Externo)

Prof^o Dr. Joaquim Carlos Gonzalez (Departamento de Engenharia Florestal,
UnB);
(Examinador Suplente)

Brasília-DF, 27 de março de 2014.

Oliveira, Giordano Bruno da Silva.
O48p Potencial energético da espécie *Arundo donax* L.
(cana-do-reino) de ocorrência natural no Distrito
Federal - DF / Giordano Bruno da Silva Oliveira. -- 2014.
xi, 48 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) - Universidade de Brasília,
Faculdade de Tecnologia, Departamento de Pós-Graduação
em Ciências Florestais, Tecnologia e Utilização dos
Produtos Florestais, 2014.

Inclui bibliografia.

Orientação: Ailton Teixeira do Vale.

1. Álcool. 2. Cana-de-açúcar. 3. Energia da biomassa.
I. Vale, Ailton Teixeira do. II. Título.

CDU 661.722

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

OLIVEIRA, G. B. da S. (2014). Potencial Energético da espécie *Arundo donax* L. (cana-do-reino) de ocorrência natural no Distrito Federal – DF. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL. DM-235/2014, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 59 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Giordano Bruno da Silva Oliveira

TÍTULO: Potencial Energético da espécie *Arundo donax* L. (cana-do-reino) de ocorrência natural no Distrito Federal – DF.

GRAU: Mestre ANO: 2014

É concedida à Universidade de Brasília – UnB permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias, com o propósito exclusivamente acadêmico e/ou científico. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Giordano Bruno da Silva Oliveira
giordano.silva@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus. Tu és minha fortaleza e confiança para cada dia de vida. Te agradeço imensamente!

A toda minha família maravilhosa, em especial, minha mãe querida Angela Maria Araújo da Silva, minha vizinha Obetiza Araújo da Silva e minha irmãzinha Glenda Raíssa da Silva Tavares, que sempre me apoiaram e apoiam em todos os momentos de minha vida. Me ensinando a superar todos os obstáculos e a caminhar firme por todas as estradas da vida. Amo vocês!

A minha noiva Maria Cristiana de Freitas da Costa, pelo amor, amizade e companheirismo em todos os momentos. Sem você não estaria aqui. Foi seu incentivo que fez eu chegar até aqui. Foi difícil, sem você ao meu lado. Amo-te!

A minha prima Verinha e sua linda família, que tenho um carinho enorme por toda ajuda e apoio. Agradeço muito!

Ao meu orientador Professor Doutor Ailton Teixeira do Vale. Por me acolher e confiar em mim. Pelos conselhos, forças, ensinamentos e paciência. Aprendi muito com o senhor. Muito Obrigado!

Aos funcionários, professores e colegas do Departamento de Engenharia Florestal do Programa de Pós-Graduação, que fizeram parte diretamente e indiretamente desta caminhada. Em especial: ao professor Dr. Ildeu, a professora Dra. Alba, Ronaldo, Fabrício, Carlos, Kenya, Chiquinho, Pedro, e aos colegas que não lembrei neste momento, mas sei que agradeço profundamente!

Aos amigos Ms. Vandui e Itamar pela ajuda grandiosa na coleta do material de estudo. Agradeço muito!

Aos amigos de longa data, Giuseppe, Adson, Joaquim, Herbth, Valter, Maiane. Que mesmo distantes me apoiaram. Muito Obrigado!

Aos amigos Mohammad (Ashkan), Amir, Roger, Rafael, Jefferson, Eduardo, Angela, Pedrão, Derli, Fabiana e Ludovico. Obrigado pelos conselhos e pela força!

Ao Laboratório de Produtos Florestais – LPF. Pela força e apoio. Em especial ao Bruno, Thiago e Lucélia. Muito Obrigado a todos!

RESUMO

POTENCIAL ENERGÉTICO DA ESPÉCIE *Arundo donax* L. (CANA-DO-REINO) DE OCORRÊNCIA NATURAL NO DISTRITO FEDERAL – DF

Autor: Giordano Bruno da Silva Oliveira
Orientador: Ailton Teixeira do Vale
Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais
Brasília, mês de Março de 2014

No mundo há poucas tecnologias capazes de oferecer características de rendimento energético eficiente. Neste cenário, buscar novas fontes de energia, para complementar o setor energético, se torna bastante importante, pois os combustíveis fósseis possuem um ciclo fechado e estoque limitado. Assim, surgem as culturas energéticas que visam produzir biomassa como fonte produtora de energia sólida ou líquida. No Brasil, estas culturas, se baseiam no uso de eucalipto e capim elefante, porém, há outras fontes alternativas de biomassa eficientes. Entre elas, há a espécie *Arundo donax* L., com alta capacidade adaptativa para os diversos ambientes, alto índice de produção, alta eficiência energética, baixo custo de produção e exploração. Neste sentido, foi feito um estudo sobre o potencial energético da *Arundo donax* L., proveniente de ocorrência natural no Distrito Federal – DF, verificando seu potencial como fonte geradora de energia. Os colmos foram coletados no Distrito Federal, totalizando 753 indivíduos em 30 m² de área amostral. Os resultados mostraram altura média de 3,86 m com diâmetro de 2,03 cm, biomassa verde de 12,75 kg/m², com 6,64 kg/m² de massa seca. A variável altura apresentou alta correlação com a massa seca e por isso foi escolhida para dividir os colmos em quatro classes e três posições axiais, para estudo das características energéticas do material. Os resultados mostram que para a posição axial da base e classe de altura quatro (maior altura) dos colmos os teores de carbono fixo e o poder calorífico foram maiores. Mas com a densidade básica ocorre o contrário, ou seja, maiores valores para as posições de topo e a classe um (menor altura). Devido ao comportamento da densidade, as maiores densidades energéticas foram encontradas na posição axial de topo e nas classes de menor altura, um e dois.

Palavras-chave: cana-do-reino, bioenergia, *Arundo donax*, densidade energética

ABSTRACT

ENERGY POTENTIAL SPECIES *Arundo donax* L. (CANA-DO-REINO) NATURAL OCCURRENCE IN THE DISTRITO FEDERAL – DF

Author: Giordano Bruno da Silva Oliveira
Supervisor: Ailton Teixeira do Vale
Postgraduate Programme in Forest Sciences
Brasília, month of March (2014)

In the world, there are few technologies that can provide characteristics of efficient energy performance. In this scenario, seek for new sources of energy to supplement the energy sector, becomes quite important because fossil fuels have limited stock and a closed cycle. Thus, energy crops aimed at producing biomass as a source of producing solid or liquid energy arise. In Brazil, these cultures, are based on the use of eucalyptus and elephant grass; however, there are other effective alternative sources of biomass. Among them are the *Arundo donax* L. species with high adaptive capacity to different environments, high production rate, high-energy efficiency, low cost of production and operation. In this respect, a study on the energy potential of *Arundo donax* L. from naturally occurring in the Distrito Federal, checking its potential as power source was made. The stems were collected in the Distrito Federal, totaling 753 individuals in 30 m² sampling area. The results showed an average height of 3.86 m with a diameter of 2.03 cm, green biomass of 12.75 kg/m², with 6.64 kg/m² of dry mass. The variable height was highly correlated with dry mass and was therefore chosen to split the stems into four classes and three axial positions, to study the material energy characteristics. The results show that the axial position base and the height four class (maximum height) of the stems, the fixed carbon content and calorific value were higher. However, with the basic density occurs the opposite, ie, higher values for the top positions and class one (lower height). Due to the behavior of the density, the higher energy densities were found in the axial position of the top and classes of smaller size, one and two.

Keywords: giant reed, bioenergy, *Arundo donax*, energy density.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE TABELAS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	X
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 CONCEITOS DE BIOMASSA.....	3
2.2 BIOMASSA COMO ENERGIA RENOVÁVEL	3
2.3 CENÁRIO DA BIOMASSA NO BRASIL	4
2.4 CARACTERIZAÇÃO DA CANA-DO-REINO (<i>ARUNDO DONAX L.</i>).....	5
2.6 DENSIDADE BÁSICA	7
2.7 ANÁLISE IMEDIATA	7
2.7.1 <i>Teor de Materiais Voláteis</i>	7
2.7.2 <i>Teor de Cinzas</i>	8
2.7.3 <i>Teor de Carbono Fixo</i>	8
2.8 PODER CALORÍFICO.....	9
2.8.1 <i>Poder Calorífico Superior (PCS)</i>	9
2.8.2 <i>Poder Calorífico Inferior (PCI)</i>	9
2.8.3 <i>Poder Calorífico Útil (PCU)</i>	9
3 METODOLOGIA	10
3.1 ÁREA DE ESTUDO E COLETA DO MATERIAL.....	10
3.2 ENSAIOS REALIZADOS EM TODOS OS COLMOS.....	12
3.2.1 <i>Teor de umidade atual</i>	12
3.2.2 <i>Teor de Umidade Máxima</i>	13
3.2.3 <i>Densidade básica</i>	14
3.2.4 <i>Densidade energética</i>	14
3.3. ANÁLISES REALIZADAS POR TRATAMENTO.....	15
3.3.1. <i>Análise imediata</i>	16
3.3.1.1 <i>Teor de materiais voláteis (MV)</i>	16
3.3.1.2 <i>Teor de cinzas (CZ)</i>	16
3.3.1.3 <i>Teor de carbono fixo (CF)</i>	17
3.3.2 <i>Poder calorífico superior (PCS)</i>	17

3.4 PROCEDIMENTO DE ANÁLISE PARA DETERMINAR A DENSIDADE ENERGÉTICA ...	18
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	19
4.1 ANÁLISE IMEDIATA	23
4.1.1 Teor de Materiais Voláteis (MV)	23
4.1.2 Teor de Cinzas	26
4.1.3 Teor de Carbono Fixo	28
4.2 PODER CALORÍFICO SUPERIOR	30
4.3 DENSIDADE BÁSICA	32
4.4 DENSIDADE ENERGÉTICA	34
4.5 PODER CALORÍFICO ÚTIL (PCU)	36
5 CONSIDERAÇÕES	38
6 CONCLUSÃO	40
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Média e desvio padrão das variáveis massa seca, altura, diâmetro, umidade atual, umidade máxima e densidade básica.....	19
Tabela 2. Número de indivíduos e massa seca por classe de altura.	21
Tabela 3. Análise de Variância (ANOVA) do teor de materiais voláteis com interação entre dois fatores inteiramente casualizado (classe e posição).	24
Tabela 4. Teste de Tukey para teor de materiais voláteis.	24
Tabela 5. Interação das médias Classe x Posição Axial (C x P) dos matérias voláteis (%).	25
Tabela 6. Análise de Variância (ANOVA) do teor de cinzas com interação entre dois fatores inteiramente casualizado (classe e posição axial).	26
Tabela 7. Médias do teor de cinzas das classes e posições.	27
Tabela 8. Análise de Variância (ANOVA) do teor de carbono fixo com interação entre dois fatores inteiramente casualizado (classe e posição axial).	29
Tabela 9.. Médias do teor de carbono fixo das classes e posições.	29
Tabela 10 Análise de Variância (ANOVA) do poder calorífico superior com interação entre dois fatores inteiramente casualizado (classe e posição axial).	31
Tabela 11. Médias do poder calorífico superior (kJ/kg) das classes e posições	31
Tabela 12. Análise de Variância (ANOVA) da densidade básica com interação entre dois fatores inteiramente casualizado (classe e posição axial).	32
Tabela 13. Médias da densidade básica (kg/m ³) das classes e posições	33
Tabela 14. Análise de Variância (ANOVA) da densidade energética com interação entre dois fatores inteiramente casualizado (classe e posição axial).	34
Tabela 15. Médias da densidade energética (MJ/m ³) das classes e posições.	35
Tabela 16. Análise de Variância (ANOVA) do poder calorífico útil com interação entre dois fatores inteiramente casualizado (classe e posição axial).	37
Tabela 17. Médias do poder calorífico útil (kJ/kg) das classes e posições.	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ocorrência de <i>Arundo donax</i> no Distrito Federal, Brasil.	5
Figura 2. Pontos amostrais no Distrito Federal, (Google Earth, 2013).	10
Figura 3. Perímetro e pontos amostrais (Google Earth, 2013).	11
Figura 4. Na seção superior, da esquerda para direita: feixes dos indivíduos coletados separados por unidades amostrais e mensuração da altura de cada colmo. Na seção inferior, da esquerda para direita: pesagem e mensuração do diâmetro de cada colmo.	11
Figura 5. Imagem acima seção de corte: base, meio e topo. Imagem abaixo: Corte axial em cada disco de colmo.	12
Figura 6. Da esquerda para direita: pesagem da unidade atual após o abate e amostras postas em estufa a 103 ± 2 °C.	13
Figura 7. Da esquerda para direita: amostras postas em sacos de plástico e submersas em água até atingir saturação constante.	14
Figura 8. Processo de preparação das amostras para realização da análise imediata. Superior esquerda: palitagem dos colmos. Inferior esquerda: peneira abaixo de 60 mesh. Meio: moedor de biomassa. Superior direita: material classificado abaixo de 60 mesh. Inferior direita: material posto em estufa.	15
Figura 9. Relação massa seca (kg) por altura (m).	20
Figura 10. Relação massa seca (kg) por diâmetro (cm).	21
Figura 11. Relação do número de colmos por classe de altura.	22
Figura 12. Relação da produção de massa seca (kg) e massa verde (kg) por classe de altura (m).	23
Figura 13. Interação das médias do teor de materiais voláteis (%) em função da classe de altura e posição axial dos colmos.	26
Figura 14. Relação das médias dos teores de cinzas (%) em função da classe e altura.	28
Figura 15. Interação das médias dos teores de carbono fixo (%) em função da classe e altura.	30
Figura 16. Interação entre as médias do PCS em função da classe de altura e posição axial.	32
Figura 17. Relações da densidade básica (g/cm^3) em função das classe de altura e posição axial.	34

Figura 18. Interação entre as médias densidade energética (cal/cm ³) em função das classe de altura e posição axial.....	36
Figura 19. Relação entre as médias do PCU em função das classes de altura e posição axial.....	38

1 INTRODUÇÃO

Desde o século XXI, a busca por energias alternativas tem sido palco de muitos desafios. A complexidade desta busca está em criar métodos agregados a fontes de matérias-primas, que sejam economicamente viáveis para a produção de energia renovável capazes de superar o rendimento, a simplicidade operacional e a versatilidade do uso dos combustíveis fósseis.

Atualmente, a sociedade mundial encontra-se diante de crises energéticas em virtude dos processos cada vez mais acelerados da industrialização. Neste sentido, encontrar novas fontes de energia verde para o setor energético, por meio da utilização de biomassa, diminuirá a dependência dos combustíveis fósseis, a emissão de gases do efeito estufa e novas e diferentes fontes geradoras de energia limpa poderão ser agregadas à matriz energética brasileira.

No Brasil, a produção de biomassa para geração de energia verde provém, em sua maioria, de dois tipos de cultivos: as florestas energéticas, a partir de espécies de rápido crescimento como o eucalipto e gramíneas semi-perenes como a cana-de-açúcar e o capim-elefante que possuem alta eficiência de fixação do carbono atmosférico (EMBRAPA, 2012).

As culturas energéticas visam produzir biomassa para uso como fonte de energia, seja sólido ou líquido. As características ideais para este tipo de povoamento são indivíduos que apresentam elevados teores de lignina e celulose. As gramíneas passaram a ter atenção no setor energético na década de 80, principalmente na Europa e Estados Unidos, devido ao seu alto rendimento de produção, baixo impacto no ambiente e composição lignocelulósica ideais para produção de combustível sólido (VAZ JUNIOR, 2011).

Na Europa e Estados Unidos a gramínea (*Arundo donax* L.) vem sendo estudada como cultura energética, pois apresenta elevado potencial produtivo e características físico-químicas adequadas a produção de biomassa energética (EMBRAPA, 2012). Na Itália está sendo utilizada na maior usina de etanol celulósico do mundo para produção de etanol de segunda geração (PALHARES, 2013).

Esta espécie, nativa da região mediterrânea (STARR et al., 2003), pode alcançar de 2 a 6 metros de altura, com rendimento de biomassa seca expressivo a partir do 3 ano de produção (VASCONCELOS; GOMES, 2007).

Em experimentos realizados na cidade de Pelotas, no Rio Grande do Sul, Vasconcelos et al. (2007) destacaram que, a cultura da cana-do-reino se adapta bem em regiões de clima tropical, subtropical e temperado e apresenta alto potencial produtivo de biocombustível sólido, podendo ser utilizada na geração de calor em processos térmicos.

Em virtude do exposto e do atual contexto energético mundial, desenvolver novas pesquisas que visem a obtenção de novas fontes energéticas renováveis se torna cada vez mais necessário, principalmente para a matriz energética brasileira, que tem participação de 42,4% de recursos renováveis, constituídos de energia hidráulica, produtos da cana de açúcar e biomassa (BEN, 2013).

A espécie *Arundo donax* é pouco conhecida no Brasil como uma cultura de potencial energético, onde carecem pesquisas nesta área. Assim, este trabalho tem como objetivo principal a análise do potencial energético da espécie *Arundo donax* L. (cana-do-reino) e como objetivos secundários a determinação da produção de biomassa e a caracterização energética, quanto ao teor de umidade, teor de material volátil, teor de cinza e teor de carbono fixo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CONCEITOS DE BIOMASSA

De acordo com Bubu (2004), biomassa é um termo pouco conhecido fora dos campos da energia e ecologia, mas pode ser definida como a matéria orgânica de origem animal ou vegetal ou, segundo CENBIO (2012), todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica. Sendo que esta matéria orgânica pode ser viva ou morta e representa a densidade de biomassa vegetal por unidade de área (GTOS, 2009).

Bracmort (2012) define biomassa como a matéria orgânica que pode ser convertida em energia. E esta biomassa energética é toda matéria orgânica capaz de ser queimada, decomposta ou reciclada e gerar energia direta ou indiretamente (LANDIM et al., 2007). Uma característica da biomassa é a diversidade de produtos biocombustíveis (sólidos, líquidos e gasosos) que podem produzir energia térmica e/ou elétrica (SANTOS, 2009).

A produção de biomassa vegetal ocorre através do processo de fotossíntese, com a conversão do dióxido de carbono e da água em forma de combustível orgânico (CENBIO, 2012), podendo, assim, ser utilizado para diversos fins energéticos.

Bubu (2004) estima que há dois trilhões de toneladas de biomassa no globo terrestre, e que em termos energéticos, corresponde a oito vezes o consumo anual mundial de energia primária. Porém só uma parte do potencial energético da biomassa é utilizado para atender as necessidades humanas (SALOMOM e FILHO, 2007).

2.2 BIOMASSA COMO ENERGIA RENOVÁVEL

A energia de biomassa ou bioenergia é a conversão de biomassa em formas úteis de energia como: calor e eletricidade (HERZOG et al., 2001). Para Nogueira e Lora (2003), os recursos energéticos podem ser classificados em três grupos principais de acordo com a origem da matéria orgânica: biocombustíveis da madeira

(dendrocombustíveis), biocombustíveis não florestais (agrocombustíveis) e resíduos urbanos (sólidos e líquidos gerados em cidades e vilas).

A dendroenergia é o termo que associa a biomassa energética lignocelulósica e seus derivados, relacionados com a produção florestal, o pré-tratamento dos recursos florestais e sua conversão e utilização em diversas formas de energia (SALOMOM e FILHO, 2007).

Trossero (2008) afirma que a dendroenergia é a principal fonte de energia para mais de dois bilhões de pessoas, principalmente nos países em desenvolvimento. A lenha e o carvão estão entre os biocombustíveis mais utilizados no planeta. No Brasil o consumo de lenha em 2012 foi da ordem 25.735.000tep de um total de 256.299.000tep de energia consumida, ou seja, 10,04% (BEN, 2013).

A International Energy Agency – IEA (2012), estima que a biomassa representa cerca de 10% de todo o consumo mundial de energia primária. As perspectivas indicam que o uso de biomassa tende a se estabilizar ou até aumentar por duas razões: crescimento populacional e urbanização e melhorias nos padrões de vida (HALL et al., 2000).

A utilização deste recurso como fonte de energia pode reduzir o impacto ambiental da queima de combustíveis fósseis para produção de energia e diminuir o aquecimento global (MCKENDRY, 2002), além de apresentar alta densidade energética. O Brasil é um exemplo de aplicação deste sistema de bioenergia, haja vista o elevado percentual desta na matriz energética e o aumento de pesquisas e tecnologias desenvolvidas nesta área.

2.3 CENÁRIO DA BIOMASSA NO BRASIL

Maciel (2013) afirma que o Brasil é o país que mais utiliza a biomassa para produção de energia, com 16% do uso mundial do setor, onde 21% da energia utilizada no setor industrial é obtida a partir da cana-de-açúcar e 7% de outras fontes primárias renováveis.

A matriz energética brasileira, em sua grande maioria, é decorrente de energia renovável, onde 85% da energia elétrica gerada no país é originária de fontes renováveis, destes, 6,8% provém de biomassa. A oferta interna de energia renovável no Brasil em 2012 foi de 42,4%, com 24,5% derivada de bioenergia,

sendo o setor industrial o de maior consumo energético apresentando 54,1% (BEN, 2013).

O país apresenta um grande potencial para aumentar esta participação, pois encontra-se em situação privilegiada no que se refere a disponibilidade de fontes primárias de oferta de energia (SILVA e ROCHA, 2010), com excelentes condições para produção e uso energético da biomassa em larga escala (ANEEL, 2005).

2.4 CARACTERIZAÇÃO DA CANA-DO-REINO (*Arundo donax* L.)

Arundo donax L. (figura 1) é conhecida por vários nomes comuns, tais como cana-do-reino no Brasil; “giant reed” que significa cana gigante, na Europa e Estados Unidos.



Figura 1. Ocorrência de *Arundo donax* no Distrito Federal, Brasil.

O *Arundo donax* tem origem na região do mediterrâneo, mas algumas fontes associam sua origem com a Índia e o leste da Ásia. Os primeiros relatos de uso da espécie são datados de 5.000 a.C. onde suas folhas eram usadas, pelos egípcios, para armazenar grãos no subsolo. No século IV, a espécie era usada para fins medicinais (OAKINS, 2001).

Starret al. (2003) caracterizam *Arundo donax* como sendo uma gramínea perene de grande porte do tipo C3, pertencente a família Poaceae, podendo alcançar até 8 metros de altura, com colmos eretos ou abrangentes não ramificados ou ramificados, rizomas escamosos, nós glabros, geralmente escondidos, entrenós

ocos com diâmetro de 2 a 4 centímetros. Suas folhas possuem de 30 a 100 centímetros de comprimento e 2 a 7 centímetros de largura, com fecho na haste, suas flores são no formato de panículas (penas verticais) com comprimento de 30 a 60 centímetros e largura de 30 centímetros (CSURHES, 2009). Sua reprodução ocorre vegetativamente com taxas de crescimento elevadas e seus ramos são altamente inflamáveis (MARCHANTE e MARCHANTE, 2005). De acordo com Vasconcelos e Gomes (2007), sua propagação pode ser feita via assexuada com estacas de rizoma, apresentando 100% de brotações.

Segundo Coelho (2005), é uma planta de fácil adaptabilidade a diferentes condições ecológicas, elevada produtividade de biomassa e capacidade de cultura intensiva. Vasconcelos et al. (2007) e Phytos (2013) afirmam, que em condições ideais pode render até 100t/ha de matéria verde. Os rendimentos de biomassa seca se mostram satisfatórios no terceiro ano, equivalendo até 11,6t/ha (VASCONCELOS et al., 2007). Porém, Brás et al. (2013) afirmam que o rendimento em matéria seca pode chegar a 20 toneladas por hectare, dependendo do tipo de solo. Na Grécia, Mavrogianopoulos et al. (2001), alcançaram rendimentos de 120 a 230 t/ha de massa seca por ano. Lewandowski et al. (2003), encontraram média de 26 t/ha de matéria seca em cultivos de 10 anos de *Arundo donax* na Grécia. Afirmou ainda que sua produção tende a ter um maior rendimento a partir do 3º ano de implantação obtendo 30 t/ha de massa seca. Angelini et al. (2009), avaliando uma cultura de 12 anos de *Arundo donax* na Itália, chegaram a alcançar rendimento médio anual de massa seca de 43,5 t/ha entre o terceiro e oitavo ano de produção. A produção de bambu pode chegar a 78,3 t/ha peso verde e 47,4 t/ha para peso seco em ambiente controlado (FERREIRA, 2007).

A cana-do-reino tem uma aplicabilidade vasta podendo ser utilizada na fabricação de papel, instrumentos musicais (ZANETTI, 2007; COELHO, 2005), quebra-vento, controle de erosão, recuperação de solo salino, jardim ornamental, tratamento de águas residuais, forrageira e como biocombustível (CSURHES, 2009).

Estudos constatam que o poder calorífico da matéria seca de *Arundo donax* L. corresponde a 3.600 kcal/kg, com 45% de holocelulose e 25% de lignina (BASSAM, 1998). Jeguirim et al. (2010), encontraram 17,2 MJ/kg que equivale à 4.111 kcal/kg de poder calorífico superior, com teor de cinzas de 5%, material volátil de 68,4% e carbono fixo apresentando 18,4%, a porcentagem de carbono elementar encontrada

foi de 42,7%, o que demonstra um bom potencial para uso desta espécie no setor energético brasileiro.

Na literatura internacional existem poucos trabalhos de caracterização físico energética da cana-do-reino. No Brasil não foram encontrados trabalhos referentes. A caracterização realiza-se através de análise imediata, determinando os teores de carbono fixo, material volátil e cinzas; o poder calorífico superior e inferior; a umidade máxima; densidade aparente; sólida; a densidade aparente do granel (ou feixe) e a densidade energética.

2.5 TEOR DE UMIDADE

O teor de umidade tem relação inversa com o poder calorífico, portanto a retirada da água da biomassa para uso energético é muito importante. O teor de umidade é definido como a massa de água contida na biomassa e pode ser expressa tanto na base úmida quanto na base seca (RENDEIRO et al., 2008).

2.6 DENSIDADE BÁSICA

Vieira (2012) declara que a densidade é uma das principais características da biomassa, pois ela define o transporte e armazenamento. A densidade aparente está relacionada com várias características físicas e anatômicas da madeira (MARQUES et al., 2012). Brito et al., (1982) afirmam que a densidade é um dos parâmetros mais importantes em termos da determinação da qualidade da madeira e uso industrial.

Lima (2010), afirma que a densidade básica da madeira varia conforme a idade, ou seja, quanto mais velho for o indivíduo maior será sua densidade. A densidade básica é um dos principais índices de qualidade da madeira (COUTO et al., 2013)

2.7 ANÁLISE IMEDIATA

2.7.1 Teor de Materiais Voláteis

Os materiais voláteis estão relacionados com o comportamento do combustível na decomposição térmica, pois determina a facilidade com que a

biomassa queima (CARASCHI et al., 2012). Cardoso (2010) os define como substâncias que se desprendem da madeira como gás. Estas substâncias são elementos químicos como carbono, hidrogênio e oxigênio (ASSIS, 2008), que estão presentes nas hemicelulosesas quais contribuem diretamente para a queima da madeira, liberando os materiais voláteis que formam a chama do processo de combustão (CASTRO, 2011). O teor de materiais voláteis pode contribuir para a baixa eficiência energética durante a queima da biomassa (CHAVES et al., 2013).

2.7.2 Teor de Cinzas

Teor de cinzas é o resultado dos resíduos restantes da combustão completa dos componentes orgânicos. As cinzas são substâncias inorgânicas que não entram em combustão e podem ser constituídas de silício (Si), potássio (K), sódio (Na), enxofre (S), cálcio (Ca), fósforo (P), magnésio (Mg) e ferro (Fe) (KLAUTAU, 2008).

Se houver cinzas em alta concentração o poder calorífico pode diminuir e causar perda de energia e sua presença afeta também a transferência de calor, o que pode interferir na logística operacional (MOERS et al., 2010).

2.7.3 Teor de Carbono Fixo

O teor de carbono fixo pode ser definido como a quantidade de carbono presente na biomassa (MOERS et al., 2011), excetuando o carbono nos materiais voláteis. É a massa remanescente após a liberação dos voláteis (SANTOS, 2009). A lignina é o principal componente químico responsável pela presença de carbono fixo, que contribui para a liberação de energia durante o processo de queima direta (CASTRO, 2011). Segundo Assis (2008), o carbono fixo depende da carbonização e do teor de lignina na madeira, o qual está relacionado diretamente com o tempo de combustão. Chaves et al. (2013), afirmam que carbono fixo tem uma relação direta com o poder calorífico, ou seja, quanto maior o teor de carbono fixo maior o conteúdo energético.

2.8 PODER CALORÍFICO

Jara (1989) define poder calorífico como a quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa. Ou seja, é o parâmetro responsável por quantificar o valor energético de determinada biomassa. Silva (2012), enfatiza que é a quantidade de energia térmica liberada na combustão completa de 1kg de biomassa. O poder calorífico é subdividido em superior, inferior e útil.

2.8.1 Poder Calorífico Superior (PCS)

O poder calorífico superior (PCS) desconsidera as perdas de energia com a evaporação da água presente no combustível (DEZAJACOMO, 2010). Isto é, ele quantifica a quantidade de calor liberada pela queima de modo que a água proveniente da queima esteja em estado líquido (SILVA, 2012).

2.8.2 Poder Calorífico Inferior (PCI)

Garcia (2010), define poder calorífico inferior (PCI) como o valor obtido após ser descontada a energia consumida para evaporar a água formada durante o processo de combustão. Santos (2009), afirma que, o mesmo, representa a energia disponível por quilograma (kg) de biomassa, que se obtém pela subtração do PCS, o calor latente do vapor de água contido.

2.8.3 Poder Calorífico Útil (PCU)

O poder calorífico útil (PCU) é a quantidade de calor liberado pela queima, com a água em seu estado gasoso, sendo descontada a energia necessária para evaporar a água referente à umidade da madeira (LIMA, 2010). A relação poder calorífico com a umidade é inversamente proporcional, ou seja, quanto maior a umidade menor será a energia aproveitada durante a queima (LIMA et al., 2008).

3 METODOLOGIA

3.1 ÁREA DE ESTUDO E COLETA DO MATERIAL

O estudo foi realizado no Distrito Federal – DF situado no Brasil Central, entre os estados de Goiás e Minas Gerais. Possui uma área total de 5.814 km², onde encontra-se o bioma Cerrado, com níveis de endemismos em torno de 40% das espécies arbóreas restritas ao bioma. Possui um clima seco, com precipitação anual de 1.600 mm, que concentra-se nos meses de outubro a maio. A maior parte do distrito é ocupada por áreas urbanas e agrícolas. Apresenta relevos acentuado e suave, com solos pedregosos e rasos (CAVALCANTI e SILVA, 2011).

Para obtenção dos dados, efetivou-se em todo o Distrito Federal um levantamento das áreas de ocorrência da espécie *Arundo donax* L. (figura 2). Foram encontrados diversos pontos de distribuição. Entre estes pontos foi escolhida uma área de 53,6 ha para coleta de dados, situada próxima a estação do metrô Asa Sul, nas coordenadas geográficas centrais 15°84'S e 47°93'W. Esta área, foi escolhida pois apresentava uma grande incidência de indivíduos no local. Assemelha-se a um depósito de terra, com solo diversificado, talvez seja proveniente de terra removida de canteiros de obras.



Figura 2. Pontos amostrais no Distrito Federal, (Google Earth, 2013).

Foram escolhidos e mapeados com auxílio do GPS aleatoriamente 30 parcelas amostrais medindo de 10 a 20 metros quadrados (figura 3). A 1 metro da borda de cada parcela foi feito um corte raso de 1 metro quadrado com facão.

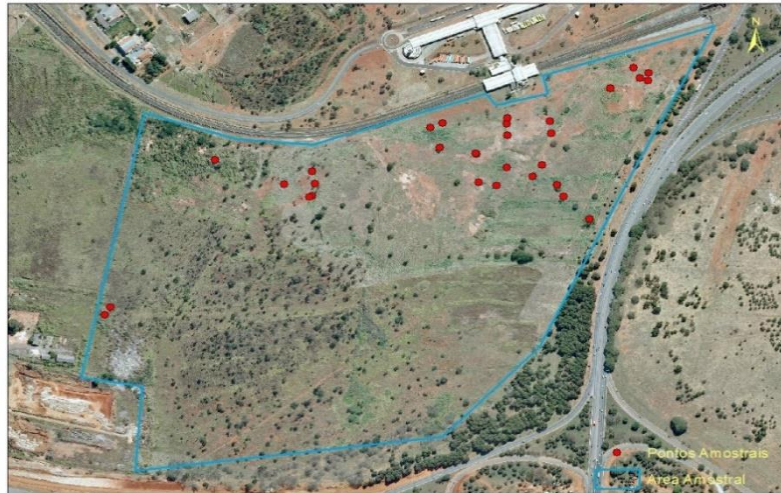


Figura 3. Perímetro e pontos amostrais (Google Earth, 2013).

Cada colmo, após mensurado a altura e o diâmetro, foi pesado e identificado com numeração sequencial referente ao seu ponto amostral (figura 4).



Figura 4. Na seção superior, da esquerda para direita: feixes dos indivíduos coletados separados por unidades amostrais e mensuração da altura de cada colmo. Na seção inferior, da esquerda para direita: pesagem e mensuração do diâmetro de cada colmo.

Foram retirados três discos de cada colmo com aproximadamente 3 cm de comprimento, considerando as posições: base, meio e topo (figura 4). Cada um destes discos foram divididos em duas partes: umametade destinada para o cálculo do teor de umidade atual e a outra para o teor de umidade máxima e densidade

básica. Utilizou-se este método para verificar se há variação energética significativa da base para o topo de cada colmo.

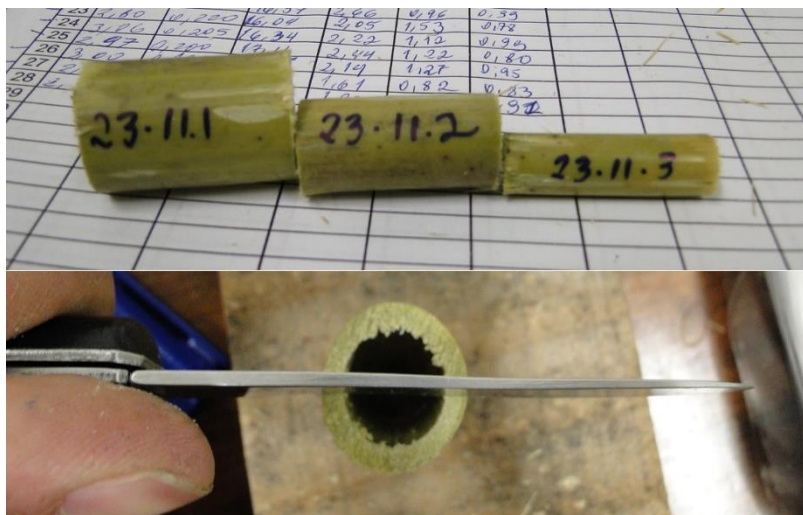


Figura 5. Imagem acima seção de corte: base, meio e topo. Imagem abaixo: Corte axial em cada disco de colmo.

3.2 ENSAIOS REALIZADOS EM TODOS OS COLMOS

Para todos os colmos foram realizadas determinações do teor de umidade atual (condição de coleta), teor de umidade máxima (amostra saturada) e densidade básica (amostra sólida).

3.2.1 Teor de umidade atual

Para determinação da umidade atual, segundo Vital (1997), as amostras foram pesadas em balança de precisão com sensibilidade de $10^{-2}g$ e em seguida colocadas em estufa a $103 \pm 2^{\circ}C$ até massa constante, quando novamente foram pesadas (figura 6).



Figura 6. Da esquerda para direita: pesagem da umidade atual após o abate e amostras postas em estufa a 103 ± 2 °C.

O teor de umidade (%) foi dado por:

$$U_a = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad \text{Equação 01}$$

Onde U_a = umidade atual (%); M_u = massa úmida (g); M_s = massa seca a 0% de umidade (g).

3.2.2 Teor de Umidade Máxima

Para a determinação da umidade máxima seguiu-se a mesma metodologia utilizada para a determinação da umidade atual (equação 2).

$$U_{máx} = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad \text{Equação 02}$$

Onde $U_{máx}$ = umidade máxima (%); M_{sat} = massa saturada (g); M_s = massa seca a 0% de umidade (g).

Para atingir massa constante saturada as amostras foram postas em sacos plásticos e submersas em água (figura 7).



Figura 7. Da esquerda para direita: amostras postas em sacos de plástico e submersas em água até atingir saturação constante.

De posse da umidade atual foi determinada a massa seca de cada colmo e realizada regressão desta com a altura, o diâmetro, a umidade máxima e a umidade atual.

3.2.3 Densidade básica

A densidade básica (Db) foi determinada pelo método do máximo teor de umidade (MTU), segundo Foelkel et al. (1972), conforme expressão que segue.

$$Db = \frac{1}{\left(\frac{Msat}{Ms}\right) - 0,346} \quad \text{Equação 03}$$

Onde: Db = densidade básica em g/cm^3 ; $Msat$. = massa saturada (g); Ms = massa seca a 0% de umidade (g).

3.2.4 Densidade energética

A densidade energética foi determinada pelo produto entre a densidade básica e o poder calorífico superior e útil, fornecendo a quantidade de calor por metros cúbicos sólidos de cana-do-reino.

$$DE = PCS \times Db$$

Equação 04

Onde: DE = Densidade Energética dada em kJ/m^3 ; PCS = Poder Calorífico Superior em kJ/kg , Db = densidade básica em kg/m^3 .

3.3. ANÁLISES REALIZADAS POR TRATAMENTO

A massa seca é um dos principais parâmetros de referência na obtenção da densidade energética. Goulart et al. (2003) afirmam que a energia produzida está diretamente relacionada à massa seca, ou seja, quanto maior for a massa seca, maior será a quantidade de energia fornecida. Assim como a energia estocada, o carbono elementar também tem relação direta com a biomassa, ficando em geral com valores em torno de 50% da biomassa seca.

Dentre as variáveis (diâmetro, umidade atual, umidade máxima, densidade básica e altura) relacionadas com a massa seca, a altura foi a que apresentou maior correlação. Através disso, os colmos colhidos foram separados aleatoriamente em quatro classes de altura (C1, C2, C3 e C4). Cada classe de altura foi dividida em três posições axiais (base, meio e topo) e para cada posição foram consideradas cinco repetições. O número de colmos por repetição variou entre classes, em função da dimensão do mesmo (colmos pequenos maior número, colmos grandes menor número). Os colmos em cada repetição e posição axial foram transformados em palitos, moídos, classificados em peneira abaixo de 60 mesh, para realização da análise imediata e poder calorífico, secos em estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ (figura 8).



Figura 8. Processo de preparação das amostras para realização da análise imediata. Superior esquerda: palitagem dos colmos. Inferior esquerda: peneira abaixo de 60 mesh.

Meio: moedor de biomassa. Superior direita: material classificado abaixo de 60 mesh. Inferior direita: material posto em estufa.

3.3.1. Análise imediata

O procedimento para análise imediata é prescrito pela norma NBR 8112/86, que se aplica às determinações dos teores de umidade, cinza, materiais voláteis e carbono fixo.

3.3.1.1 Teor de materiais voláteis (MV)

O teor de materiais voláteis se deu pelo seguinte procedimento. Com massa conhecida do cadinho de porcelana seco e posteriormente tarado, pesou-se 1 (um) g de amostra isenta de umidade numa balança analítica com sensibilidade de 10^{-4} g em triplicata. Em seguida, colocou-se o cadinho tampado com a amostra por 3 minutos sobre a porta da mufla, previamente aquecida em torno dos 900°C . Passados os 3 minutos, colocou-se o cadinho no interior da mufla por 7 minutos com a porta fechada. Por fim, retirou-se a amostra da mufla para esfriar no dessecador, e assim determinar a massa final. O teor de materiais voláteis foi determinado pela equação 05.

$$MV = \frac{m_2 - m_3}{m} \times 100$$

Equação 05

Onde MV = teor de materiais voláteis em %, m_2 massa inicial do cadinho + amostra em g, m_3 massa final do cadinho + amostra em g e massa da amostra em g. Os resultados obtidos em triplicata não devem diferir um do outro em valores relativos mais que 2%.

3.3.1.2 Teor de cinzas (CZ)

Para determinação do teor de cinza foi utilizado o seguinte procedimento. Pesou-se 2 (dois) g de amostra isenta de umidade numa balança analítica com sensibilidade de 10^{-4} g, em triplicata, em um cadinho de porcelana sem tampa de massa conhecida, previamente seco e tarado. Colocou-se o cadinho com a amostra em mufla previamente aquecida em torno dos 700°C . Foi deixado o cadinho na mufla a 700°C até a biomassa ser queimada completamente com tempo mínimo de

5 horas. Por fim, retirou-se a amostra da mufla, que foi levada para o dessecador para esfriar e determinar a massa final. Utilizou-se a equação 06 para o cálculo.

$$CZ = \frac{m_0 - m_1}{m} \times 100 \quad \text{Equação 06}$$

Onde CZ = teor de cinzas em %, m_0 massa inicial do cadinho em g, m_1 massa final do cadinho + resíduo em g e massa da amostra em g. Os resultados obtidos em triplicata não devem diferir um do outro em valores relativos mais que 10%.

3.3.1.3 Teor de carbono fixo (CF)

O teor de carbono fixo é uma medida indireta, portanto, foi efetuado o cálculo pela equação 07.

$$CF = 100 - (CZ + MV) \quad \text{Equação 07}$$

Onde CF = teor de carbono fixo em %, CZ = teor de cinza em % e MV = teor de materiais voláteis em %.

3.3.2 Poder calorífico superior (PCS)

A determinação do poder calorífico superior baseou-se na norma NBR 8633/84. Foi utilizado 1 g de amostra moída a 0% de umidade e com granulometria a 60 mesh. A amostra foi colocada dentro de uma bomba calorimétrica do tipo C 2000 basic da IKA. Este equipamento possui alto nível de automação e simplicidade no manuseio. Para fornecer água de resfriamento foi utilizado o termostato IKA KV 600. Ao final de aproximadamente 10 minutos foi fornecido o poder calorífico superior em calorias por grama (cal/g).

O poder calorífico útil (PCU), segundo Brito (1993), foi determinado pela equação 08.

$$PCU = PCI (1 - U) - 600 \times U \quad \text{Equação 08}$$

Onde PCU = Poder Calorífico Útil (cal/g); PCI = Poder Calorífico Inferior (cal/g); U = umidade em base úmida (%).

3.4. PROCEDIMENTO DE ANÁLISE PARA DETERMINAR A DENSIDADE ENERGÉTICA

O modelo de delineamento do experimento foi do tipo fatorial inteiramente casualizado com 2 fatores (4 Classes x 3 Posições) x 5 repetições, totalizando 60 unidades experimentais (u.e.) para cada variável (teor de materiais voláteis, teor de cinza, carbono fixo, poder calorífico superior, densidade básica, densidade energética e poder calorífico útil).

Para os testes de análise de dados utilizou-se o software gratuito Assistat versão 7.7 beta, para análise de variância e comparação múltipla entre médias de experimentos, desenvolvido pelo professor Doutor Francisco de Assis Santos e Silva do Departamento de Engenharia Agrícola do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG,) com funcionalidades de análise estatística experimental e planejamento de experimentos. Os resultados finais foram submetidos à Análise da Variância (ANOVA), mediante o “teste F” de 5% a probabilidade e as médias discriminadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas 30 parcelas amostradas foram encontrados 753 colmos, com média de 25 colmos/m² ± 8 colmos/m², variando entre máximo de 44 e mínimo de 13 colmos/m². Após tratamento dos dados com análise de regressão múltipla obteve-se as médias das variáveis massa seca, altura, diâmetro, umidade atual, umidade máxima e densidade básica, conforme tabela 1.

Tabela 1. Média e desvio padrão das variáveis massa seca, altura, diâmetro, umidade atual, umidade máxima e densidade básica.

Variáveis	Média (μ)	Desvio padrão (σ)	Coefficiente de Variação (%)
Massa seca (kg/colmo)	0,26	0,2	77
Altura (m)	3,86	1,29	33
Diâmetro (cm)	2,03	0,48	24
Umidade Atual (%)	83,61	27,84	33
Umidade Máxima (%)	107,56	37,8	35
Densidade Básica (g/cm ³)	0,6	0,07	11

A altura variou de 1,60 a 7,97 m, obtendo-se uma média de 3,86 m ± 1,29 m. Simões (2013) encontrou resultado semelhante para um grupo de espécies adultas de *Arundo donax* L. no Distrito Federal, com valores alternando entre 0,31 e 6,1 m, com média de 3,37 m, ± 1,35m. Perdue (1958) afirma que esta espécie chega a 8 metros de altura, o que pode ser encontrado neste trabalho.

O diâmetro médio foi de 2,03 cm ± 0,48 cm, variando entre 0,98 e 3,35 cm. Marchante e Marchante (2005), em um estudo feito em Portugal sobre plantas invasoras, encontraram uma variação de 1 à 3,5 cm de diâmetro. Já Vasconcelos et al. (2007), em experimento implantado na Estação Experimental Cascata, na zona rural de Pelotas, no Rio Grande do Sul, obtiveram 1,3 cm de diâmetro médio. Simões (2013), afirma que o diâmetro pode chegar a mais de 2 cm.

A área basal individual média foi de 0,00032 m², já a área basal total média foi bastante alta com 86,15 m²/ha. Oliveira (2005), em plantio de eucalipto agregado com sistema agrossilvipastoril, encontrou 16,48 m²/ha. A área basal deste estudo, se demonstrou alta devido a forte densidade de indivíduos por metro quadrado (25 colmos/m²).

A biomassa verde teve média de 0,50 kg/colmo ± 0,41 kg/colmo com alternância entre 0,04 e 2,06 kg/colmo, com total de 12,75 kg/m². Vasconcelos et

al.(2007) encontraram produção média de biomassa verde de 2,09 kg/m² no terceiro ano de implantação da cultura *Arundo donax*, na zona rural de Pelotas (RS).

A massa seca adquirida foi de 0,26 kg/colmo ± 0,20 kg/colmo alternando de 0,02 a 0,96 kg/colmo. Correspondendo aproximadamente à metade do peso da biomassa verde. Vasconcelos et al. (2007), encontraram valores parecidos entre massa seca e massa verde em estudo da implantação de um povoamento de 3 anos de *Arundo donax* L. no Rio Grande do Sul, ficando este valor em torno de 56% da matéria verde.

Através dos valores obtidos, foi feita regressão linear para as variáveis independentes altura, diâmetro, umidade máxima, umidade atual e densidade básica tendo como referência a variável dependente massa seca, a fim de verificar entre quais variáveis independentes havia maior correlação com a massa seca.

Das quatro variáveis analisadas, a altura e o diâmetro obtiveram maiores valores para coeficientes de determinação (R²).

A altura apresentou uma tendência linear com maior coeficiente de determinação entre as variáveis analisadas com R² 0,86 (figura 9), mostrando, portanto forte correlação com a massa seca. Simões (2013), analisando a relação entre massa seca e altura concluiu que à medida que há um aumento da altura existe um aumento da massa seca, porém encontrou uma regressão não linear entre altura e massa seca com R² 0,88.

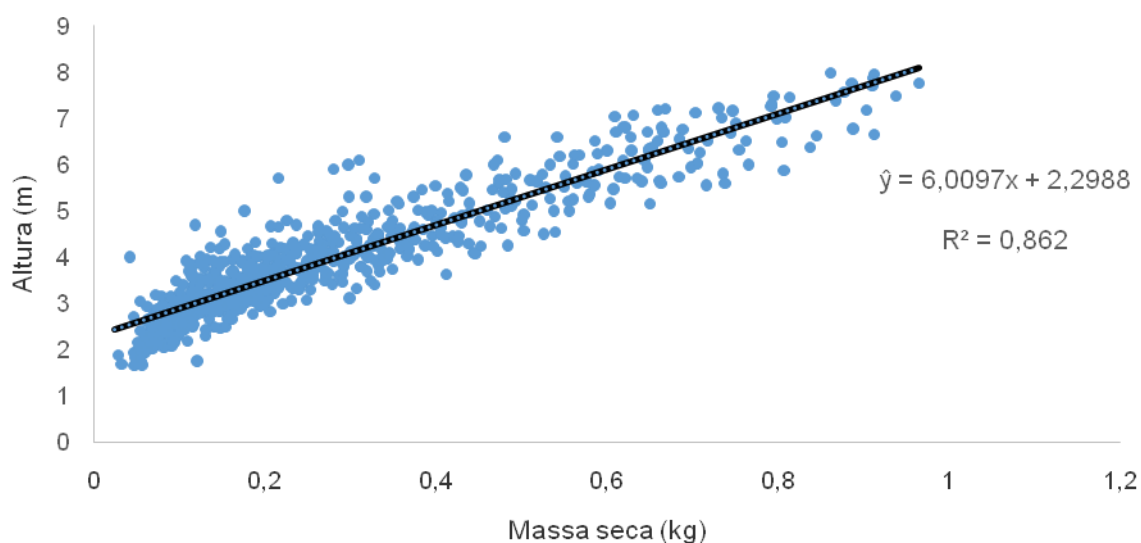


Figura 9. Relação massa seca (kg) por altura (m).

O diâmetro apresentou um modelo linear, porém tende a estabilizar a medida que a massa seca aumenta (figura 10).

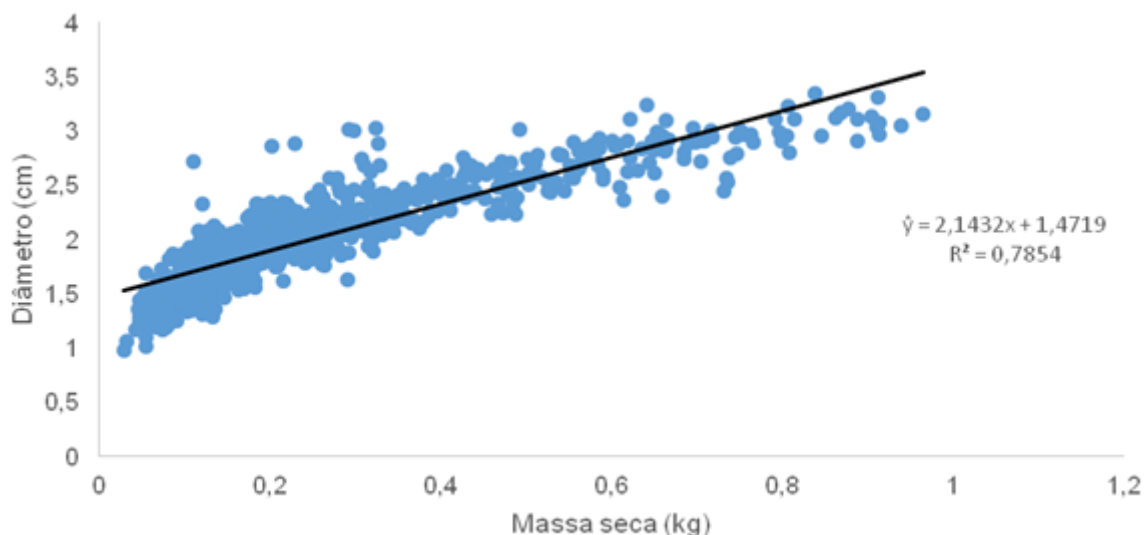


Figura 10. Relação massa seca (kg) por diâmetro (cm).

Com este resultado, a variável escolhida para a separação dos colmos em classes foi a altura, conforme tabela 2.

Tabela 2. Número de indivíduos e massa seca por classe de altura.

Classe	H (m)	Nº Indivíduos	Massa seca por classe (kg)	Massa seca por indivíduo (kg)
1	1,60 a 3,18	257	28,48	0,111
2	3,19 a 4,78	345	82,48	0,239
3	4,79 a 6,02	88	43,23	0,491
4	> 6,02	63	45,00	0,714
Total (30m²)		753	199,19	0,265

Em relação a produção de biomassa seca a estimativa para a área de estudos foi de 6,64 kg/m² de biomassa seca a 0% de umidade. Simões (2013) estudando a produção de biomassa seca de *Arundo donax* em 18 locais distintos no Distrito Federal encontrou valores de 0,75 kg/m² para indivíduos jovens e 4,47 kg/m² para indivíduos adultos, totalizando 5,22 kg/m². Vasconcelos et al. (2007), em um plantio experimental de *Arundo donax* com 3 anos de idade na cidade de Pelotas, no Rio Grande do Sul, encontraram 0,67 kg/m² para colmos e 0,49 kg/m² para folhas, totalizando 1,16 kg/m² de matéria seca. Cal-IPC (2011), estudando a distribuição de *Arundo donax*, em 14 locais distintos das bacias costeiras do sul da Califórnia,

encontrou 15,5 kg/m² de biomassa seca. De modo geral, neste trabalho, foi amostrado 382,65 kg/30m² de massa verde, com 199,19 kg/30m² de massa seca, correspondendo à aproximadamente 52% da biomassa verde total.

O gráfico a seguir (figura 11) mostra a distribuição do número de colmos por classe de altura.

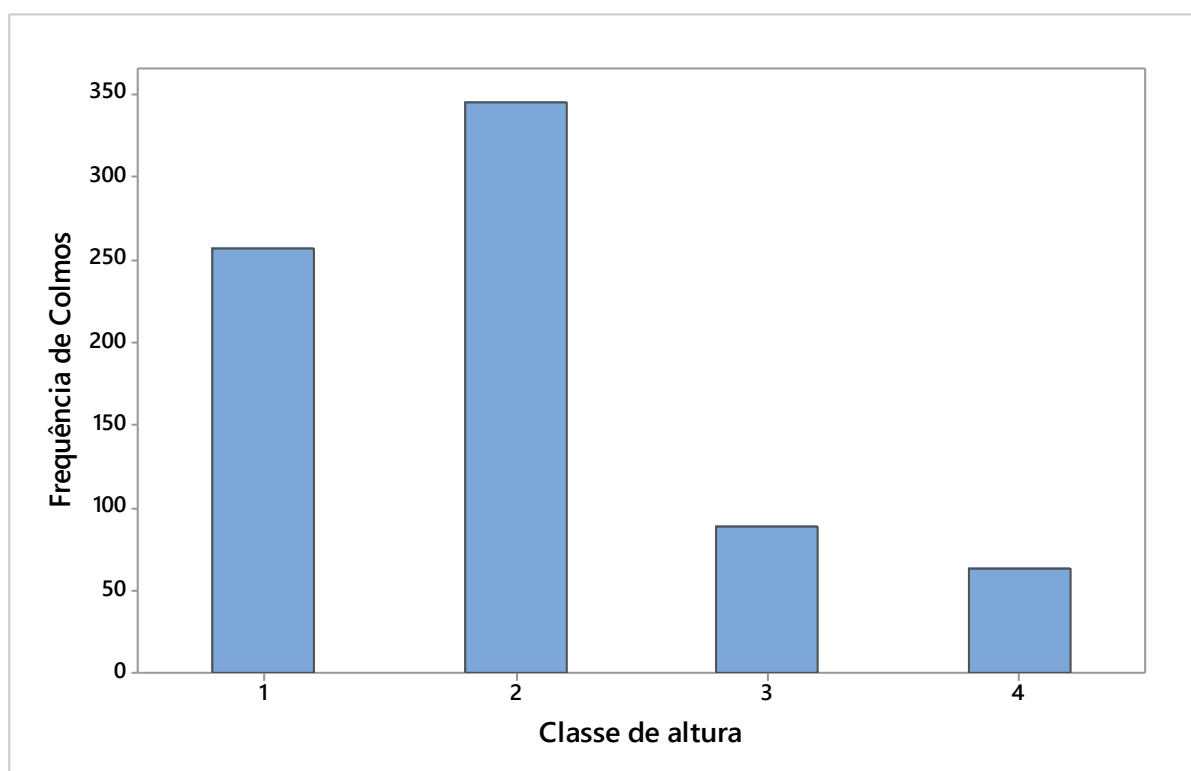


Figura 11. Relação do número de colmos por classe de altura.

A classe 2 (3,19m – 4,78m) apresentou maior número de colmos 345, seguindo pela classe 1 (1,6m – 3,18m) com 257 colmos e classe 3 (4,79m – 6,02m) com 88 indivíduos. A classe 4 (>6,02) apesar de apresentar maior altura, foi a que apresentou menor número de colmos 63. Tal fato pode ser explicado pela densidade de indivíduos por metro quadrado, ou seja, indivíduos de altura e diâmetro menor apresentaram maior adensamento entre si, já os indivíduos com altura e diâmetro maior apresentaram menor adensamento.

A figura 12, ilustra a relação produção de biomassa por classe de altura.

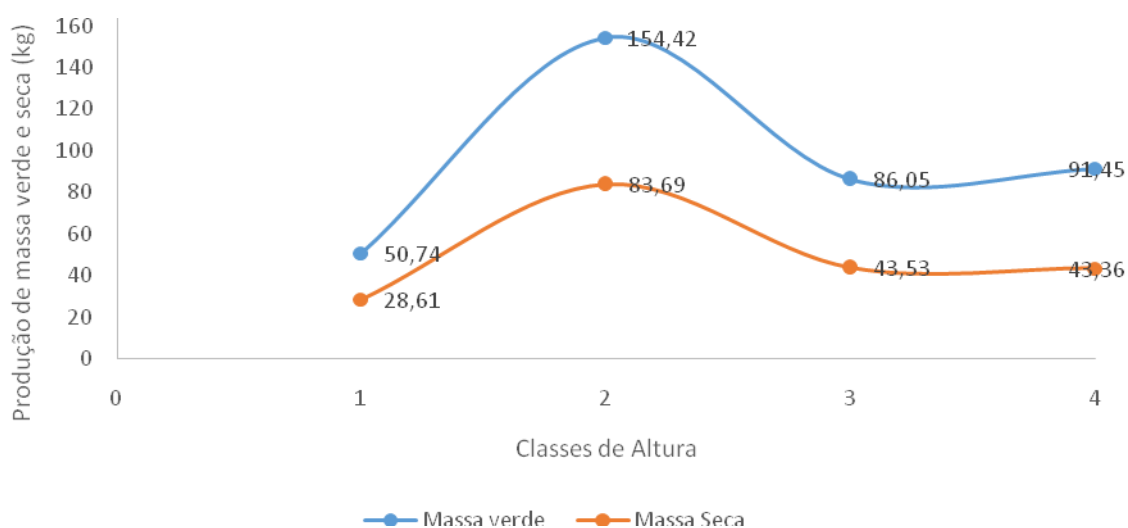


Figura 12. Relação da produção de massa seca (kg) e massa verde (kg) por classe de altura(m).

O gráfico (figura 12) demonstra uma associação do número de colmos por produção de biomassa. A classe 2 por apresentar maior densidade de indivíduos, apresentou maior taxa de produção de biomassa, seguida pela classe 4, 3 e 1. Porém, a classe 1 apresentou, proporcionalmente, maior rendimento médio de massa seca com percentual de 55,40%, em relação as demais, como mostra a curva de distribuição. Seguido pelas classes 2, 3 e 4, com 53,42%, 50,82% e 49,01%, respectivamente. Tal fato é explicado devido a classe 1 ter apresentado maior densidade básica ($0,62 \text{ g/cm}^3$) e menor teor de umidade (77,41%). Indicando um melhor momento de corte para uso energético.

4.1 ANÁLISE IMEDIATA

Após obtenção dos resultados da análise imediata aplicou-se o teste de média de Tukey nas variáveis teor de materiais voláteis, teor de cinza e carbono fixo em função das classes (1, 2, 3 e 4) e da posição axial (base, meio e topo).

4.1.1 Teor de Materiais Voláteis (MV)

A análise de variância com dois fatores levando em consideração o teor de voláteis se encontra na tabela 3.

Tabela 3. Análise Variância (ANOVA) do teor de materiais voláteis com interação entre dois fatores inteiramente casualizado (classe e posição).

Quadro ANOVA						
FV	GL	SQ	QM	Fc	F	P
Classe	3	11,19	3,73	4,23	6,3**	<0,0011
Posição	2	1,52	0,76	3,19	1,29 ^{ns}	0,2852
C x P	6	9,4	1,57	2,29	2,65*	<0,0268
Trat.	11	22,12	2,01	2,64	3,40**	<0,0015
Resíduo	48	28,42	0,59			
Total	59	50,54				

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

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

^{ns} não significativo ($p \geq .05$)

FV = Fonte de variação, GL = Graus de liberdade, SQ = Soma de quadrado

QM = Quadrado médio, F = Estatística do teste F, Fc = crítico, P = probabilidade

Pela tabela 3 fica demonstrado que o fator classe foi significativo com $F > F_c$, ou seja, as variâncias das médias das classes não são iguais ao nível de significância de 1%. Já o fator posição não apresentou diferença significativa, indicando que o teor de material volátil é estatisticamente igual entre a base e o topo dos colmos. Já a interação entre classe e posição axial foi significativa ao nível de 5% de probabilidade.

Na tabela 4 estão apresentados as médias e o resultado do teste de Tuckey para teor de material volátil.

Tabela 4. Teste de Tukey para teor de material volátil.

Classe (%)	C1	C2	C3	C4
	78,59a	78,28ab	77,55b	77,65b
Posição Axial (%)	Base	Meio	Topo	
	77,85a	78,23a	77,98a	

Verifica-se pela tabela 4, uma tendência de diminuição no teor de materiais voláteis com o aumento da altura do colmo. Com valor médio de 78,02%, sendo a classe C1 com maior teor de voláteis, seguido da C2, C4 e C3. Porém, as classes C4 e C3, não houve diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade. Basso et al. (2001), em experimento com amostras *Arundo donax* colhidas na província de Buenos Aires, encontram valores médios de 71,30% para materiais voláteis. Por outro lado, Nichol (2012), trabalhando com plantações de *Arundo donax*, em Portland, obteve 63,1% de material volátil e Jeguirim et al. (2010) encontraram 68,4% de materiais voláteis, para a mesma espécie colhida em plantações

energéticas na França. Em comparação com outras espécies, Moreira (2012), encontrou 78,15% de materiais voláteis para bambu (*Bambusa vulgaris*) resultado semelhante ao encontrado para espécie *Arundo donax*.

No sentido axial, Moreira (2012), encontrou valores semelhantes do teor de materiais voláteis para a espécie *Bambusa vulgaris*, com 77,86%, 79,30% e 77,27% para base, meio e topo, respectivamente. Porém, o meio, diferiu significativamente da base e topo.

Na tabela 5 é apresentada a interação entre classe e posição para teor de material volátil.

Tabela 5. Interação das médias Classe x Posição Axial (C x P) dos materiais voláteis (%).

Classe de altura	Posição axial		
	B	M	T
C1	79,18 aA	78,81 aAB	77,78 aB
C2	77,82 bA	78,61 abA	78,42 aA
C3	77,03 bA	78,01 abA	77,62 aA
C4	77,36 bA	77,50bA	78,10 aA

Teste de Tukey à 5% de probabilidade. As médias seguidas da mesma letra não diferem entre si. Leitura: letras maiúsculas - posição e letras minúsculas - classes. C – classe de altura; B – base; M – meio e T – topo.

A interação entre os fatores classe e posição axial está associada ao teor de materiais voláteis. A tabela 5, mostra que na posição B existe diferença de materiais voláteis da classe C1 em relação a C2, C3 e C4. Na seção M, os materiais voláteis diferiram na classe C4 em relação a C1, C2 e C3. O Topo em relação as classes não provocou mudanças significativas no teor de materiais voláteis.

As classes C2, C3 e C4 em relação as posições não apresentaram mudanças nos teores de voláteis. A classe C1 em relação a posição base e topo apresentou diferença significativa no teor de materiais voláteis, ficando evidente uma interação entre eles. A base, com interação a classe C1, apresentou a maior média de voláteis 79,18%. A mesma, em relação a classe C3 apresentou a menor média 77,03% de voláteis.

A figura 13 ilustra melhor a interação classe x posição dos materiais voláteis.

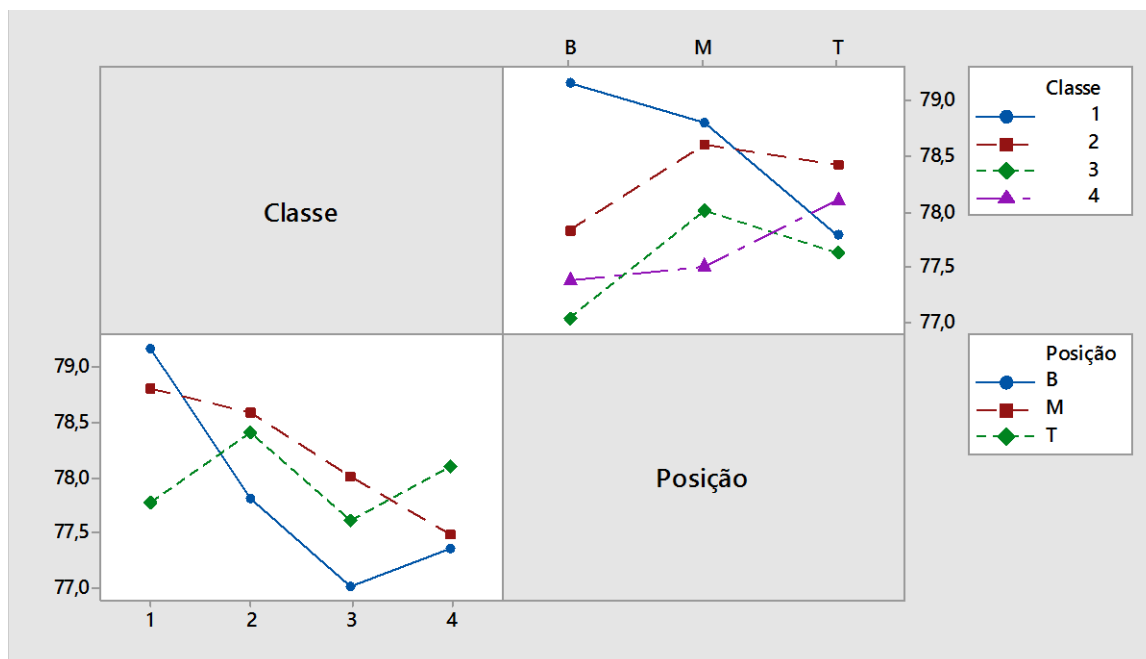


Figura 13. Interação das médias do teor de materiais voláteis (%) em função da classe de altura e posição axial dos colmos.

4.1.2 Teor de Cinzas

Para a variável teor de cinzas foi feita análise de variância levando em consideração a influência mútua das classes por suas respectivas posições axiais, conforme tabela 6.

Tabela 6. Análise Variância (ANOVA) do teor de cinzas com interação entre dois fatores inteiramente casualizado (classe e posição axial).

Quadro ANOVA						
FV	GL	SQ	QM	Fc	F	P
Classe	3	14,35	4,78	4,21	18,31**	<0,001
Posição	2	25,50	12,75	5,09	48,78**	<0,001
C x P	6	2,33	0,39	2,29	1,48 ^{ns}	0,2037
Trat.	11	42,18	2,01	2,64	3,40**	<0,001
Resíduo	48	12,54	0,59			
Total	59	54,72				

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

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

^{ns} não significativo ($p \geq .05$)

FV = Fonte de variação, GL = Graus de liberdade, SQ = Soma de quadrado

QM = Quadrado médio, F = Estatística do teste F, Fc = crítico, P = probabilidade

Em relação a análise de variância da tabela 6 nota-se que as classes, juntamente com as posições axiais, apresentaram diferença significativa ao nível de 1% de probabilidade ($F > F_c$), com médias diferindo entre si. Com relação a interação entre classe e posição axial não houve diferenças significativa a 5% de probabilidade entre as médias correlacionadas, isto é, as médias da interação classes por posição não apresentam um efeito significativo no teor de cinzas.

Na tabela 7 está o teste de Tuckey para as médias de teor de cinzas, para classe e posição axial.

Tabela 7. Médias do teor de cinzas para as classes e posição axial.

Classe (%)	C1	C2	C3	C4
	5,21a	4,33 b	4,14 b	3,93 b
Posição Axial (%)	Base	Meio	Topo	
	3,77 b	4,14 b	5,60 a	

Observa-se, para o teor de cinzas, diferença significativa a 5% entre as classes, a classe C1 destacando-se das demais. Isto indica para as condições do estudo, uma relação direta entre teor de cinzas e altura do colmo. A média obtida foi de 4,40% de cinzas. Num experimento sobre a viabilidade de utilização da espécie *Arundo donax* como meio de tratamento para águas contaminadas de metal pesado, Basso (2001), encontrou resultados muito próximos, com 4,56% de teor de cinzas em base seca e Jeguirim et al. (2010) obtiveram 5% de cinzas, em plantações de 3 anos de *Arundo donax* na França.

Com relação as posições base, meio e topo, houveram diferenças significativas a 5% de probabilidade do topo em relação as demais seções. O topo apresentou maior teor de cinzas com 5,60%, seguindo de 4,14% e 3,77% para meio e base, respectivamente. Moreira (2012) obteve o mesmo comportamento com a espécie *Bambusa vulgaris*, proveniente de plantações de bambu na Bahia, bem como Li (2004) com a espécie *Phyllostachys pubescens*, coletadas na Floresta Nacional Kisatchie, em Pineville, Louisiana nos Estados Unidos. Tal fato pode ser explicado pela concentração de feixes fibrovasculares que aumentam da base para o topo, conferindo maior densidade no topo (BERNDSEN, 2008) ou por apresentar maiores teores de sílica (JACKSON e NUNEZ, 1964), que possivelmente influenciaram nos resultados deste trabalho.

Na figura 14 estão os gráficos dos teores de cinzas em relação às classes de altura e em relação à posição axial.

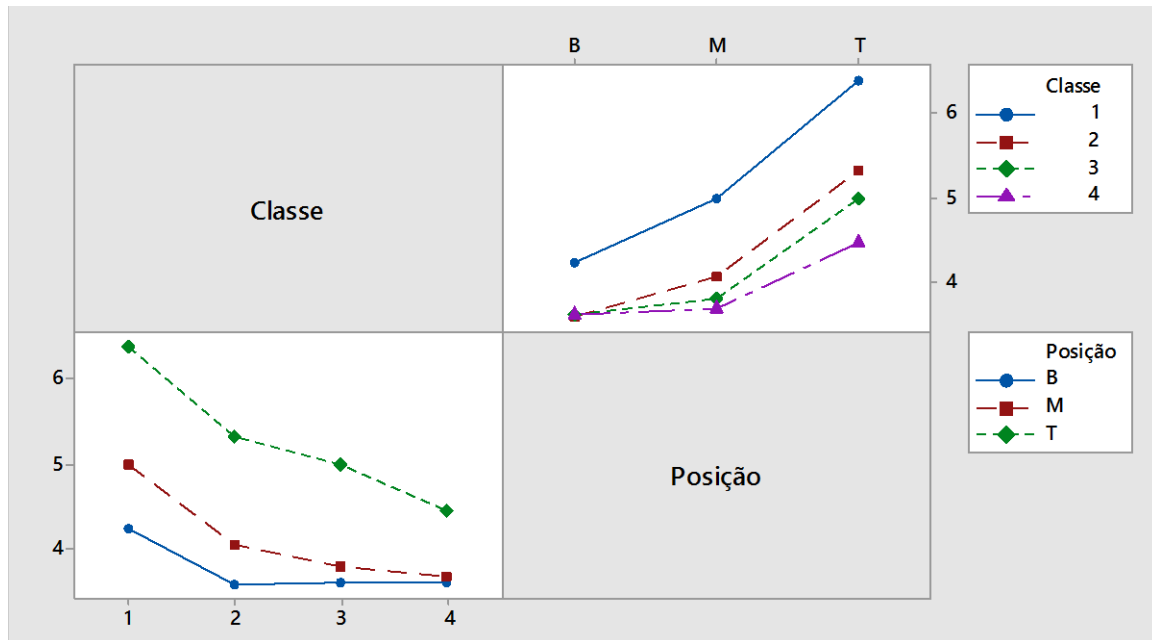


Figura 14. Relação das médias dos teores de cinzas (%) em função da classe e altura.

A figura 14 mostra que não houve interação entre os fatores classe e posição axial, pois independente de cada fator não houve alteração significativa no teor de cinzas. Porém, ao observar o gráfico posição, levando em consideração os efeitos de cada seção em relação as classes de altura, a seção topo na classe 1 teve maior impacto no teor de cinzas com 6,39%. Entretanto, a base em diferentes classes não influenciou no teor de cinzas.

4.1.3 Teor de Carbono Fixo

Para análise de variância do teor de carbono fixo encontrou-se os seguintes resultados, tabela 8.

Tabela 8. Análise Variância (ANOVA) do teor de carbono fixo com interação entre dois fatores inteiramente casualizado (classe e posição axial).

Quadro ANOVA						
FV	GL	SQ	QM	Fc	F	P
Classe	3	47,77	15,92	4,21	27,01**	< 0,001
Posição	2	27,89	13,95	5,08	23,66**	< 0,001
C x P	6	4,72	0,79	2,29	1,33 ^{ns}	0,2609
Trat.	11	80,38	7,31	2,64	12,40**	< 0,001
Resíduo	48	28,29	0,58			
Total	59	108,67				

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

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

^{ns} não significativo ($p \geq .05$)

FV = Fonte de variação, GL = Graus de liberdade, SQ = Soma de quadrado

QM = Quadrado médio, F = Estatística do teste F, Fc = crítico, P = probabilidade

Houve diferença significativa ao nível de 1% e 5% para as médias de teor de carbono fixo entre classes e entre posições. A interação entre classe e posição não diferiram entre si ao nível de 5% de significância.

O resultado do teste de Tuckey é apresentado na tabela 9 para classe de altura e posição axial.

Tabela 9. Médias do teor de carbono fixo das classes e posições.

	C1	C2	C3	C4
Classe (%)	16,19 c	17,38 b	18,30 a	18,42 a
	Base	Meio	Topo	
Posição Axial (%)	18,38 a	17,62 b	16,72 c	

Em relação às classes (tabela 9), o teor de carbono fixo apresentou diferença significativa com tendência de aumento da menor para a maior classe de altura.

A classe C4 apresentou o maior teor de carbono fixo com 18,42%, seguindo de 18,30% para C3, 17,38% para C2 e 16,19% para C1. Isso ocorreu devido a classe C4 ter apresentado menor teor de cinzas em relação as demais. Com média de 17,58%. Basso (2001), ao realizar experimento com a mesma espécie obteve 24,14% de carbono fixo. Nichol (2012) obteve 14,3% de carbono fixo com *Arundo donax*. Já Jeguirim et al. (2010), encontraram 18,4% de carbono fixo.

O teor de carbono fixo em relação a posição axial apresentou diferença significativa à 5% em ambas as seções. A base apresentou maior teor de carbono fixo, com 18,38%, seguido de 17,62% e 16,72% do meio e topo, sequencialmente. Moreira (2012), em experimento com *Bambusa vulgaris* proveniente de plantio da Bahia, verificou o mesmo comportamento.

As relações entre classes de altura e posição axial para o teor de carbono fixo é apresentada na figura 15.

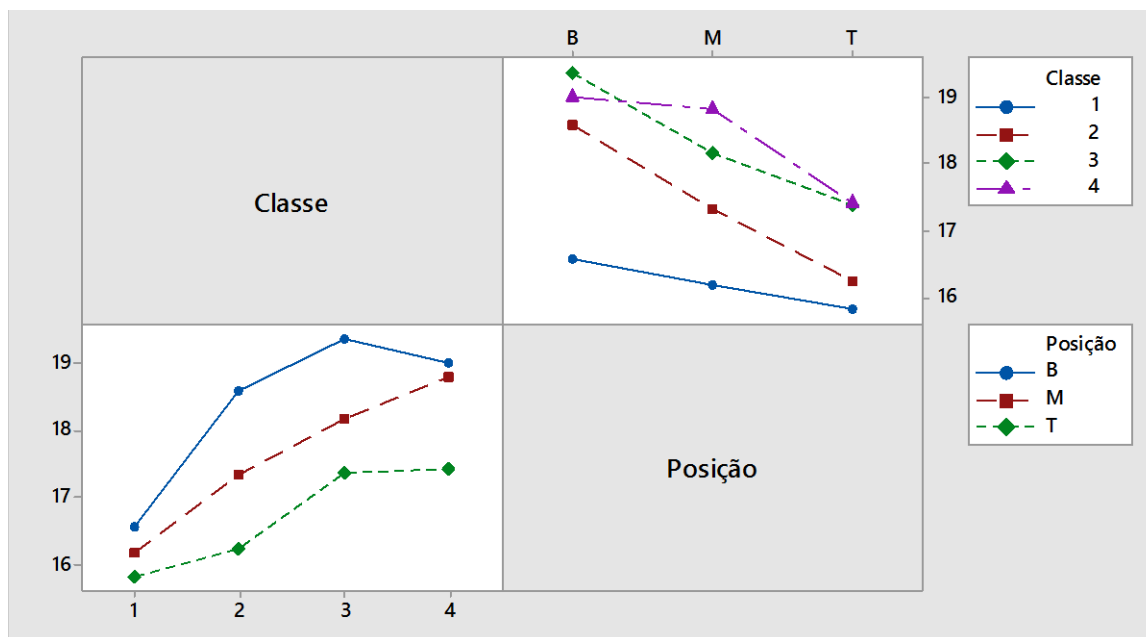


Figura 15. Interação das médias dos teores de carbono fixo (%) em função da classe e altura.

A figura 15 demonstra que não houve interação significativa da variável teor de carbono fixo em função da classe e posição, pois independente da posição axial, o teor de carbono fixo não foi influenciado significativamente pelas classes de altura.

Porém ao analisar separadamente o efeito de cada fator percebe-se que a partir da base e da classe 3 houve crescente aumento do teor de carbono fixo, onde a base da classe C3 teve maior teor, com 19,36%.

4.2 PODER CALORÍFICO SUPERIOR

Os resultados da ANOVA para o poder calorífico superior encontram-se na tabela 10.

Tabela10. Análise de Variância (ANOVA) do poder calorífico superior com interação entre dois fatores inteiramente casualizado (classe e posição axial).

Quadro ANOVA						
FV	GL	SQ	QM	Fc	F	P
Classe	3	64492	21497	4,21	12,22**	<0,001
Posição	2	45892	22946	5,08	13,04**	<0,001
C x P	6	11589	1931	2,29	1,10 ^{ns}	0,3775
Trat.	11	121974	11088	2,64	6,30**	< 0,001
Resíduo	48	84459	1759			
Total	59	206433				

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

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

^{ns} não significativo ($p \geq .05$)

FV = Fonte de variação, GL = Graus de liberdade, SQ = Soma de quadrado

QM = Quadrado médio, F = Estatística do teste F, Fc = crítico, P = probabilidade

Pela análise da tabela 10 observa-se diferenças significativas ao nível de 1% e 5% de probabilidade para o poder calorífico, exceto para as interações.

Na tabela 11 está o resultado do teste de média para o teor de carbono fixo.

Tabela 11. Médias do poder calorífico superior (MJ/kg) das classes e posições.

Classe (kJ/kg)	C1	C2	C3	C4
	17,970 b	18,258 a	18,254 a	18,321 a
Posição Axial (kJ/kg)	Base	Meio	Topo	
	18,313 a	18,254 a	18,041 b	

Os colmos da classe C4 apresentaram maior poder calorífico superior com 18,321 MJ/kg, seguido de 18,258 MJ/kg, 18,254 MJ/kg e 17,970 MJ/kg de C2, C3 e C1, respectivamente. A média foi de 18,204 MJ/kg. Jeguirim et al. (2010), encontraram valores de 17,7 MJ/kg. Com relação as posições axiais o topo diferiu significativamente do meio e da base, apresentando menor valor de poder calorífico superior com 18,041 MJ/kg. Para base e meio não houve diferença significativa, porém a base obteve o valor mais alto com 18,313MJ/kg, seguindo por 18,254 MJ/kg do meio. Observou-se uma crescente de ganho energético do topo para a base. Moreira (2012), encontrou a mesma tendência, e explica que isto é possível graças a razão da distribuição inversa de cinzas em relação ao poder calorífico superior, ou seja, as gramíneas tendem a ter maiores teores de cinza na parte aérea.

As relações entre o poder calorífico superior com as classes de altura e as posições axiais, são apresentadas na figura 16.

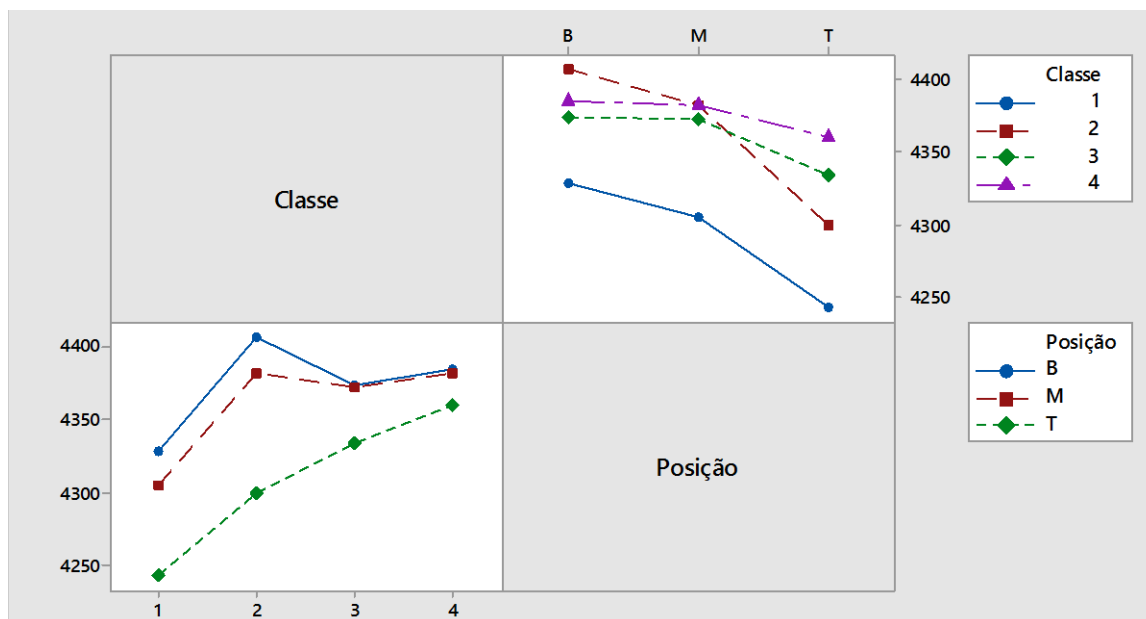


Figura 16. Interação entre as médias do PCS em função da classe de altura e posição axial.

A interação entre os fatores classe de altura e posição axial não foram significativos ao nível de 5%. Independente destas, o efeito foi desprezível em função do poder calorífico superior. Porém, ao observar os efeitos principais, percebe-se que a base da classe 2 apresentou a maior taxa de poder calorífico superior 4.407 kcal/kg ou 18,451 MJ/kg, Manteve tendência de ganho de energia do topo para a base e da menor classe de altura para a maior.

4. 3 DENSIDADE BÁSICA

Para a densidade básica também foi aplicado análise de variância fatorial inteiramente casualizado, levando em consideração dois fatores, classe de altura e posição axial, conforme atabela 12.

Tabela 12. Análise Variância (ANOVA) da densidade básica com interação entre dois fatores inteiramente casualizado (classe e posição axial).

Quadro ANOVA						
FV	GL	SQ	QM	Fc	F	P
Classe	3	0,0428	0,0142	4,21	38,21**	<0,001
Posição	2	0,0342	0,0171	5,08	45,90**	<0,001
C x P	6	0,0055	0,0009	2,29	2,50*	0,3545
Trat.	11	0,0827	0,0075	2,64	20,12**	< 0,001
Resíduo	48	0,0179	0,0003			
Total	59	0,1006				

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

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

^{ns} não significativo ($p \geq .05$)

FV = Fonte de variação, GL = Graus de liberdade, SQ = Soma de quadrado

QM = Quadrado médio, F = Estatística do teste F, Fc = crítico, P = probabilidade

Observa-se pela tabela 12 variação significativa ao nível de 5% de probabilidade para as médias de densidade básica tanto para classe de altura, quanto posição axial e interação entre ambas.

Tabela 13. Médias das classes e posições da densidade básica (kg/m^3)

Classe (kg/m^3)	C1	C2	C3	C4
	599 a	600 a	552 b	540 b
Posição Axial (kg/m^3)	Base	Meio	Topo	
	546 c	568 b	604 a	

*Valores convertidos para kg/m^3 , onde $1 \text{ g/cm}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3$

As classes C1 e C2 foram as que obtiveram as maiores médias, com 599 kg/m^3 e 600 kg/m^3 , respectivamente. As classes C3 e C4 diferiram significativamente das anteriores, com menores médias, 552 kg/m^3 e 540 kg/m^3 , nesta ordem média geral foi de 572 kg/m^3 . A densidade básica variou no sentido base para topo. O topo atingiu maior densidade com 604 kg/m^3 , seguido do meio com 568 kg/m^3 e base com 546 kg/m^3 . Moreira (2012) encontrou valores médios próximos, com o mesmo comportamento de variação, com densidade básica do topo de 628 kg/m^3 , meio 591 kg/m^3 e 538 kg/m^3 para base. Essa tendência é explicada devido a influência da umidade, onde a classe C1 (77,41%), apresentou menor teor de umidade, seguindo pelas classes C2 (82,54%), C3 (92,93%) e C4 (99,92%). O mesmo ocorreu nas posições axiais, com topo apresentando menor teor de umidade (71,57%) seguido pelo meio (78,78%) e pela base (93,21%).

As relações de densidade básica em função da classe de altura e da posição axial estão apresentadas na figura 17.

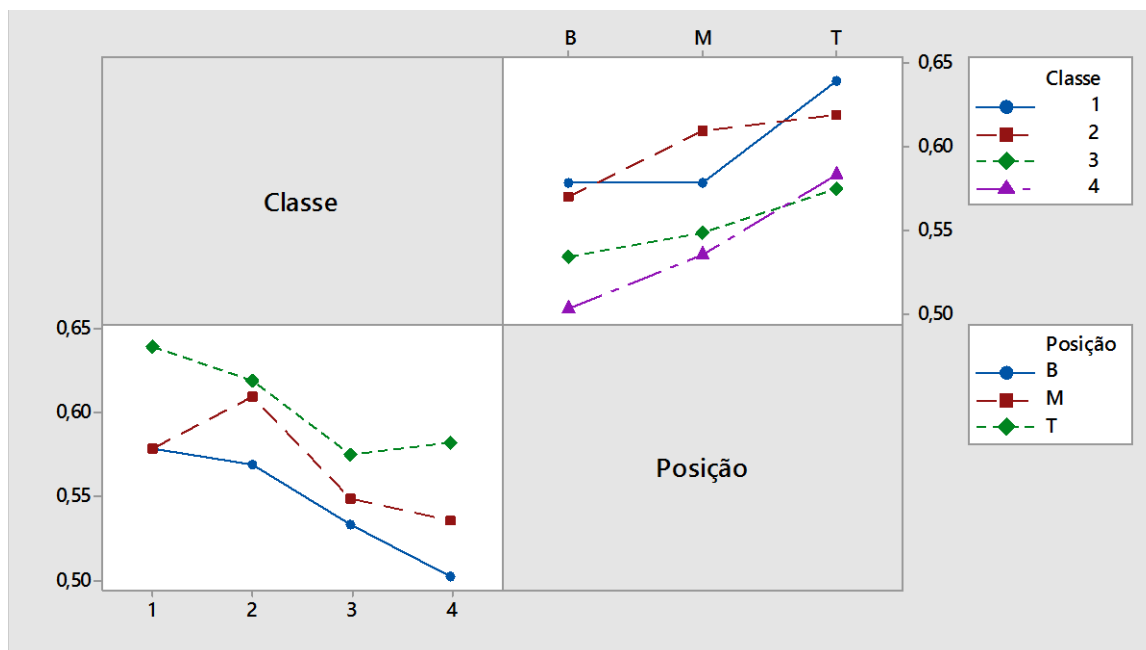


Figura 17. Relações da densidade básica (g/cm^3) em função das classe de altura e posição axial.

A figura 17 ilustra a interação significativa ao nível de 5% na posição axial em relação as classes de altura em função da densidade básica. O gráfico classe demonstra interação significativa entre as classes C1 e C2, e entre as classes C3 e C4. No gráfico posição não houve interação. A seção topo obteve as maiores médias de densidade básica, seguindo do meio e da base. A maior variação de média foi na classe 1 posição topo.

4.4 DENSIDADE ENERGÉTICA

Na tabela 14 está o resultado da ANOVA para densidade energética entre classes de altura, posição axial e interação entre estes, ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 14. Análise Variância (ANOVA) da densidade energética com interação entre dois fatores inteiramente casualizado (classe e posição axial).

Quadro ANOVA						
FV	GL	SQ	QM	Fc	F	P
Classe	3	663870	221290	4,21	33,62**	<0,001
Posição	2	462289	231144	5,08	3512**	<0,001
C x P	6	123275	20545	2,29	3,12*	0,0116
Trat.	11	1249436	113585	2,64	17,26**	< 0,001
Resíduo	48	315862	658			
Total	59	1565297				

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

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

^{ns} não significativo ($p \geq .05$)

FV = Fonte de variação, GL = Graus de liberdade, SQ = Soma de quadrado

QM = Quadrado médio, F = Estatística do teste F, Fc = crítico, P = probabilidade

Analisando a tabela 14, verifica-se que houve diferenças significativas a 5% de probabilidade, tanto para classe, posição como para interação classe posição.

O resultado do teste de Tuckey está apresentado na tabela 15.

Tabela 15. Médias da densidade energética (MJ/m³) das classes e posições.

Classe (MJ/m³)	C1	C2	C3	C4
	10756a	10944a	10082b	9898b
Posição Axial (MJ/m³)	Base	Meio	Topo	
	9998c	10371b	10894a	

*Valores convertidos para MJ/m³, onde: 1 cal/cm³ = 4,1868 MJ/m³

A variável densidade energética apresenta uma relação inversa ao poder calorífico superior. Isso se deve a alta densidade básica presente nas primeiras classes. A classe C2 foi a de maior valor de densidade energética com 10944 MJ/m³, seguido por 10756 MJ/m³ para C1, 10082 MJ/m³ para C3 e 9898 MJ/m³ para C4, diferindo significativamente entre si. A média geral da densidade energética foi 10421 MJ/m³. As seções base, meio e topo, indicaram uma tendência de ganho energético da base para o topo. O topo diferiu significativamente a 5% em relação ao meio e a base, apresentando maior valor energético com 10894 MJ/m³, seguido pelo meio. Para as posições topo e meio houve também diferença significativa a 5%. Com meio a 10371 MJ/m³ e base apresentou menor densidade energética, com 9998 MJ/m³.

Na figura 18 estão as relações entre a densidade energética e as classes de altura e posições axiais.

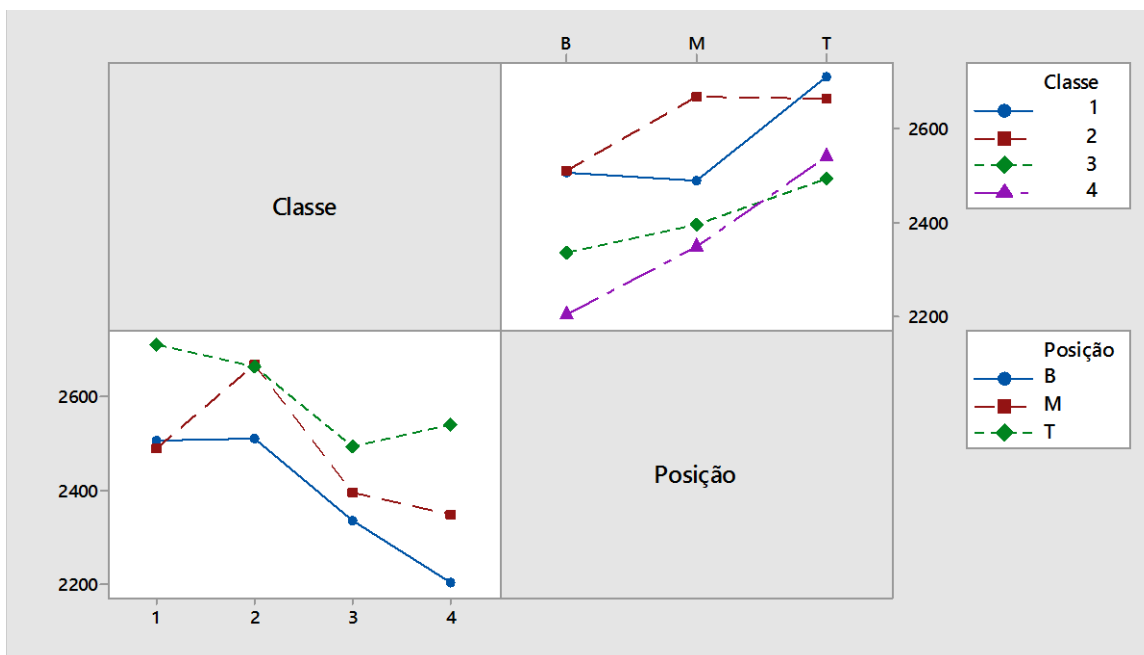


Figura 18. Interação entre as médias densidade energética (cal/cm³) em função das classes de altura e posição axial.

A figura 18 ilustra a interação significativa ao nível de 5% na posição axial em relação as classes de altura em razão da densidade energética. O gráfico classe demonstra interação significativa entre as classes C1 e C2, e entre as classes C3 e C4. No gráfico posição houve interação entre base, meio e topo. A seção topo obteve as maiores médias de densidade básica, seguindo do meio e da base. A maior variação de média foi na classe 1 posição topo com 13199 MJ/m³. A densidade energética aumentou no sentido base para topo. Seguindo o mesmo padrão da densidade básica, que se explica devido a alta concentração de feixes fibrovasculares e diminuição do tecido parenquimático (CHUNG, 2003).

4.5 PODER CALORÍFICO ÚTIL (PCU)

Os resultados da ANOVA para o poder calorífico útil, ao nível de 5% de probabilidade, estão na tabela 16.

Tabela 16. Análise de Variância (ANOVA) do poder calorífico útil com interação entre dois fatores inteiramente casualizado (classe e posição axial).

Quadro ANOVA						
FV	GL	SQ	QM	Fc	F	P
Classe	3	961657	320552	4,21	100,35**	<0,001
Posição	2	781285	390643	5,08	122,29**	<0,001
C x P	6	47931	7988	2,29	2,50*	0,347
Trat.	11	1790874	162807	2,64	50,97**	< 0,001
Resíduo	48	153326	3194			
Total	59	1944201				

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

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

^{ns} não significativo ($p \geq .05$)

FV = Fonte de variação, GL = Graus de liberdade, SQ = Soma de quadrado

QM = Quadrado médio, F = Estatística do teste F, Fc = crítico, P = probabilidade

A análise de variância da tabela 16 mostra para a classe e posição axial diferenças significativas ao nível de 1% e 5% de probabilidade para o poder calorífico útil. Ao se comparar as interações, observa-se que não houve diferença significativa ao nível de 5%.

Tabela 17. Médias do poder calorífico útil (kJ/kg) das classes e posições.

Classe (kJ/kg)	C1	C2	C3	C4
	8512 a	8474 a	7670 b	7272 c
Posição Axial (kJ/kg)	Base	Meio	Topo	
	7356 c	8076 b	8516 a	

*Valores convertidos para kJ/kg, onde $1 \text{ kJ/kg} = 0,238846 \text{ kcal/kg}$.

A classe C1 (tabela 17) obteve maior poder calorífico útil com 8512 kJ/kg, seguido de 8474 kJ/kg, 7670 kJ/kg e 7272 kJ/kg de C2, C3 e C4, respectivamente. A média geral foi de 7984 kJ/kg. O poder calorífico útil aumentou no sentido C4 para C1. Esta tendência difere do poder calorífico superior que apresentou maior energia na classe 4. Tal fato, pode ser explicado pela taxa de umidade (base úmida) presente em cada classe. Onde a classe 4 apresentou 50%, seguindo de 47,53%, 43,40% e 42,33% para C3, C2 e C1, respectivamente. Com relação às posições axiais, o topo diferiu significativa das demais, apresentando maior poder calorífico útil, com 8516 kJ/kg. Para base e meio, também houve diferença significativa, porém

a base obteve o valor menor com 7356 kJ/kg, e o meio valor intermediário 8076 kJ/kg. Esta tendência de perda de energia se explica pela alta taxa de umidade (base úmida) presente na seção base cerca de 49,29%, seguindo de 45,43% para meio e 42,53, para topo.

As relações do poder calorífico útil e as classes de altura e posições axiais estão mostradas na figura 19.

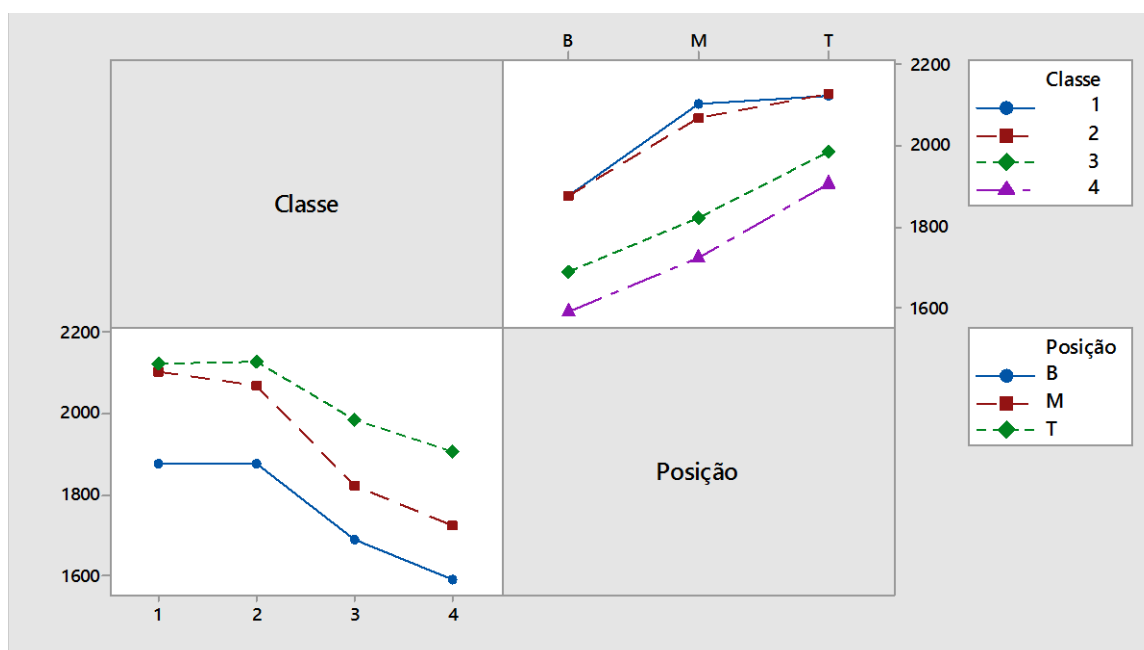


Figura 19. Relação entre as médias do PCU em função das classes de altura e posição axial.

A figura 19 ilustra a interação entre médias dos fatores classe de altura e posição axial em função do poder calorífico útil ao nível de 5% de significância. O topo apresentou maior variação quantidade de poder calorífico útil. As classes 1 e 2 obtiveram maior interação elas e maior ganho energético.

5 CONSIDERAÇÕES

A espécie *Arundo donax* L. apresenta um grande potencial para produção de biomassa lignocelulósica utilizada para gerar calor em processos térmicos (VASCONCELOS et al., 2007). Neste trabalho foi encontrado um total de 382,65 kg de biomassa verde em 30 m² somente para colmo. Uma média de 12,75 kg/m² ou 127,5 t/ha. O seu rendimento em biomassa seca foi muito expressivo. Neste estudo foi obtido uma média de 6,64 kg/m² ou 66,4t/ha. Em ambientes com condições de

tratos culturais seu incremento de biomassa anual pode chegar até 100 t/ha de acordo com Shatalove Pereira(2001), em experimento realizado na Europa.

Em estudos feitos por Moreira (2012) sobre o potencial energético com espécie de *Bambusa vulgares* se demonstrou satisfatório para utilização da espécie, obtendo uma densidade energética média de 10.665 MJ/ m³ para um plantio de 3 anos de idade. Em comparativos do potencial energético da espécie *Arundo donax* com trabalho de Moureira (2013), verificou-se valores muito próximos, com uma densidade energética média de 10.421 MJ/m³. Além do mais, as espécies amostradas neste trabalho não tiveram nenhum trato silvicultural para seu desenvolvimento. Angelini et al. (2005), apontam para esta espécie como promissora para o setor energético, pois tem rápida adaptação, baixa mortalidade, grande viabilidade de corte e transporte.

Em virtude dos resultados, fica explicito que espécie *Arundo donax* L. apresenta grande potencial para o setor energético brasileiro. Sendo bastante difundida e utilizada na Europa e Estados Unidos como fonte geradora de energia. Talvez, por pouco conhecimento, ainda não há implantação de culturas energéticas desta espécie, pois carecem de estudos mais prolongados sobre o comportamento desta espécie em outras regiões do país.

6 CONCLUSÃO

O potencial para produção de biomassa seca e de energia é promissor para o *Arundo donax* L., estimando cerca de 66,4 toneladas por hectare cheio, gerando 1.207.816 MJ/ha ou 335.504,44 kWh/ha em condições naturais, sem nenhum trato silvicultural. As posições axiais da base e meio de colmos com altura a partir de 3,19m (C2) e diâmetro a partir de 2 cm apresentaram melhor resultado para produção e bioenergia.

As classes de altura C2 e C4 apresentaram as maiores médias para poder calorífico superior com as seções axiais base e meio. As classes de altura C1 e C2, obtiveram maior densidade básica, energética e poder calorífico útil. Em consequência, foram as que juntamente com a posição topo ofereceram maior valor energético.

Para uma avaliação mais aprofundada das características ideais de utilização deste cultivar como fonte de matéria-prima para energia é necessário a implantação de um experimento para avaliar as taxas de crescimento e mortalidade, os tratos culturais ideais, bem como o rendimento ao longo dos anos de implantação.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA – ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília, 2008.

ANGELINI, L. G.; CECCARINI, L.; BONARI, E. Biomass yield and energy balance of giant reed (*Arundodonax*L.) cropped in central Italy as related to different management practices. **Eur. J. Agron.** 22, 375-389, 2005.

ANGELINI, L. G.; CECCARINI, L.; NASSO, N. N. o Di; BONARI, E. Comparison of *Arundodonax* L. and *Miscanthus x giganteus* in a long-term field experiment in Central Italy: Analysis of productive characteristics and energy balance. **Biomass and Bioenergy** 33, p. 635-643, 2009.

ASSIS, C. F. C. **Caracterização de carvão vegetal para sua injeção em altos-fornos a carvão de pequeno porte**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto – Minas Gerais, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633/84**. Carvão vegetal – Determinação do poder calorífico. São Paulo, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112/86**. Carvão vegetal – Análise Imediata. São Paulo, 1986.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2013 – **BEN**. Empresa de Pesquisa Energética. Ano base 2012: Resultados Preliminares. Rio de Janeiro: EPE, 2013.

BASSAM, N. E. Energy plant species: Their use and impact on environment and development. Ed. **James & James Science Publishers**. London, 1998. Pg. 35-37.

BASSO, M. C.; CERRELLA, E. G.; CUKIERMAN, A. L. Tratamento de águas contaminadas com metais pesados mediante carbones activados obtidos de un precursor renovable. Avances em **Energias Renovables y Medio Ambiente**. Argentina, vol. 5, ISSN 0329-5184, 2001.

BARCELLOS, D. C. **Caracterização do Carvão Vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo**. Viçosa, Minas Gerais, 2007.

BERNSEN, R. S. **Caracterização anatômica, física e mecânica de lâminas de bambu (*Phyllostachys pubescens*)**. Dissertação de Mestrado de Engenharia de Materiais. Departamento de Pesquisa e Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. *Campus* de Curitiba, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

BRACMORT, K. Biomass: Comparison of Definitions in Legislation Through the 112TM Congress. **Congressional Research Service**. November 14, 2012.

BRÁS, A. M.; MIRANDA, F.; HIPÓLITO, L.; DIAS, L. S. **Biomassa e produção de energia**. Disponível em: <http://portal.ipvc.pt/images/ipvc/esa/pdf/biomassa.pdf>. Acessado em: 15 jan. 2013.

BRITO, J. O.; et al. Estimativa da densidade a granel do carvão vegetal a partir de sua densidade aparente. IPEF: Filosofia de trabalho de uma elite de empresas florestais brasileiras. **CIRCULAR TÉCNICA** n. 150, 1982.

BRITO, J. O. Expressão da produção florestal em unidades energéticas. In CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1, CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7, 1993, Curitiba, **Anais**. Curitiba, p. 280-82, 1993.

BUBU, A. Biomassa: uma energia brasileira. **Revista Eco** 21. Rio de Janeiro, v. 93, n. 8, ago. 2004.

Cal-IPC – California Invasive Plant Council. *Arundo donax* (giant reed): Distribution and Impact Report. **State Water Resources Control Board**. Nº 06-374-559-0. California, p. 238, 2011.

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração Florestal**. 4ª edição. Editora. UFV. 605p. 2013.

CARASCHI, J. C.; PINEIRO, D. G.; VENTORIM, G. **Caracterização física e química dos pellets de madeira produzidos no Brasil**. UFES/Vitória, 2012.

CARDOSO, M. T. **Desempenho de um sistema de forno-fornalha para combustão de gases na carbonização da madeira**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa – Minas Gerais, 2010.

CASTRO, A. F. N. M. **Efeito da idade e de matérias genéticos de *Eucalyptus sp.* na madeira e carvão vegetal.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa – Minas Gerais, 2011.

CAVALCANTI, R. B.; SILVA J. M. C. **DISTRITO FEDERAL.** Região Centro-Oeste, 2011.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA – CENBIO. Conceituando biomassa. Disponível em: <http://cenbio.iee.usp.br/saibamais/conceituando.htm>. Acesso em: 20 dez. 2012.

CHAVES, A. M. B.; VALE, A. T.; MELIDO, R. C. N.; ZOCH, V. P. Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de *Eucalyptus spp.* **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA.** Centro Científico Conhecer – Goiânia, v. 9, n. 17, p. 533, 2013.

CHUNG, Z. F. The production and utilization of bamboo forest in China. **Hangozhou:** CBRC – China National Bamboo Research Center, Hangzhou, 2003.

COELHO, D. S. C. **Estudo sistemático da composição químicas das fibras de *Arundo donax* e a sua evolução durante a produção de pasta de papel através do processo organo solvente.** Universidade de Aveiro, 2005.

COUTO, C. M.; PILOTTO, M. V. T.; GATTO, D. A.; BELTRAME, R. ESTIMATIVA DO PODER CALORÍFICO DE MADEIRAS DE *Acacia mearsii* E *Eucalyptus grandis*. **XXI Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Pelotas,** Pelotas, 2013.

CSURHES, S. **Giant reed. *Arundo donax*.** Queens land Primary Industries and Fisheries. August, 2009.

DEZAJACOMO, G. **Caracterização de biomassa vegetal para fins energéticos. Trabalho de graduação do Curso de Engenharia Industrial.** Itapeva, 2010.

Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária – EMBRAPA. **Potencial do capim-elefante para produção de energia renovável.** Disponível em: <http://www.embrapa.br/imprensa/artigos/2012/potencial-do-capim-elefante-para-producao-de-energia-renovavel/>. Acesso em: 12 dez. 2012.

FERREIRA, G. C. S. **Vigas de concreto armadas com taliscas de bambu. *Dendrocalamus giganteus***. Tese de doutorado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, SP, 2007.

FOELKEL, C. E. B.; BRASIL, M. A. M.; BARRICHELO, L. E. G. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **O Papel** 33(3): 57-61, 1972.

GARCIA, D. P. **Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. Guaratinguetá, 2010.

GOULART, M.; HASELEIN, C. R.; HOPPE, J. M.; FARIAS, J. A.; PAULESKI, D. T. Massa específica básica e massa seca de madeira de *Eucalyptus grandis* sob o efeito do espaçamento de plantio e da posição axial no tronco. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 167-175, 2003.

Global Terrestrial Observing System – GTOS. **Biomass assessment of the status of the development of the standards for the terrestrial essential climate variables**. Rome, 2009.

HALL, D. O.; HOUSE, J. I.; SCRASE, I. Overview of biomassa energy. In: ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. **Industrial uses of biomass energy: the example of Brazil**. London: Taylor & Francis, 2000.

HERZOG, A. V.; LIPMAN, T. E.; KAMMEN, D. M. Renewable energy sources. **Energy and Resources Group**. University of California, Berkeley, USA, 2001.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. Technology roadmap: **Bioenergy for Heat and Power**. OECD/IEA, Paris/France, 2012.

JACKSON, G. C.; NUNEZ, J. R. Identification of silica present in the giant reed (*Arundo donax*). **Journal of the Agricultural University**, Puerto Rico, 1964

JARA, E. R. P. O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil. São Paulo: **Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT**, 1989.

JEGUIRIM, M.; DORGE, S. TROUVÉ, G. Thermogravimetric analysis and emission characteristics of two energy crops in air atmosphere: *Arundo donax* and *Miscanthus giganteus*. **Biouresource Technology**, vol. 191, pg. 788-793, 2010.

KLAUTAU, J. von P. **Análise experimental de uma fornalha a lenha de fluxo co-corrente para secagem de grãos.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2008.

LANDIM, A. B.; et al. Sistema de Recuperação de Biomassa. **Revista da Madeira.** Edição nº 104. Abril, 2007.

LEWANDOWSKI, I.; SCURLOCK, J. M. O.; LINDVALL, E.; CHRISTOU, M. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe **Biomass and Bioenergy** 25, p. 335-361, 2003.

LIMA, E. A. Alternativa para estimar o preço da madeira para energia. **Comunicado Técnico.** Colombo: Embrapa Florestas, PR, dezembro, 2010.

LIMA, E. A. de; ABDALA, M.; WENZEL, A. Influência da umidade no poder calorífico superior da madeira. **Comunicado Técnico.** Colombo: Embrapa Florestas, PR, dezembro, 2008.

LI, X. Physical, **Chemical, and Mechanical Properties of bambu and its utilization potencial for fiberboard manufacturing.** Tese (Master of Science in Renewable Natural Resourcec) – Faculty of Agriculture and Mechanical College, Louisiana State University, Lousiana. 68 p., 2004.

MACIEL, A. **Jornal da Energia:** Brasil lidera ranking mundial de uso da biomassa na produção de energia. 2013. Disponível em <http://www.jornaldaenergia.com.br/ler_noticia.php?id_noticia=14825>. Acesso em: 3 de abril de 2014.

MAVROGIANOPOULOS, G.; VOGLI, V.; KYRITSIS, S. Use of wastewater as a nutriente solution in a closed gravel hydroponic culture of giant reed (*Arundo donax*). **J. Environ. Monit.**, 2001.

MARCHANTE, E; MARCHANTE, H. **Poaceae (= Gramineae).** Coimbra, 2005.

MARQUES, S. S.; et al. Estudo comparativo da massa específica aparente e retratibilidade da madeira de pau-brasil (*Caesalpiniae chinata* lam.) nativa e de reflorestamento. **Revista Árvore,** Viçosa-MG, vol. 36, núm. 2, p. 373-380, 2012.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology** 83, 37-46, 2002.

MOERS, E. M.; VIEIRA, A. C.; FERNANDES, D. M.; SOUZA, S. N. M.; BARICCATTI, R. A. Caracterização da biomassa residual proveniente de resíduos agrícolas para geração de energia. **I COLASSA** – Congresso Latino Americano de Suinocultura e Sustentabilidade Ambiental, Foz do Iguaçu, 2011.

MOREIRA, A. C. O. **Caracterização de *Bambusa vulgaris* Schard. ex J.C. Wendl. var. vulgaris, e dos Resíduos de Caldeira no Processo de Conversão Térmica de Energia.** Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.DM-188/2012, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, DF, 72p., 2012.

NICHOL, C.; WESTOVER, T. L. *Arundo donax* Test Results. Idaho National Laboratory – INL, **Department of Energy National Laboratory**, U.S., Idaho, 2012.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. S. **Dendroenergia: Fundamentos e Aplicações.** Editora Interciência. 2ª ed, 2003.

OAKINS, A. J. **An Assessment and Management Protocol for *Arundo donax* in the Salinas Valley Watershed.** California, USA, 2001.

OLIVEIRA, J. B.; 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, T. K. de. **Sistema agrossilvipostoril com eucalipto e braquiária sob diferentes arranjos estruturais em área de Cerrado.** Tese de Doutorado em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras: UFLA, 150p. 2005.

PALHARES, D. **2G na Cabeça.** O Brasil marca presença na corrida tecnológica rumo ao álcool celulósico, de segunda geração. Revista PIB. p. 49, ano V, número 23, jul/ago 2013. Disponível em: <<http://www.revistapib.com.br/pdf/PIB-ed23.pdf>>. Acesso em: 21 de dezembro de 2013.

PERDUE, R. E. *Arundo donax* – Source of musical reeds and industrial cellulose. **Economic Botany**, vol. 12, n. 4, p. 368 – 404, 1958.

PIMENTA, A. S.; BARCELLOS, D.C.; OLIVEIRA, E. **Carbonização**. Viçosa/ MG, 2008.

PHYTOS. **Arundo donax L. uma espécie potencial para o desenho do agroecossistema.** Disponível em: <http://fitos-phytos.blogspot.com.br/2009/02/arundo-donax-l-uma-especie-potencial.html>>. Acesso em: 01 jan. 2013.

RENDEIRO, G.; et al. Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida. **Soluções Energéticas para a Amazônia. Brasília:** Ministério de Minas e Energia. 192p., 2008.

SALOMOM, K. R.; FILHO, G. L T. **Dendroenergia**. Itaubá, MG: FAPEFE, 2007.

SANTOS, J. M. C. F. **Avaliação da biomassa de plantas bioenergéticas.** Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Agronomia. Universidade Técnica de Lisboa, 2009.

SANTOS, P. G. C. **Desenvolvimento de um queimador em leito fluidizado borbulhante para queima de biomassa. Adaptação a caldeira pré-existente.** Dissertação Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Lisboa, 2009.

SILVA, E. **Biomassa cultivada para produção de energia: estudo comparativo entre capim elefante e eucalipto com a incorporação da energia solar na secagem.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá – Minas Gerais, 2012.

SILVA, E.; ROCHA, C. R. Eucalipto e campim elefante: características e potencial produtivo de biomassa. **Revista Agrogeoambiental**. Abril, 2010.

SIMÕES, K. C. C. **Ocorrência e caracterização da espécie invasora Arundo donax L. (CANA-DO-REINO) no Distrito Federal, Brasil.** Dissertação de Mestrado (UnB-IB-Dep. Ecologia), 2013.

SHATALOV, A. A. PEREIRA, H. *Arundo donax L. (giant reed) as a source off ibres for paper industry: perspectives for modern ecologically friendly pulping Technologies.* In: Kyritsis, S.; BEENACKERS, A. A. C. M.; HELM, P. GRASSI, A. CHIARAMONTI, D. editors. *Biomass of Energy and Industry: Procceding of the First*

World Conference, Sevilha, Spain, 2000. London: James & James (**Science Publishers**) Ltd., 2001.

SMITH, D. M. Maximum moisture content method for determining specific gravity of small samples. Madison, **Forest Products Laboratory**, 1954, 8 p.

STARR, R.; STARR, K.; LOOPE, L. *Arundo donax*. **United States Geological Survey – Biological Resources Division**. Haleakala Field Station, Maui, Hawai'i. January, 2003.

TROSSERO, M. A. Programa energia derivada de lamadera. **Boletín del CIDEU** 5: 3-6, 2008.

VASCONELOS, G. C.; COMES, J. C. C. Propagação assexuada da cana-do-reino (*Arundo donax* L.). **Comunicado Técnico 158**, ISSN 1806-9185. Pelotas, RS. Abril, 2007.

VASCONCELOS, G. C.; GOMES, J. C. C.; CORRÊA, L. A. V. Rendimento de Biomassa da Cana-do-Reino (*Arundodonax* L.). Pelotas: **Embrapa Clima Temperado**, 2007. 23 p.

VAZ JUNIOR, S. Biorrefinarias: cenários e perspectivas. Brasília. DF: **Embrapa Agroenergia**, 2011.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. Cascavel, PR:UNIOESTE, 2012.

VITAL, B. R. Métodos para determinação do teor de umidade da madeira. Viçosa, MG: SIF, 1997. 33 p. (**Boletim técnico** SIF, 13).

VITAL, R. R. Métodos de determinação da densidade da madeira. Viçosa: SIF, 1984. 21 p. (**Boletim Técnico**, 2).

ZANETTI, G. D. **Lectina dos rizomas de *Arundo donax* I.: purificação, caracterização, propriedades, imuno-histoquímica e separação das isoformas**. Tese de Doutorado. Porto Alegre, RS, 2007.

ZONEAMENTO ECOLÓGICO-ECONÔMICO DO DISTRITO FEDERAL – ZEE/DF. **Plano de Trabalho**. 2009.