**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Avaliação tecnológica de clones-elite de *Eucalyptus* spp.,
crescendo no Estado de Goiás: qualidade do lenho para
produção de polpa celulósica Kraft**

Deborah Rodrigues de Souza Santos

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Programa: Recursos
Florestais. Área de concentração: Tecnologia de
Produtos Florestais

**Piracicaba
2018**

Deborah Rodrigues de Souza Santos
Bacharela em Engenharia Florestal

Avaliação tecnológica de clones-elite de *Eucalyptus* spp., crescendo no Estado de Goiás: qualidade do lenho para produção de polpa celulósica Kraft
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **MATHEUS PERES CHAGAS**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Programa: Recursos
Florestais. Área de concentração: Tecnologia de
Produtos Florestais

Piracicaba
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Santos, Deborah Rodrigues de Souza

Avaliação tecnológica de clones-elite de *Eucalyptus* spp., crescendo no Estado de Goiás: qualidade do lenho para produção de polpa celulósica Kraft / Deborah Rodrigues de Souza Santos. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011- -Piracicaba, 2018.

165 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Qualidade do lenho 2. Densitometria de raios X 3. Parâmetros de crescimento e produtividade 4. Variação longitudinal e radial das propriedades físicas e anatômicas 5. Cozimento Kraft I. Título

***Dedico este trabalho ao meu pai,
Deusair Rodrigues dos Santos,
pelo incentivo e inspiração maior***

AGRADECIMENTOS

Ao Superior, às forças que regem o Universo e aos seres iluminados, que, de alguma forma, interferem em nossa existência e sentido maior;

Gratidão maior à minha família, pelo amor incondicional e pelo apoio sempre presente ao longo desta minha caminhada: ao meu pai, Deusair, a minha mãe, Flor, aos meus irmãos, Daniel e Fernanda e aos meus cunhados, irmãos de coração, Maurício e Arisa;

Ao Matheus Peres Chagas, enormemente, pela inigualável orientação, por todo o companheirismo nos grandes desafios e obstáculos superados, e principalmente, por “estender a mão” no momento mais necessário;

A ESALQ-USP, pelas oportunidades e por todo o suporte nos âmbitos profissional e pessoal;

À CAPES, pelo auxílio financeiro;

Ao professor Mário Tomazello, pelo apoio, disponibilidade e ensinamentos, essenciais ao desenvolvimento deste trabalho;

Ao professor Evandro Novaes e à toda equipe associada ao desenvolvimento do teste clonal de eucalipto em Goiás, pelo qual a presente pesquisa pôde ser desenvolvida;

Aos LAIM, LQCE e LQMBio, por todo o suporte estrutural na realização das análises experimentais e aos professores e técnicos envolvidos, em especial ao técnico auxiliar Aparecido Siqueira, pelo imensurável apoio, e ao técnico Macksuel Fernandes, pela disponibilidade e amizade;

Ao Rafael Fernandes, pela enorme contribuição com a realização de uma importante etapa do trabalho e, igualmente, à Júlia Lobo, por todo o auxílio e dedicação nas análises associadas.

À Camila Sarto, pelos fundamentais ensinamentos experimentais do trabalho e aos Lucas Pereira, Regina Gomes e Izabela Filizola, por todo o auxílio e amizade;

Ao Departamento de Agroindústria, Alimentos e Nutrição (LAN), em nome de Eric Alberto e Gabriela Maria Ferreira, pelo suporte e auxílio na realização de análises químicas;

Aos Carlos de Melo e Carlos Roberto Sette Jr., pelo fundamental apoio nas análises estatísticas;

À Alinne Santos, pela amizade incondicional. Obrigada por ter tornado essa fase da minha vida mais doce, divertida e feliz, “princess”;

À Thaís Letícia Santos, por ser minha melhor conselheira e por toda a parceria e amizade;

À minha prima Nayara Rodrigues, pelo imenso amor e amizade, e a todos os familiares e amigos distantes, que ainda assim, estiveram sempre presentes de alguma forma;

Ao pessoal da vila estudantil, pela amistosa recepção, em especial à Lucianne Paes, pelo carinho e amizade;

À equipe do DVATCOM-ESALQ/USP, pelo grandioso suporte;

Aos professores envolvidos nas disciplinas cursadas durante o mestrado, pela excelente didática e dinâmica das aulas, que proporcionaram enormes conhecimento e proveito: Jean Pierre, Yann Nouvellon, Fidel Alejandro Roig, Marcos Sorrentino, Geraldo Bortolletto Jr. e Ivaldo Pontes Jankowsky.

À secretária Giovana Monteiro, pelos conselhos e essencial assistência.

A todos os colegas de trabalho, parceiros do dia-a-dia e dos momentos de lazer;

À todas as pessoas que, de forma direta ou indireta, contribuíram para que este trabalho fosse realizado, o meu muito obrigada.

*“However difficult life may seem,
there is always something you can do and succeed at.
It matters that you don’t just give up”.*

Stephen Hawking

SUMÁRIO

RESUMO.....	10
ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	12
LISTA DE TABELAS	16
1. INTRODUÇÃO	19
2. OBJETIVOS	23
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
3.1. O Gênero <i>Eucalyptus</i>	25
3.2. Descrição das espécies de <i>Eucalyptus</i> estudadas e aptidão climática no Brasil	27
3.2.1. <i>Eucalyptus grandis</i> (Hill) Maiden.....	27
3.2.2. <i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake.....	27
3.2.3. <i>Eucalyptus pellita</i> F. Muell.....	28
3.2.4. <i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dehnh	29
3.2.5. <i>Eucalyptus tereticornis</i> Smith	30
3.3. Estado de Goiás: relevância no cenário nacional do setor de florestas plantadas	33
3.4. Seleção de clones superiores de <i>Eucalyptus</i> spp. voltados à indústria de celulose.....	36
3.5. Redes de testes clonais de <i>Eucalyptus</i> spp. no Estado de Goiás	39
3.6. Propriedades da madeira de <i>Eucalyptus</i>	41
3.6.1. Densidade básica e aparente	41
3.6.2. Características anatômicas.....	43
3.6.3. Características químicas.....	46
3.7. Qualidade da madeira de <i>Eucalyptus</i> spp. para produção de polpa celulósica	48
3.8. Processo Kraft de polpação.....	53
4. MATERIAL E MÉTODOS	55
4.1. Caracterização do teste clonal de <i>Eucalyptus</i> spp.	55

4.2. Seleção dos híbridos de <i>Eucalyptus</i> spp.....	57
4.3. Seleção das árvores do estudo e coleta das amostras do lenho	57
4.4. Determinação dos parâmetros de crescimento e de produção	60
4.5. Densidade básica e densidade aparente do lenho.....	61
4.5.1. Densidade básica	61
4.5.2. Densidade aparente	62
4.5.2.1. Obtenção dos perfis radiais de densidade aparente do lenho em diferentes posições longitudinais	62
4.5.2.2. Análise qualitativa do lenho	63
4.6. Características anatômicas do lenho	64
4.6.1. Morfologia das fibras	64
4.6.2. Morfologia dos vasos	66
4.7. Composição química.....	67
4.8. Cozimento Kraft.....	68
4.8.1. Preparo do material.....	68
4.8.2 Cozimentos testes.....	69
4.8.3 Curvas de cozimento.....	69
4.8.4 Caracterização da polpa Kraft.....	72
4.8.5 Caracterização do licor negro	72
4.9. Análise estatística dos dados	73
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
5.1. Parâmetros de crescimento e de produtividade das árvores de <i>Eucalyptus</i> spp.	75
5.2. Densidade básica e densidade aparente do lenho das árvores de <i>Eucalyptus</i> spp.	77
5.2.1 Densidade básica.....	77
5.2.2. Densidade aparente	81
5.3. Características anatômicas do lenho das árvores de <i>Eucalyptus</i> spp.....	93
5.3. Dimensões das fibras	93
5.3.1. Índices de qualidade das fibras para celulose e papel.	103
5.3.2. Dimensões e frequência dos vasos.....	105
5.4. Caracterização química do lenho das árvores de <i>Eucalyptus</i> spp.	111
5.5. Polpação Kraft.....	114

5.5.1. Curvas de cozimento para obtenção do Kappa $\pm$ 18	114
5.5.2 Aspectos de produtividade e eficiência dos cozimentos Kraft	121
5.6. Análise de componentes principais (ACP)	123
6. CONCLUSÕES	129
7. RECOMENDAÇÕES	133
REFERÊNCIAS	135
APÊNDICES	159

RESUMO

Avaliação tecnológica de clones-elite de *Eucalyptus* spp., crescendo no Estado de Goiás: qualidade do lenho para produção de polpa celulósica Kraft

O setor florestal brasileiro prevê forte expansão das florestas plantadas de eucalipto, o que torna essencial estudos que indiquem materiais genéticos superiores e adaptados a novas fronteiras regionais. O estado de Goiás tem se destacado como um território com grande potencial ao estabelecimento e expansão de novos plantios. Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo a avaliação tecnológica de clones-elite de *Eucalyptus* spp., oriundos de um teste clonal instalado no município de Luziânia- GO, com foco na qualidade do lenho para produção de polpa celulósica Kraft. Do total de materiais genéticos do teste clonal, foram selecionados 6 clones híbridos de *Eucalyptus* spp, na idade de 4 anos, e cortadas 5 árvores de cada clone, obtendo-se discos de madeira em 6 posições longitudinais (0% (base), DAP, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial) e 4 toretes (± 50 cm de comprimento) em posições intermediárias. Os discos de madeira foram utilizados na determinação das características físicas, químicas e anatômicas dos clones e os toretes, transformados em cavacos, submetidos à polpação Kraft e avaliadas as características do cozimento. Os resultados indicam grande variabilidade entre os clones nas características avaliadas. Os seis clones diferiram quanto ao crescimento e volume, com destaque para os clones A, B, C e F, de melhores desempenho. Os valores médios de densidade básica ponderada observados para os clones de estudo ($0,46-0,50 \text{ g/cm}^3$), se encontram dentro da faixa considerada ideal para a produção de celulose. Foram observados valores médios de densidade aparente entre $0,56$ e $0,65 \text{ g/cm}^3$, sendo o maior valor verificado para o clone E. Em geral, foi observado efeito significativo apenas na variação radial das propriedades físico-anatômicas. A caracterização química do lenho dos seis clones indica potencialidade tecnológica para produção de celulose Kraft, com destaque ao clone E. Os melhores desempenhos na polpação kraft para $Kappa \pm 18$, foram alcançados com os clones E e F. Os clones de *Eucalyptus* spp. do estudo, em sua maioria, apresentaram excelente adaptabilidade local e satisfatórias propriedades do lenho quanto à transformação tecnológica em polpa celulósica Kraft. O clone E, que apresentou menor teor de extrativos e maior teor de holocelulose em sua constituição, além de bom desempenho no processo de polpação Kraft, bem como o clone F, que obteve os melhores índices de crescimento e produtividade e satisfatórias características físicas, anatômicas e tecnológicas, foram indicados como os de maior potencial para a produção de celulose. Ressalta-se a importância de se desenvolver pesquisas futuras nos materiais em idade mais avançada, visando melhor qualificar a adaptação local, bem como a qualidade do lenho, em busca de maior alcance no desempenho e eficiência produtiva do processo de polpação celulósica.

Palavras-chave: Variação anatômica; Cozimento Kraft; Análise físico-química; Produtividade

ABSTRACT

Technological assessment of *Eucalyptus* wood elite clones growing in Goiás State: wood quality for kraft pulp production

The Brazilian forestry sector foresees a strong expansion of *Eucalyptus* forests, which makes essential studies indicating superior genetic material and adapted to new borders. Goiás state has stood out as a territory with great potential for the establishment and expansion of new forest plantations areas. In this sense, the aim of the present work was to evaluate the technological performance of *Eucalyptus* wood elite clones from a clonal test installed in the municipality of Luziânia-GO, focusing on the wood quality for kraft pulping. From the total genetic material of the clonal test, 6 *Eucalyptus* wood hybrid clones, at 4 years-old, were selected and 5 trees of each clone were cut, obtaining wooden discs in 6 longitudinal positions (0% (base), DBH, 25%, 50% , 75% and 100% of commercial height) of trunk. Also, 4 logs of 50 cm in length between the base and 100% of the commercial height. The wood discs were used for determining the physical, chemical and anatomical wood characteristics and the short logs were transformed into wood chips for kraft pulping that whose characteristics were evaluated. The results indicate a high variability among the clones. All clones differed in volume growth, especially clones A, B, C and F, with the best performances. The average values of weighted basic density observed in *Eucalyptus* spp. clones ($0.46\text{-}0.50\text{ g/cm}^3$) are within the range considered ideal for the kraft pulping production. Average values of apparent density were observed between 0.56 and 0.65 g / cm^3 , being the highest value verified for clone E. In general, a significant effect of radial position of the trunk was observed only for physical-anatomical properties. The wood chemical characterization indicates, for all clones, technological potential for kraft pulp production, especially for clone E, with lower content of extractives and higher content of holocellulose,. The best performances of kappa number 18 of kraft pulping were observed in clones E and F. *Eucalyptus* wood clones, presented excellent adaptability and great wood technological properties. The clone E, which presented besides good performance in the kraft pulping process, as well as clone F, which obtained the best rates of growth and productivity and satisfactory physical, anatomical characteristics, were the ones with the best kraft pulping potencial. Future researches with the same *Eucalyptus* spp. trees at advanced ages are recommended, in order to provide a better information of local adaptation as well wood quality, in search of greater reach in the performance and productive efficiency of the kraft pulping process.

Keywords: Wood anatomical variation; Kraft pulping; Physical and chemical analysis; Wood productivity

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ocorrência natural na Austrália e aptidão climática no Brasil de <i>Eucalyptus grandis</i> (a), <i>Eucalyptus urophylla</i> (b), <i>Eucalyptus pellita</i> (c), <i>Eucalyptus camaldulensis</i> subsp. <i>obtusa</i> (d), <i>Eucalyptus camaldulensis</i> subsp. <i>simulata</i> (e) e <i>Eucalyptus tereticornis</i> (f).	32
Figura 2. Localização geográfica dos testes clonais com <i>Eucalyptus</i> , no Estado de Goiás.	40
Figura 3. Imagens da área experimental: teste clonal de <i>Eucalyptus</i> spp. em Luziânia, Goiás, aos 4 anos de idade.	56
Figura 4. Médias mensais de temperatura (°C) e de precipitação acumulada (mm) dos últimos 30 anos para o município de Luziânia-GO.	56
Figura 5. Croqui da amostragem de árvores dos seis híbridos de <i>Eucalyptus</i> spp. selecionados.	59
Figura 6. Esquema representativo da amostragem no tronco das árvores e correspondentes análises.	60
Figura 7. Determinação dos parâmetros de crescimento dos híbridos de <i>Eucalyptus</i> spp. A) Mensuração das alturas total e comercial das árvores. B) Demarcação das posições para retirada dos discos/toras e cubagem.	60
Figura 8. Determinação da densidade básica da madeira dos híbridos de <i>Eucalyptus</i> spp. A) Corpos-de-prova confeccionados. B) Corpos-de-prova em processo de saturação. C) Dispositivo para aferição do peso imerso. D) Aferição do peso imerso.	61
Figura 9. Determinação da densidade aparente do lenho das árvores de <i>Eucalyptus</i> spp. através da densitometria de raios-X. A) Preparo das amostras- corte e colagem em suporte de madeira. B) Equipamento de raios- X e encaixe das amostras no suporte metálico. C) Varredura e perfil de densidade aparente das amostras de diferentes posições longitudinais.	63
Figura 10. Avaliação qualitativa dos perfis radiais do lenho. A) Equipamento de raios-X. B) Amostras dispostas na câmara de radiação. C) Imagens digitais das amostras do lenho, geradas em escala de cinza.	64

- Figura 11. Preparo das amostras de madeira para maceração, em laboratório. A) Fragmentos de madeira em tubos com solução de ácido acético e peróxido de hidrogênio. B) Amostras em estufa à temperatura de 60 ° C.65
- Figura 12. Processo de confecção de lâminas histológicas temporárias e de mensuração de fibras. A) Reagentes utilizados na confecção das lâminas. B) Montagem de lâmina com material macerado. C) Obtenção das imagens das fibras através do software do microscópio estereoscópico Leica.65
- Figura 13. Fibras dissociadas de *Eucalyptus*. Imagens obtidas através do software do microscópio. A) Fibras em ampliação de 40x. B) Fibras em ampliação de 400x. C) Mensuração de fibras no software Image-Pro Plus.....66
- Figura 14. Preparo das amostras para a análise morfológica dos vasos do lenho. A) Amostras coladas em suporte de madeira. B) Amostras no processo de polimento com lixas abrasivas.67
- Figura 15. Determinação da composição química dos materiais de estudo. A) Serragem destinada aos ensaios químicos. B) Determinação do teor de extrativos em soxhlet. C) Autoclave utilizada nos ensaios para a determinação do teor de lignina. D) Espectrofotômetro utilizado nos ensaios para a determinação de lignina solúvel. E) Determinação do teor de cinzas em mufla.68
- Figura 16. Cozimento Kraft dos materiais de estudo. A) Cozimento em autoclave rotativa. B) Amostra composta de cavacos.70
- Figura 17. Etapas pós-cozimento das polpas celulósicas dos materiais de estudo. A) Polpa celulósica lavada B) Desagregação da polpa celulósica em “hidrapulper” laboratorial. C) Reacondicionamento da polpa celulósica em sacos de microfibras e centrifugação. D) Depurador laboratorial com fenda de 0,2 mm.71
- Figura 18. Perfil radial da densidade aparente ao longo do tronco (base, DAP, 25%, 50% 75% e 100%) de uma árvore representativa do clone A (*E. grandis* x *E. urophylla*). Imagens das seções transversais das amostras diametraais obtidas em scanner e em equipamento Faxitron X-ray (imagens radiográficas).83
- Figura 19. Perfil radial da densidade aparente ao longo do tronco (base, DAP, 25%, 50% 75% e 100%) de uma árvore representativa do clone B (híbrido espontâneo de

<i>E. urophylla</i>). Imagens das seções transversais das amostras diametraais obtidas em scanner e em equipamento Faxitron X-ray (imagens radiográficas).....	84
Figura 20. Perfil radial da densidade aparente ao longo do tronco (base, DAP, 25%, 50% 75% e 100%) de uma árvore representativa do clone C (<i>E. pellita</i> x <i>E. grandis</i>). Imagens das seções transversais das amostras diametraais obtidas em scanner e em equipamento Faxitron X-ray (imagens radiográficas).	85
Figura 21. Perfil radial da densidade aparente ao longo do tronco (base, DAP, 25%, 50% 75% e 100%) de uma árvore representativa do clone D (<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. tereticornis</i>). Imagens das seções transversais das amostras diametraais obtidas em scanner e em equipamento Faxitron X-ray (imagens radiográficas).....	86
Figura 22. Perfil radial da densidade aparente ao longo do tronco (base, DAP, 25%, 50% 75% e 100%) de uma árvore representativa do clone E (<i>E. grandis</i> x (<i>E. urophylla</i> x <i>E. tereticornis</i>)). imagens das seções transversais das amostras diametraais obtidas em scanner e em equipamento Faxitron X-ray (imagens radiográficas).....	87
Figura 23. Perfil radial da densidade aparente ao longo do tronco (base, DAP, 25%, 50% 75% e 100%) de uma árvore representativa do clone F (<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>). Imagens das seções transversais das amostras diametraais obtidas em scanner e em equipamento Faxitron X-ray (imagens radiográficas).....	88
Figura 24. Modelos de variação longitudinal da densidade básica e densidade aparente dos seis clones de <i>eucalyptus</i> spp. 1= densidade básica; 2= densidade aparente. * significativo ($p<0,05$).	92
Figura 25. Modelos de variação longitudinal das dimensões das fibras dos seis clones de <i>Eucalyptus</i> spp. A) Comprimento. B) Largura. C) Espessura da parede. D) Diâmetro do lume.	99
Figura 26. Modelos de variação radial das dimensões das fibras dos seis clones de <i>Eucalyptus</i> spp. A) Comprimento. B) Largura. C) Espessura da parede. D) Diâmetro do lume. * significativo ($p<0,05$).....	101
Figura 27. Modelos de variação radial das dimensões dos vasos dos seis clones de <i>Eucalyptus</i> spp. A) Diâmetro tangencial. B) Porcentagem de área. C) Frequência. * significância ($p<0,05\%$).....	110

Figura 28. Modelos de regressão do número kappa em função do álcali ativo aplicado, dos seis clones de *Eucalyptus* spp. A) Clone A (*E. grandis* x *E. urophylla*). B) Clone B (híbrido espontâneo de *E. urophylla*). C) Clone C (*E. pellita* x *E. grandis*). D) Clone D (*E. camaldulensis* x *E. tereticornis*). E) Clone E (*E. grandis* x (*E. urophylla* x *E. tereticornis*)). F) Clone F (*E. urophylla* x *E. grandis*) 116

Figura 29. Modelos de regressão do rendimento depurado em função do álcali ativo aplicado, dos seis clones de *Eucalyptus* spp. A) Clone A (*E. grandis* x *E. urophylla*). B) Clone B (híbrido espontâneo de *E. urophylla*). C) Clone C (*E. pellita* x *E. grandis*). D) Clone D (*E. camaldulensis* x *E. tereticornis*). E) Clone E (*E. grandis* x (*E. urophylla* x *E. tereticornis*)). F) Clone F (*E. urophylla* x *E. grandis*) 117

Figura 30. Modelos de regressão do álcali consumido em função do álcali ativo aplicado, dos seis clones de *Eucalyptus* spp. A) Clone A (*E. grandis* x *E. urophylla*). B) Clone B (híbrido espontâneo de *E. urophylla*). C) Clone C (*E. pellita* x *E. grandis*). D) Clone D (*E. camaldulensis* x *E. tereticornis*). E) Clone E (*E. grandis* x (*E. urophylla* x *E. tereticornis*)). F) Clone F (*E. urophylla* x *E. grandis*). 118

Figura 31. Análise de componentes principais das variáveis anatômicas de fibras (comprimento, largura, espessura da parede e diâmetro do lume) e vasos (diâmetro tangencial, frequência e vasos/mm²), químicas e da densidade básica dos seis clones de *Eucalyptus* spp. diâmetro= diâmetro tangencial dos vasos; a= *E. grandis* x *E. urophylla*; b= híbrido espontâneo de *E. urophylla*; c= *E. pellita* x *E. grandis*; d= *E. Camaldulensis* x *E. tereticornis*; e= *E. grandis* x (*E. urophylla* x *E. tereticornis*); f= *E. urophylla* x *E. grandis*. 124

Figura 32. Análise de componentes principais da densidade básica, parâmetros dendrométricos (HC, DAP, IMACEL) e parâmetros do cozimento kraft (rendimento depurado, sulfidez, álcali ativo consumido, álcali ativo aplicado e teor de sólidos) dos seis clones de *Eucalyptus* spp. imacel= incremento médio anual de celulose; dap= diâmetro à altura do peito; hc= altura comercial; aaa= álcali ativo aplicado; aac= álcali ativo consumido; a= *E. grandis* x *E. urophylla*; b= híbrido espontâneo de *E. urophylla*; c= *E. pellita* x *E. grandis*; d= *E. Camaldulensis* x *E. tereticornis*; e= *E. grandis* x (*E. urophylla* x *E. tereticornis*); f= *E. urophylla* x *E. grandis*. 127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características tecnológicas de clones de <i>Eucalyptus</i> spp.....	53
Tabela 2. Atributos químicos do solo da área experimental	55
Tabela 3. Procedência e parâmetros de crescimento dos híbridos de <i>Eucalyptus</i> spp. selecionados (24 meses de idade).	57
Tabela 4. Condições dos cozimentos testes pelo processo de polpação kraft.	69
Tabela 5. Condições do cozimento kraft para obtenção das curvas características de cada material genético.....	71
Tabela 6. Parâmetros avaliativos da polpa celulósica kraft.	72
Tabela 7. Valores médios para as características de crescimento e de produtividade dos seis clones de <i>Eucalyptus</i> spp., aos 4 anos.....	76
Tabela 8. Valores médios de densidade básica e densidade básica ponderada dos seis clones de <i>Eucalyptus</i> spp.	78
Tabela 9. Valores médios e modelos de variação da densidade básica por posição longitudinal do tronco dos seis clones de <i>Eucalyptus</i> spp.	80
Tabela 10. Valores médios de densidade aparente dos seis clones de <i>Eucalyptus</i> spp.	81
Tabela 11. Valores médios de densidade aparente por posição longitudinal do tronco dos seis clones de <i>Eucalyptus</i> spp.	90
Tabela 12. Valores médios das dimensões das fibras dos seis clones de <i>Eucalyptus</i> spp.	93
Tabela 13. Valores médios, R^2 e equações de regressão da variação longitudinal das dimensões das fibras dos seis clones de <i>Eucalyptus</i> spp.	96
Tabela 14. Índices de qualidade das fibras dos seis clones de <i>Eucalyptus</i> spp.	103
Tabela 15. Valores médios das dimensões dos vasos dos seis clones de <i>Eucalyptus</i> spp.	107
Tabela 16. Valores médios das características químicas dos seis clones de <i>Eucalyptus</i> spp.	112

Tabela 17. Caracterização dos cozimentos kraft dos seis clones de <i>Eucalyptus</i> spp.	115
Tabela 18. Cozimento kraft para produção de polpa com kappa ± 18	119
Tabela 19. Parâmetros de eficiência e produtividade dos cozimentos kraft (kappa ± 18) dos seis clones de <i>Eucalyptus</i> spp., aos 4 anos.	122
Tabela 20. Valores médios da porcentagem de casca e do fator de forma (f) dos clones de <i>Eucalyptus</i> spp.....	165

1. INTRODUÇÃO

No panorama brasileiro do setor florestal, a cultura do eucalipto ocupa posição de destaque, com 5,7 milhões de hectares, o que corresponde a 72% do total de áreas destinadas às florestas plantadas, e atualmente estão localizados principalmente nos Estados de Minas Gerais (24%), de São Paulo (17%) e do Mato Grosso do Sul (15%). As florestas plantadas são destinadas principalmente ao segmento de celulose e papel, o que representa 34% do total de área plantada no país. (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES- IBÁ, 2017).

Em contexto geral, a indústria brasileira de florestas tornou-se um negócio de classe mundial altamente competitivo no mercado internacional, principalmente devido à alta produtividade de suas florestas plantadas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL- ABTCP, 2017). Na última década (2006-2016), a produção nacional de celulose aumentou em 7,6 milhões de toneladas, o que representa uma taxa anual de crescimento de 5,3% (IBÁ, 2017). Neste cenário, a produção brasileira de celulose de mercado continua mostrando um forte movimento expansionista, o que torna necessária a adaptação da silvicultura a novas fronteiras regionais, em função da limitada disponibilidade de terras para a expansão da área plantada nos tradicionais polos.

Considerando os aspectos a serem observados quanto à seleção de novas áreas de plantio, tem-se que a viabilidade de um empreendimento florestal depende fundamentalmente de alguns fatores como disponibilidade de terras aptas na região, condições climáticas, distância até o local de consumo, características do solo e disponibilidade de material genético adaptado e adequado ao produto final, além de boa infraestrutura (FERNANDES et al., 2011). Atualmente, a maior parte das empresas brasileiras produtoras de celulose e/ou papel estão localizadas nas regiões Sul e Sudeste do País (IBÁ, 2017), onde se concentram a maior parte dos plantios florestais.

Com extensa área territorial e localização geográfica privilegiada, no centro do país, o estado de Goiás possui um grande potencial para o estabelecimento de florestas plantadas, sobretudo devido às condições propícias de solo e clima e a existência de extensas áreas agrícolas subutilizadas, que configura preços de terra relativamente inferiores em relação a outras regiões (MORALES et al., 2012). Somam-se a isso aspectos que geram importantes perspectivas de mercado, dentre

eles o forte incentivo do poder público à industrialização do estado, a existência de um importante arcabouço de modais de transporte, fundamentais à logística e infraestrutura da cadeia produtiva florestal, além do suporte científico de instituições públicas e privadas ligadas ao setor florestal, que permitem o conhecimento e norteamto de importantes ações de desenvolvimento (REIS et al., 2015).

Espécies pertencentes ao gênero *Eucalyptus* têm sido as mais utilizadas nos plantios florestais em território goiano. Entretanto, observa-se uma pequena participação em termo de áreas plantadas de eucalipto, com 127 mil hectares, que coloca o estado, atualmente, na 11^o posição no ranking nacional. Os plantios destinam-se principalmente ao uso energético, sendo a produção de madeira para o mercado de celulose ainda inexpressiva. (IBÁ, 2017).

Os melhores desempenhos em produção de madeira têm sido obtidos com clones híbridos da espécie *E. urophylla*, em função da melhor adaptabilidade desta a ambientes sujeitos a déficit hídrico, embora os clones sejam, de modo geral, advindos de seleções com base em experimentos de outros estados que indicaram características adaptativas potenciais ao estado de Goiás, o que torna as avaliações de desempenho inespecíficas e carecidas de informações (REIS et al., 2015).

Como as condições climáticas, as características do solo e o material genético influenciam diretamente a produtividade de plantações florestais, interferindo, também, na qualidade da madeira (FERNANDES et al., 2011). Neste sentido, é fundamental a condução de testes de adaptação de espécies e/ou clones em Goiás objetivando indicar a escolha dos melhores materiais, tanto visando maiores ganhos em produtividade, como também quanto a potencialidade para o mercado de celulose, através do fornecimento de informações incipientes, com vista à implementação futura de plantios em escala comercial. A seleção de materiais superiores constitui uma das principais etapas para o sucesso da produção florestal, uma vez que a qualidade da madeira é um fator de extrema importância quando o objetivo é a produção de polpa celulósica com alto rendimento industrial (GOUVÊA et al., 2009).

Como alternativa para a redução dos longos ciclos de avaliações que compõem um programa de melhoramento completo do eucalipto, propõem-se seleções precoces dos materiais genéticos, com vistas à predizer, através da caracterização das árvores ainda em idade juvenil, o desempenho destas quanto aos caracteres de interesse para a idade de corte. (MARQUES JR., 1995; PEREIRA

et al. 1997). Em outra perspectiva, a caracterização da madeira de plantas jovens é, atualmente, de grande importância, haja vista a tendência de colheita de árvores em idade precoce verificada (HSING; DE PAULA; DE PAULA, 2016). Dados da Ibá (2017) mostram que o setor brasileiro de florestas plantadas lidera o *ranking* global de produtividade florestal, apresentando a maior produtividade e a menor rotação do mundo, com uma média de 35,7 m³/ha ao ano e rotação mínima variando de 4,5 a 5 anos para os plantios de eucalipto.

Os estudos de caracterização de qualidade da madeira para produção de polpa celulósica envolvem a constituição química da madeira, suas características estruturais anatômicas, densidade, e também de grande importância, as características tecnológicas da transformação da madeira em polpa celulósica (GOMIDE; FANTUZZI NETO; REGAZZI, 2010). O rendimento da polpa e o grau de deslignificação (número kappa) são dois parâmetros-chave para a determinação da sua qualidade (KHRISTOVA et al., 2006; GOMIDE; COLODETTE, 2007).

Pesquisadores da Universidade Federal de Goiás (UFG), em parceria com a Universidade Federal de Viçosa (UFV), Suzano Papel e Celulose e empresas parceiras, implantaram em dezembro de 2012, uma rede de testes com clones de *Eucalyptus* spp. em regiões representativas das condições climáticas do estado de Goiás, com o objetivo de identificar materiais genéticos superiores e adaptados (NOVAES et al., 2013; PORTO et al., 2013; MACIEL, 2014). A partir desta avaliação experimental, clones de melhor desempenho tecnológico para produção de celulose poderão ser indicados.

Neste sentido, este trabalho visa contribuir com informações acerca da adaptação local e, sobretudo, do desempenho na produção de polpa celulósica Kraft de seis clones híbridos de *Eucalyptus* spp., selecionados do experimento, em que três deles configuram-se como materiais genéticos já específicos para a produção de celulose e papel, sendo os demais ainda pouco avaliados quanto à esta finalidade, através do estudo de suas características de produtividade, qualidade da madeira e da transformação da madeira em polpa.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar as características do lenho e a produção de polpa celulósica Kraft em seis clones-elite de *Eucalyptus* spp., aos 4 anos, provenientes de um teste clonal no município de Luziânia, Goiás.

Como objetivos específicos, citam-se: (i) determinar a densidade do lenho pelo método gravimétrico (densidade básica) e por densitometria de raios- X (densidade aparente); (ii) avaliar características anatômicas e químicas do lenho; (iii) avaliar as características tecnológicas de transformação da madeira em polpa; (iv) indicar a potencialidade dos materiais genéticos estudados quanto a qualidade da madeira para produção de celulose e (v) gerar informações técnicas que contribuam para indicar o potencial para a expansão de florestas plantadas de eucalipto no Estado de Goiás, destinadas ao mercado de celulose.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. O Gênero *Eucalyptus*

O eucalipto, como é popularmente designado, pertence à divisão Angiosperma, da ordem Myrtales, família Myrtaceae, e corresponde a um dos maiores gêneros de plantas do planeta, o gênero *Eucalyptus* (CIFLORESTAS, 2017). As mais de 800 espécies desse gênero ocorrem naturalmente na Austrália, ocupando distintos nichos ecológicos após milhões de anos de evolução e especialização, encontrando-se assim, espécies desde regiões tropicais (latitude 3°S) até temperadas (latitude 43°S), de regiões extremamente úmidas, com precipitação média anual superior a 3.000 mm, a regiões extremamente secas, onde a precipitação média é inferior a 300 mm, e desde o nível do mar até montanhas de picos nevadas. (FLORES, et al., 2016).

Na indústria florestal o *Eucalyptus* se destaca, constituindo-se um dos gêneros mais importantes e estudados do mundo (SCHMIT et al., 2015), sendo esta notoriedade dada em função de suas excelentes características, citam-se rápido crescimento, plasticidade genética, forma retilínea do fuste, desrama natural e madeira com variações nas propriedades tecnológicas, adaptadas às mais variadas condições de uso (OLIVEIRA et al., 1999). As espécies de *Eucalyptus* são plantadas principalmente para produção de madeira e celulose, adotando-se a criação de uma série de experimentos visando a melhoria das características de produtividade e qualidade da madeira (BUNDOCK et al.; 2008; MORA; SERRA, 2014).

A introdução de espécies de eucalipto no território brasileiro data ao final do século XIX (SILVA, 1870; AZEVEDO, 1874), nos estados do Rio Grande do Sul, Rio de Janeiro e São Paulo, embora a busca pela aptidão das espécies com finalidade comercial tenha vindo um pouco mais tarde, a partir do trabalho conjunto do Engenheiro-agrônomo e silvicultor Edmundo Navarro de Andrade e do botânico Joseph Henry Maiden. Seus estudos visavam testar um grande número de espécies, de diferentes zonas climáticas, para selecionar aquelas aptas ao estado de São Paulo, como parte do programa de pesquisa da Companhia Paulista de Estradas de Ferro. (FLORES, et al., 2016). A partir de 1967, com a implementação da Lei de Incentivos Fiscais para o reflorestamento, deu-se início a um programa intensivo de

melhoramento do eucalipto, objetivando a seleção de árvores superiores (CASTRO et al., 2016).

Neste cenário, a importância econômica e social do eucalipto vem aumentando desde meados do século passado (SANTAROSA et al., 2014), principalmente devido às condições edafoclimáticas favoráveis ao seu crescimento no Brasil, o que tem atraído crescente investimento em pesquisa na área de genética e melhoramento florestal, com objetivo de proporcionar ganhos ao setor florestal brasileiro (VALE et al., 2014).

Do ponto de vista histórico, o sucesso obtido com o melhoramento genético do eucalipto no Brasil foi grande, especialmente devido a seleção clonal associada a técnicas de manejo, que contribuiu para um expressivo aumento no volume de madeira e produção de celulose por hectare (ASSIS; ADAB; AGUIAR, 2016). Ademais, a produtividade e a qualidade da madeira dos plantios florestais de *Eucalyptus* no país tiveram aumento significativo em virtude da produção de híbridos interespecíficos deste gênero, colocando o país em posição de destaque na indústria florestal, principalmente no setor de celulose e papel (ASSIS; MAFIA, 2007; SANTOS et al., 2013)

Segundo Assis e Mafia (2007), muitas de suas espécies são compatíveis entre si quanto ao cruzamento genético, o que permite inúmeras combinações intra e interespecíficas, e por conseguinte, complementariedade nas características tecnológicas da madeira e na tolerância a estresses bióticos e abióticos. A clonagem torna possível a multiplicação em escala destes indivíduos superiores, constituindo florestas uniformes (SANTOS et al., 2006).

Os plantios clonais mais recentes no país estão distribuídos da seguinte forma: 65% *E. grandis* x *E. urophylla*, 15% *E. urophylla* híbrido, 7% *E. grandis*, 6% *E. urophylla*, 2,5% *E. saligna*, 0,6% *E. urophylla* x *E. camaldulensis*, 0,5% *E. urophylla* x *E. globulus* e 0,4% *E. camaldulensis* x *E. grandis* (ASSIS et al., 2016). Esses plantios apresentam, além de uma expectativa de maior produtividade, a incorporação de maior qualidade da madeira nos diferentes usos finais para os quais os programas de melhoramento estão sendo direcionados (ASSIS; ADAB; AGUIAR, 2016).

3.2. Descrição das espécies de *Eucalyptus* estudadas e aptidão climática no Brasil.

3.2.1. *Eucalyptus grandis* (Hill) Maiden

Eucalyptus grandis tem distribuição natural entre as latitudes 17°S e 34°S na região costeira dos estados australianos de Queensland e Nova Gales do Sul, desde o nível do mar até 1.100 m de altitude. Considerando a classificação climática de Köppen (1936), a espécie ocorre predominantemente no tipo climático Cfa, e em menor proporção nos tipos Cwa, Cwb e Cfb, com exigências climáticas específicas de temperatura média anual entre 15 e 22 °C e precipitação anual entre 800 e 2.000 mm (FLORES, et al., 2016). Esta espécie é encontrada em vários tipos de solos, geralmente, em solos profundos e bem drenados, com moderada fertilidade, não tolerando ambientes alagados (FONSECA et al., 2010). A Figura 1-A apresenta a aptidão climática de *E. grandis* em território brasileiro, estabelecida por meio do zoneamento climático baseado no conceito de similaridade bioclimática, que relaciona os nichos ecológicos entre a região de origem da espécie de *Eucalyptus* e o Brasil.

É uma espécie que prima pela capacidade de produzir híbridos excepcionais, constituindo a maior parte dos plantios de *Eucalyptus* no Brasil. Esse destaque se dá em função das excelentes características de crescimento, como alta produtividade com elevado incremento volumétrico por hectare; boa desrama natural, que confere fustes lisos com aspecto colunar; baixos teores de casca e ramificações finas; além da excelente qualidade da madeira, destinando-se principalmente a produção de celulose e madeira serrada (MORA e GARCIA, 2000; FONSECA et al., 2010). Em relação a algumas das principais características de qualidade da madeira, *E. grandis* possui, em média, densidade igual a 0,490 g/cm³, 29% de teor de lignina, e 51% de rendimento em celulose (RESENDE & ASSIS, 2009).

3.2.2. *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake

Eucalyptus urophylla é uma das poucas espécies que não ocorrem na Austrália. Sua área de distribuição natural situa-se nas latitudes 8°S e 10°S, especificamente em Timor-Leste, e nas ilhas Flores e Timor da Indonésia, desde o nível do mar até 2.500 m de altitude. Ocorre predominantemente no tipo climático

Aw, e em menor proporção nos tipos Af, Am, Cwa e Cwb, com exigências climáticas específicas de temperatura média anual entre 16 e 27 °C e precipitação anual entre 1.000 e 2.000 mm (FLORES, et al., 2016). A aptidão climática de *E. urophylla* no Brasil é apresentada na Figura 1-B.

A espécie apresenta alto potencial de crescimento e resistência à seca, e além disso, possui várias outras características destacáveis, como boa forma de fuste, capacidade de brotação e facilidade de enraizamento (BOLAND et al, 2006; FONSECA et al., 2010). Com relação à algumas das características de qualidade da madeira, *E. urophylla* possui em média densidade igual a 0,560 g/cm³, 29% de teor de lignina, e 50% de rendimento em celulose (RESENDE; ASSIS, 2009). Sua madeira é usada para construção civil, mourões de cerca, estruturas que demandam alta resistência, celulose e carvão (FONSECA et al., 2010).

Em função da sua grande plasticidade adaptativa, vem sendo largamente utilizado em diversas regiões do país, principalmente na produção de híbridos com *E. grandis* (*E. urograndis*), por combinar as boas características das duas espécies, ou seja, o crescimento e a qualidade da madeira de *E. grandis*, e a facilidade de enraizamento, adaptabilidade e variabilidade genética para tolerância à doenças, particularmente ao fungo causador do cancro do eucalipto, do *E. urophylla* (MORA; GARCIA, 2000; FONSECA et al., 2010). A maioria dos plantios clonais brasileiros estão centrados na combinação de *E. grandis* x *E. urophylla* (ASSIS, et al., 2016), destinando-se aos mais diversos segmentos industriais, com destaque na indústria de celulose, como a principal fonte de matéria-prima para produção de celulose de fibra curta.

3.2.3. *Eucalyptus pellita* F. Muell

Eucalyptus pellita é uma espécie tropical com distribuição natural entre latitudes 8°S e 9°S no sul da Papua-Nova Guiné e litoral norte do estado australiano de Queensland, desde o nível do mar até 700 m de altitude. Ocorre predominantemente nos tipos climáticos Aw e Am, e em menor proporção nos tipos Af e Cwa, com exigências climáticas específicas de temperatura média anual entre 22 e 27 °C e precipitação anual entre 1.100 e 2.800 mm (FLORES, et al., 2016). Ocorre em topografia ondulada, limitada por precipício, em terrenos bem drenados a levemente encharcados, com preferência a vales, na parte seca e quente, próximo a

ribeirões (FONSECA et al., 2010). A aptidão climática de *E. pellita* no Brasil é apresentada na Figura 1-C.

A espécie possui uma média produtividade, com crescimento inferior a outros materiais tradicionalmente cultivados no Brasil, como *E. saligna*, *E. grandis* e *E. urophylla* x *E. grandis* (PALUDZYSZYN FILHO et al., 2013). Sua madeira apresenta uma densidade média de 0,600 g/cm³ e teor de lignina médio de 30% (RESENDE; ASSIS, 2009).

Apesar de ser suscetível ao tombamento pelo vento, além de apresentar uma alta porcentagem de casca, *E. pellita* tem despertado interesse em virtude de possuir características atrativas, como adaptabilidade a vários ambientes, rápido crescimento, boa forma do fuste, capacidade de rebrota e variabilidade para resistência a doenças como a ferrugem do eucalipto, a murcha de ceratocystis (*Ceratocystis fimbriata*) e a mancha de pteridis (*Cylindrocladium pteridis*) (FONSECA et al., 2010; PALUDZYSZYN FILHO et al., 2013).

Por estas razões, no Brasil, o seu uso tem sido estimulado em combinações híbridas interespecíficas, com geração de clones com alto potencial de crescimento e com densidade da madeira em patamares bastante acima daqueles atingidos por clones de plantios destinados a produção de carvão vegetal (ASSIS, 2012), além de cruzamentos estratégicos ao se considerar ambientes com deficiência hídrica, a exemplo o *E. pellita* x *E. grandis* (BOTREL et al., 2007, 2010; PALUDZYSZYN FILHO; SANTOS, 2011).

3.2.4. *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh

É considerada a espécie de maior distribuição geográfica do gênero, encontrando-se em quase todos os estados australianos, e inclui duas subespécies: a forma “típica” (subespécie *obtusa*), com ampla distribuição geográfica, e a subespécie *simulata*, restrita ao norte de Queensland (FONSECA et al., 2010).

Eucalyptus camaldulensis subsp. *obtusa* (Blakely) Brooker & M. W. McDonald é uma espécie com ampla distribuição natural entre as latitudes 11°S e 36°S e em toda Austrália, com exceção dos estados de Victoria e Tasmânia, desde o nível do mar até 1.100 m de altitude. Ocorre principalmente no tipo climático BSh, e em menor proporção nos tipos As, Aw, Cwa e Cwb, com exigências climáticas específicas de temperatura média anual entre 16 e 27 °C e precipitação anual entre

500 e 1500 mm (FLORES, et al., 2016). A aptidão climática de *E. camaldulensis* subsp. *obtusa* no Brasil é apresentada na Figura 1-D.

Eucalyptus camaldulensis subsp. *simulata* Brooker & Kleinig é uma espécie tropical com distribuição natural entre as latitudes 15°S e 22°S no estado australiano de Queensland, desde o nível do mar até 400 m de altitude. Ocorre principalmente no tipo climático Aw, e em menor proporção nos tipos As, Cwa e Cwb, com exigências climáticas específicas de temperatura média anual entre 22 e 26 °C e precipitação anual entre 800 e 1600 mm (FLORES, et al., 2016). A aptidão climática de *E. camaldulensis* subsp. *simulata* no Brasil é apresentada na Figura 1-E.

Nos países onde foi introduzido com sucesso, o *E. camaldulensis* apresenta boa adaptação em regiões de solos pobres e prolongada estação seca, com moderada resistência a geadas, crescimento inicial mais rápido e alta capacidade de enraizamento e de rebrota. No Brasil, em razão da maior resistência à seca, possui boa adaptabilidade ao Bioma cerrado, onde foi intensamente plantado para a produção de madeira para carvão vegetal, principalmente nas décadas de 1980 e 1990 (FONSECA et al., 2010). A espécie apresenta uma densidade média de 0,630 g/cm³ e teor de lignina médio igual a 31% (RESENDE & ASSIS, 2009).

Clones interespecíficos entre *E. grandis* x *E. camaldulensis* e *E. tereticornis* x *E. camaldulensis*, têm apresentado boa adaptação em ambientes com déficit hídrico, resultando em boa produtividade. Entretanto, a espécie *E. camaldulensis* apresenta maior suscetibilidade aos ataques do percevejo bronzeado (*Thaumastocoris peregrinus*), psílideo de concha (*Glycaspis brimblecombei*) e vespa da galha (*Leptocybe invasa*), sendo necessário uma análise cautelosa quanto à sua recomendação para regiões de ocorrência dessas pragas (REIS et al., 2017).

3.2.5. *Eucalyptus tereticornis* Smith.

Eucalyptus tereticornis tem ampla distribuição natural entre as latitudes 6°S e 38°S no sul da Papua-Nova Guiné e nos estados australianos de Queensland, Nova Gales do Sul e Victoria, desde o nível do mar até 2.500 m de altitude. Ocorre principalmente nos tipos climáticos Cfa, Cwb e Cwa, e em menor proporção nos tipos Cfb, Aw, Am, Af, As, e BSh, com exigências climáticas específicas de temperatura média anual entre 8 e 27 °C e precipitação anual entre 600 e 3.000 mm (FLORES, et al., 2016). Esta espécie tem preferência por solos bem providos de nutrientes, úmidos, mas sem água estagnada, bem como franco-arenosos e franco-

aluviais (FONSECA et al., 2010). A aptidão climática de *E. tereticornis* no Brasil é apresentada na Figura 1-F.

A madeira de *E. tereticornis* é considerada boa para serraria e carvão, e embora seja considerada de difícil cozimento (FONSECA et al., 2010), em alguns países, como na Argentina, é usada para produção de celulose. No Brasil foi plantada especialmente para obtenção de carvão vegetal, em regiões de clima mais seco, no Estado de Minas Gerais (MORA; GARCIA, 2010). Apresenta uma densidade média de 0,610 g/cm³ e 31 % de teor de lignina. (RESENDE; ASSIS, 2009).

Figura 1. Mapa de ocorrência natural na Austrália e aptidão climática no Brasil de *Eucalyptus grandis* (A), *Eucalyptus urophylla* (B), *Eucalyptus pellita* (C), *Eucalyptus camaldulensis* subsp. *obtusa* (D), *Eucalyptus camaldulensis* subsp. *simulata* (E) e *Eucalyptus tereticornis* (F).

Fonte: FLORES et al.; (2016).

3.3. Estado de Goiás: relevância no cenário nacional do setor de florestas plantadas

O Brasil se tornou, nos últimos anos, um dos maiores produtores de florestas plantadas do mundo, atualmente com uma área de 7,84 milhões de hectares (IBÁ, 2017). Produtos de origem vegetal estão intimamente relacionados à setores estratégicos da economia brasileira, como a siderurgia, a indústria de papéis e embalagens e a construção civil, sendo 91% de toda a madeira produzida destinada para fins industriais no país (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE- MMA, 2016; IBÁ, 2017).

O setor florestal brasileiro apresenta a maior produtividade (volume de madeira produzido por área ao ano) e a menor rotação (período entre o plantio e a colheita das árvores) do mundo (IBÁ, 2016). De acordo com as informações reportadas pelas principais empresas do setor, em 2016, a média de produtividade foi de 35,7 m³/ha ao ano, com rotação variando de 4,5 a 5 anos para os plantios de eucalipto (IBÁ, 2017).

O sucesso dos cultivos no Brasil quando comparado com outros países, ocorre em função de notórias vantagens competitivas, dentre elas, as condições favoráveis à silvicultura intensiva, a boa adaptação das espécies exóticas utilizadas que apresentam, em sua maioria, rápido crescimento, e a disponibilidade de terras para o cultivo (GUIA TÉCNICO REFERÊNCIA, 2014).

Em virtude das características favoráveis ao setor florestal nacional, a área brasileira com florestas plantadas está prevista para dobrar entre 2020-2030 (BRASIL, 2014). Os projetos de investimento das empresas, em andamento ou previstos, que visam ao aumento dos plantios, ampliação de fábricas e novas unidades, são da ordem de R\$ 40 bilhões de 2016 a 2020 (IBÁ, 2015). Em especial para o cultivo de eucalipto, espécie de maior relevância, é esperado aumento na sua utilização como multiproduto (ANUÁRIO ESTATÍSTICO DA ABRAF, 2013), além de reconhecimento e valorização dos créditos de carbono gerados pelas florestas em crescimento e ampliação do mérito do setor florestal na economia do país (IBÁ, 2017).

A área de plantios clonais de *Eucalyptus* vem sendo ampliada cada vez mais em todo o território brasileiro, graças à disponibilidade de clones selecionados para as mais diversas regiões e propósitos comerciais, aliado a um custo competitivo

(XAVIER; SILVA, 2010). Em contrapartida, a silvicultura intensiva no Centro-Oeste permaneceu pouco desenvolvida durante muitos anos, sobretudo devido à distância em relação às principais unidades industriais do segmento de florestas plantadas, dos mercados fornecedores de insumos e dos mercados consumidores, atualmente, concentrados nas regiões Sul e Sudeste do País (REIS et al., 2015; IBÁ, 2017).

Todavia, atualmente, a Região Centro-Oeste se tornou um eixo estratégico para indústrias de muitos dos ramos florestais (indústrias moveleiras, siderúrgicas, papel e celulose), e Goiás possui características potenciais para fazer parte desse circuito (REIS et al., 2015). Cita-se, na região, o Estado do Mato Grosso do Sul, que tem demonstrado crescente avanço no setor de florestas plantadas, e nos últimos cinco anos, lidera a expansão da área de eucalipto no país, registrando aumento de 400 mil hectares neste período, com uma taxa média de crescimento de 13% a.a. (IBÁ, 2017).

A produção extrativista de madeira no Estado de Goiás predominou durante muito tempo abastecendo os segmentos de lenha, carvão vegetal e madeira em tora, em razão da disponibilidade de recursos madeiráveis nativos e o menor custo envolvido (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA- IBGE, 2015a). No entanto, no decorrer dos anos, com o intenso desenvolvimento dos setores agrícola, industrial e mineral alcançado no estado, além da restrição no uso de madeira oriunda de extrativismo e também do aumento populacional, a silvicultura tem se expandido de forma expressiva para suprir as demandas (JORNAL BRASILEIRO DE INDÚSTRIAS DA BIOMASSA, 2014).

As florestas plantadas no Estado de Goiás são formadas majoritariamente por espécies pertencentes ao gênero *Eucalyptus*, ocupando uma área de 127 mil hectares (IBÁ, 2017). Em geral para o eucalipto, os plantios têm sido estabelecidos com clones que foram selecionados em outros estados e com boa adaptação (REIS et al., 2015). Segue-se em menores proporções as florestas plantadas de pinus (*Pinus* spp.), seringueira (*Hevea brasiliensis*), mogno-africano (*Khaya* spp.), e também, em menor número, florestas de acácia (*Acacia mangium*) e teca (*Tectona grandis*). Os plantios são destinados ao suprimento das demandas de madeira para várias finalidades, como biomassa para energia, matéria-prima para a construção civil, serraria e também de borracha (REIS et al., 2017).

Embora seja evidente o destaque crescente do setor de florestas plantadas em Goiás (IBGE, 2015b), a sua participação em termos de área plantada nacional

ainda é muito inexpressiva (IBÁ, 2016), o que ressalta a importância de se gerar e dispor informações sobre esse setor, com vista ao reconhecimento de sua importância, bem como do potencial do Estado para a expansão da silvicultura.

Há décadas que o Brasil tem importância destacada na fabricação de celulose fibra curta derivada de eucalipto, produto para o qual a indústria nacional ainda não encontra competidor à altura, com os mais baixos custos entre todos os concorrentes mundiais. Dentro desse contexto, considerando os aspectos da cadeia produtiva florestal, políticas governamentais para aumentar a produção de celulose no país, melhoria em logística e infraestrutura e o aumento da área reflorestada representam importantes ações para garantir que o desenvolvimento do setor de celulose e papel seja assegurado no futuro (SOARES et al., 2010).

Os plantios com espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, para obtenção de madeira em tora destinada ao mercado de celulose e papel, não têm sido priorizados pelos produtores goianos (IBGE, 2015b), em razão da inexistência de fábricas ou mercados consumidores localizados em Goiás ou em suas proximidades e que ofereçam viabilidade financeira para produção e comercialização da madeira para essa finalidade (REIS et al., 2015). Entretanto, o estado conta com empresas formadoras de papel e embalagens que utilizam celulose oriunda de outros estados (GOIÁS, 2016), ou mesmo aparas (material reciclado).

Com uma ampla área territorial, Goiás se caracteriza por apresentar considerável percentual de áreas degradadas com potencial para recuperação por meio de plantios com espécies florestais, em monocultivos e/ou em sistemas de integração, e com condições edafoclimáticas favoráveis a esses cultivos em várias regiões; em suma, solos predominantemente classificados como Latossolo, topografia de baixa declividade, formada por chapadões, clima com duas estações bem definidas, com um período marcadamente chuvoso e outro com baixos índices pluviométricos (GOIÁS, 2014a; REIS et al., 2015;).

Dentre os aspectos positivos de mercado, situa-se numa posição geográfica privilegiada (central), limitando-se ao sul com os Estados de Minas Gerais e Mato Grosso do Sul e à leste com Bahia, estes de grande representatividade nacional no setor industrial de base florestal (IBÁ, 2017); bem como também ao norte com o Estado do Tocantins e a oeste com Mato Grosso. Além disso, o estado conta com um importante arcabouço de modais de transporte aeroviários, ferroviários,

rodoviários e hidroviários, que geram perspectivas de economia de escala, e portanto, de ganhos à cadeia produtiva florestal (REIS et al., 2015).

Outro fator que define a conduta das empresas de celulose e papel quanto à viabilidade do empreendimento, é a sua política de pesquisa e desenvolvimento, sendo que na etapa florestal, os principais objetivos das empresas são o aumento da produtividade por área e da qualidade da madeira (ROCHA, 2006). Goiás conta com importantes entidades de apoio ao segmento florestal, bem como com instituições públicas e privadas ligadas ao ensino, pesquisa e extensão, que tem norteado e/ou executado ações determinantes no processo de desenvolvimento do setor florestal no Estado (REIS et al., 2015); a exemplo o estabelecimento de programas de melhoramento genético de eucaliptos tropicais visando melhor balizar a escolha de materiais superiores e adaptados para plantios em escala comercial.

3.4. Seleção de clones superiores de *Eucalyptus* spp. voltados à indústria de celulose

A escolha adequada de uma espécie, procedência ou clone compõe um dos principais fatores para o êxito de um plantio e, por conseguinte, da produção florestal, e está relacionada à diversos outros fatores; dentre eles, a finalidade do plantio ou produto a ser obtido, condições ambientais do local do plantio (“sítio”), nível de melhoramento genético da semente ou clone utilizado, conhecimento sobre silvicultura, além da produtividade e rentabilidade da espécie a ser cultivada (HIGA, 2000; BOTELHO, 2003;). Em especial no que se refere a “sítio”, a seleção de clones e raças locais constitui um importante diferencial, podendo influenciar em ganhos significativos de produtividade de madeira e adaptação (REIS et al., 2015).

O melhoramento genético florestal tem como foco a seleção e propagação de árvores superiores, com vista às características de interesse à produtividade e qualidade da madeira, que resultem em benefícios ao longo de toda a cadeia produtiva das florestas, bem como de outras características importantes relacionadas à resistência à pragas, doenças e estresses ambientais (ASSIS; ADAB; AGUIAR, 2016). Partindo das combinações genotípicas conduzidas em programas de melhoramento, para se comprovar a superioridade genética dos indivíduos fenotipicamente selecionados, é necessário que estes sejam multiplicados e avaliados em experimentos com repetições e em locais representativos das áreas de plantio comercial, onde serão definidos, a partir destes testes, os clones que serão

multiplicados em escala comercial, através de avaliações de campo e de laboratório (BISON, 2004).

Em programas de melhoramento com o eucalipto no Brasil, a etapa de avaliação dura cerca de sete anos, principal idade de colheita em plantios comerciais, e no caso de recombinações utilizando sementes remanescentes, a duração é de aproximadamente de 9 a 10 anos (MARQUES JR., 1995; PEREIRA et al. 1997). Como alternativa para a redução deste ciclo, propõe-se seleções precoces, de forma a predizer nas árvores com idade juvenil, o desempenho destas quanto aos caracteres de interesse para a idade de corte (MARQUES JR., 1995).

Reduzindo-se o período de teste, através da seleção precoce, pode-se descartar mais rapidamente o material genético inferior, realizar mais prontamente a recomendação de novos clones para o plantio comercial, reduzir o ciclo de melhoramento e diminuir o tempo entre as gerações (WU, 1998; MADHIBHA et al., 2013), tornando os programas de melhoramento mais eficientes em termos de tempo e custos. Resultados de diversos estudos têm corroborado com a viabilidade de seleções precoces, citam-se Pereira et al. (1997), Tolfo (2003), Massaro et al. (2010), Beltrame et al. (2012), Hsing (2013), Moraes et al. (2014), Pinto et al. (2014).

Ademais, é visto na maioria dos programas de melhoramento florestal, a produtividade como a característica fenotípica de maior interesse, sendo ainda poucos os estudos direcionados aos parâmetros de qualidade da madeira, especialmente para a produção de celulose e papel. Tais estudos possibilitam a obtenção de ganhos consideráveis em programas de melhoramento uma vez que associam-se a caracteres específicos de qualidade da madeira para um dado objetivo.

Quanto à dinâmica dos testes clonais, têm-se os ensaios implantados de acordo com a estratégia de avaliação, sendo que para *Eucalyptus* spp., dentre as técnicas mais utilizadas estão: grande número de clones, visando uma avaliação mais rápida por meio de seleções precoces e em parcelas menores; instalação de parcelas quadrangulares para avaliação da performance de clones selecionados na fase anterior (resgate de materiais em torno de 10%); e avaliação da performance comercial de um número reduzido de clones oriundos da seleção anterior (PORTO, 2014).

Existem centenas de espécies diferentes de *Eucalyptus* com uma grande diversidade de propriedades, embora somente algumas estejam compreendidas

entre aquelas mais popularmente utilizadas em ambientes exóticos, em função da adaptação destas às condições de solo e clima local, que em suma, devem ser semelhantes às do local de origem (MORA e GARCIA, 2000). Entre as espécies de eucalipto de maior relevância econômica em território brasileiro estão: *E. grandis*, *E. urophylla*, *E. camaldulensis*, *E. cloeziana*, *E. pellita*, *Corymbia citriodora* e também os híbridos interespecíficos de *E. urophylla* x *E. grandis*, *E. urophylla* x *E. camaldulensis*, *E. grandis* x *E. camaldulensis* (REIS et al., 2015). Dentre estas, destacam-se na indústria de celulose as espécies *E. grandis* e *E. urophylla*, assim como o híbrido entre elas (BISON et al., 2007; GONÇALEZ et al., 2014).

Espécies como *E. pellita*, que apresentam ampla resistência a diferentes patógenos, juntamente com *E. grandis*, e *E. urophylla*, tem sido consideradas essenciais para compor um programa de melhoramento genético do eucalipto, incluindo ainda *E. camaldulensis* visando à introgressão de características como a tolerância ao estresse hídrico (ODA, 2014).

A grande variabilidade existente entre e dentre espécies de *Eucalyptus*, influenciada por fatores intrínsecos e extrínsecos à madeira, induz a um criterioso processo de seleção desses materiais para as indústrias de celulose (GOMIDE, et al., 2005). Embora as características da madeira, como formato do tronco, volume de madeira e taxa de crescimento, devam ser levadas em consideração no melhoramento de eucalipto, independente da finalidade do programa, para a indústria de celulose, é importante que se visem também outras características de elevada relevância, visto que em relação a produção de polpa celulósica, o rendimento e a qualidade do produto são altamente dependentes dos aspectos físicos, químicos e anatômicos, bem como das características tecnológicas da polpa (GOMIDE et al., 2005).

Ainda segundo Gomide et al. (2005), uma avaliação completa de todas as características tecnológicas dos clones em fase de seleção é um processo muito dispendioso e requer tempo excessivamente longo, inviabilizando a realização completa desses estudos. Dessa forma, como solução desta problemática, sugere-se a realização de apenas algumas análises, consideradas indispensáveis, capazes de fornecerem os subsídios necessários para uma seleção tecnicamente consciente; tais como a determinação da densidade básica, da constituição química, e das características da madeira na transformação em polpa (GOMIDE; FANTUZZI NETO; REGAZZI, 2010). Neste contexto, ressalta-se que devido à grande variação

existente entre e dentro procedências para o eucalipto, é possível selecionar materiais promissores quanto às características de interesse.

3.5. Redes de testes clonais de *Eucalyptus* spp. no Estado de Goiás

Com a evolução dos programas de melhoramento florestal e de seleção clonal, há uma tendência de se desenvolver materiais mais específicos tanto para uma maior adaptação a diferentes condições edafoclimáticas, quanto para qualidades diversas da madeira (XAVIER; SILVA, 2010). A adoção de clones específicos será cada vez mais implementada, principalmente em função dos avanços da silvicultura de precisão, permitindo a definição do manejo mais apropriado a um determinado clone (XAVIER; SILVA, 2010).

Especificamente para o Estado de Goiás, que possui características climáticas típicas do bioma Cerrado (Köppen e Geiger, Aw), faz-se fundamental a busca por materiais genéticos mais bem adaptados às condições de estresse hídrico, em razão do regime de chuvas com longos períodos de estiagem (3 a 5 meses de duração), bem como também às condições edáficas dos solos característicos da região.

Uma rede de experimentos com eucalipto tem sido conduzida desde 2010 pela Embrapa Florestas em parceria com instituições renomadas no contexto regional, como a Cooperativa Agroindustrial dos Produtores Rurais do Sudoeste Goiano - Comigo e Anglo American Níquel Brasil S.A. O experimento se encontra ainda em fase de teste e envolve populações base e testes clonais de diversas espécies, como: *Eucalyptus cloeziana*, *E. crebra*, *E. grandis*, *E. pellita*, *E. urophylla*, *E. urophylla* x *E. grandis*, *Corymbia citriodora* x *C. torelliana*, *C. torelliana* x *C. citriodora* e *C. maculata* (REIS et al., 2015).

Ademais, em dezembro de 2012, foi implantada uma rede de testes clonais de *Eucalyptus* spp. em parceria entre as instituições: Universidade Federal de Goiás (UFG), Suzano Papel e Celulose, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG), Empresa Anglo American Fosfato Brasil Ltda, FL Florestal, JP Florestal, Clonar Resistência à Doenças Florestais e Universidade Federal de Viçosa (UFV) (NOVAES et al., 2013; PORTO et al., 2013). O experimento é composto por 113 clones multiespécies, sendo 81 comuns em todos os experimentos, implantados em condições ambientais contrastantes e representativas do Estado, nos municípios de Catalão, Corumbá de Goiás e Luziânia (Figura 2). Para a seleção, foram

priorizados clones advindos de espécies/procedências com melhor tolerância ao déficit hídrico, tais como: *E. urophylla*; *Corymbia citriodora*; *E. grandis* procedentes de Atherton (Austrália); *E. tereticornis*; *E. resinífera*; *E. pellita* e seus híbridos (PORTO, 2014). Maciel (2014), verificando a genotipagem dos clones utilizados nesta rede experimental por meio de marcadores de microssatélites, demonstrou a grande diversidade genética existente.

Como resultado dessas importantes avaliações experimentais, clones de desempenho comprovadamente superiores para o Estado de Goiás poderão ser selecionados (MACIEL, 2014; REIS et al., 2015), possibilitando uma ampliação do número de materiais genéticos que atualmente são plantados no estado, e dessa forma, contribuir para uma maior diversificação de seus usos. Tais experimentos oportunizam a realização de estudos em diferentes frentes de pesquisa (produtividade, melhoramento genético, tecnologia da madeira, etc.), sendo tidos, portanto, como precursores e de grande valia científica para a Região Centro-Oeste.

Figura 2. Localização geográfica dos testes clonais com *Eucalyptus*, no Estado de Goiás.

Fonte: Ribeiro (2017).

3.6. Propriedades da madeira de *Eucalyptus*

3.6.1. Densidade básica e aparente

A densidade é certamente um dos parâmetros mais importantes para a avaliação da qualidade de um material lenhoso, pois resulta da integração de propriedades físico-químicas e anatômicas, e está relacionada às características tecnológicas de trabalhabilidade, retratibilidade, secagem, impregnação e com as propriedades mecânicas da madeira (GÉRARD et al., 1995).

Ainda, de acordo com Oliveira (1997) a densidade é uma das propriedades que mais fornece informações sobre as características da madeira e, segundo alguns autores, as suas variações ocorrem em nível de gênero e espécie, entre árvores e dentro de uma mesma árvore, sendo influenciada por fatores como genótipo, idade, taxa de crescimento das árvores, condições climáticas, índice de 'sítio', tratamentos silviculturais, posição de amostragem no tronco, dentre outros (SHIMOYAMA, 1990; LATORRACA; ALBUQUERQUE, 2000; TOMAZELLO FILHO; PIEDADE, 2005).

No gênero *Eucalyptus*, a densidade pode variar com a idade, com o vigor, com o local onde crescem, com a taxa de crescimento e, na mesma árvore, varia no sentido base-topo e na distância medula-casca (SOUZA et al., 1979). As variações no sentido da medula em direção à casca são as mais importantes, em que a extensão dessa variabilidade é determinada, principalmente, pela presença da madeira juvenil, pela sua proporção relativa no tronco e pelas suas características físicas, químicas e anatômicas.

A densidade da madeira é essencialmente função da espessura da parede celular, das dimensões e dos tipos de células e, em menor proporção, da quantidade de componentes extratáveis presentes por unidade de volume (PANSHIN & DE ZEEUW, 1980). Vários trabalhos têm demonstrado a existência de relação entre a densidade básica da madeira de eucaliptos com os elementos anatômicos, citam-se os de Barrichelo e Brito (1976), Oliveira (1988), Vital et al. (1994), Gouvêa et al. (2009), Motta et al. (2014) e Sharma et al. (2015).

Segundo Panshin e De Zeeuw (1980) e Goulart, et al. (2003), é possível observar diferentes padrões de comportamento da densidade no sentido longitudinal do tronco de uma árvore, em que especificamente para as do gênero *Eucalyptus*, o padrão de variação da densidade básica que normalmente se observa, é a de

decrecente até o meio do tronco e, então, passando a crescer até o topo da árvore; ou seja, os valores de densidade tendem a diminuir até o diâmetro à altura do peito (DAP) e tornam-se crescentes a partir daí, podendo ou não decrescer na região próxima ao topo, conforme se verifica nos trabalhos de Alzate et al. (2005), Tomazello Filho (2006), Sette Jr. (2007; 2010), Trevisan et al. (2012) e Sharma et al. (2015). Para os estudos citados, os valores de densidade básica média se apresentam entre 0,40 e 0,55 g/cm³. Sette Jr. et al. (2012), relatam para árvores de *E. grandis* aos 4 anos, valor médio de densidade básica ponderada igual a 0,44 g/cm³; mesmo valor encontrado por Trugilho et al. (2015), para diferentes clones e espécies de *Eucalyptus* de mesma idade.

Hsing et al. (2016), estudando o comportamento da densidade básica ao longo do tronco de árvores de *E. grandis* x *E. urophylla*, aos 28 meses, observaram a que densidade da madeira foi maior na base da árvore (0,494 g/cm³) e que nas demais posições de amostragem, os valores foram semelhantes entre si (valores entre 0,434 e 0,448 g/cm³).

Castro et al. (2016), em estudo com três clones de *Eucalyptus* spp. em diferentes idades, encontraram para as árvores de 4 anos, valor médio de densidade igual a 0,476 g/cm³, com valores crescentes significativos para idades mais avançadas (5 e 7 anos). Similarmente, Protásio et al. (2014), avaliando clones comerciais de *Eucalyptus* spp. de diferentes idades, encontraram valor médio de 0,469 g/cm³ para a densidade básica das árvores aos 49 meses.

Métodos nucleares têm sido aplicados na análise e determinação da densidade aparente do lenho e, dentre eles, a metodologia de densitometria de raio X tem sido a de maior destaque (CHAGAS, 2009). Através da aplicação desta técnica, é possível construir, com alta precisão (um valor a cada 40 µm), o perfil da variação da densidade aparente de uma secção transversal do lenho (POLGE, 1978). Oliveira et al. (2012), descreveram uma sequência de variação da densidade aparente para o lenho de *E. grandis* de seis anos, em que (i) a densidade aumenta na direção medula-casca, em seguida, na posição correspondente a 50% do raio, (ii) tem-se madeira juvenil (mais próxima da medula) e madeira adulta (próxima à casca) e (iii) presença de variações intra e inter anuais de densidade.

Em estudo conduzido com 19 espécies de *Eucalyptus* aos 4 anos, numa região de Lisboa, em relação a densidade aparente média, Knapic et al. (2014) obtiveram valor médio igual a 0,67 g/cm³. Arango e Tamayo (2008), estudando

clones de *E. grandis* e *E. grandis* x *E. urophylla*, mostram valores para densidade aparente de 0,54, 0,98 e 0,31, para média, máximo e mínimo, respectivamente. Similarmente, Arantes et al. (2016), encontraram para clones de *E. grandis* x *E. urophylla*, aos 6 anos, valores para densidade aparente variando entre 0,52-0,58, 0,96-1,05 e 0,36-0,40, para média, máximo e mínimo, respectivamente, nas diferentes classes diamétricas.

Silva (2002), em estudo com árvores de *Eucalyptus grandis* provenientes de plantios comerciais, utilizou a densitometria de raios X em madeiras de diferentes idades, concluindo que houve aumento da densidade aparente da madeira no sentido medula-casca. Para as árvores com 10 anos, a densidade aparente média foi de 0,46 g.cm⁻³, sendo 50% da seção radial próxima da medula formada por madeira juvenil.

O estudo da densidade de *Eucalyptus* spp. vem sendo largamente realizado por ser este um índice de qualidade da madeira consagrado pelos pesquisadores e melhoristas florestais quando se visa sua utilização como matéria-prima industrial ou energética (REMADE, 2018), podendo limitar a escolha do material genético de acordo com a finalidade a ser empregado. Para a produção de carvão vegetal para siderurgia ou dormentes para estradas de ferro, por exemplo, são requeridas espécies de alta densidade (maior que 0,55 g/cm³), e por outro lado, para as fábricas de celulose de fibra curta, normalmente se trabalham com espécies de densidade básica intermediárias (entre 0,46 a 0,54 g/cm³) (RIBEIRO; ZANI FILHO, 1993; FOELKEL, 2017).

3.6.2. Características anatômicas

A caracterização dos elementos anatômicos, por meio do conhecimento das células e/ou tecidos que formam o lenho das espécies arbóreas, bem como a determinação de suas dimensões e arranjos nos planos básicos de estudo da madeira, possibilitam o estabelecimento de correlações com as propriedades físico-mecânicas e, por conseguinte, a atribuição mais precisa dos usos de uma determinada madeira (TOMAZELLO FILHO, 2002).

As madeiras de folhosas apresentam o tecido básico de sustentação mecânica constituído essencialmente por fibras libriformes e fibrotraqueóides, pelos elementos de vaso, que realizam condução de líquidos na árvore e pelas células parenquimáticas, que desempenham a função de armazenamento, transformação e

condução de substâncias nutritivas (BURGER e RICHTER, 1991). As dimensões das fibras de madeiras de folhosas são menores que os traqueóides de coníferas, daí a denominação fibras curtas, e ocupa de 20-80% do lenho, sendo na maior parte o elemento de maior abundância (BURGER e RICHTER, 1991). Especificamente para o eucalipto, a porcentagem total de fibras é cerca de 65%, a de vasos é de 17%, e a de tecido parenquimatoso é de 18% (FOELKEL e BARRICHELO, 1975; BARRICHELO e BRITO, 1976).

A madeira juvenil corresponde ao xilema secundário produzido durante a fase inicial da vida da árvore, caracterizando-se a madeira adulta, na sequência, pelo progressivo aumento nas dimensões e mudanças correspondentes na forma, estrutura e disposição das células nas sucessivas camadas de crescimento (JANKOWSKY, 1979). Com o aumento da idade, a proporção de madeira juvenil diminui, tanto em peso como em volume, sendo difícil determinar o período de juvenilidade da árvore, que para algumas espécies do gênero *Eucalyptus* pode ser superior a 15 anos (JANKOWSKY, 1979).

O comprimento das fibras constitui a principal variável para definir o limite entre o lenho juvenil e o lenho adulto, onde as fibras mais próximas da medula apresentam menor comprimento, menor diâmetro e paredes celulares mais finas e aumentam gradativamente em comprimento, diâmetro e espessura da parede, conforme aproximação da casca (ZOBEL, 1980). Segundo Tomazello Filho (1987), a estabilização do comprimento das fibras, para inúmeras espécies de eucaliptos, somente irá ocorrer quando as células do câmbio atingirem comprimento máximo, iniciando a formação da madeira adulta. Ainda, de acordo com Tomazello Filho e Malan (1995), em áreas de rápido crescimento, a madeira juvenil é de importância considerável, uma vez que pode constituir uma grande proporção do tronco.

Gouvêa et al. (2009), estudando clones de *E. grandis* e *E. grandis* x *E. urophylla* com 3 anos em diferentes localidades no Estado de Minas Gerais, observaram que o comprimento das fibras variou de 0,87 a 1,11 mm e a espessura da parede e diâmetro do lume variaram de 3,2 a 4,3 μm e 6,7 a 11,40 μm , respectivamente. Ramos et al. (2001) afirmam que a presença ou ausência do lenho adulto pode ser confirmada através do nível de significância da variação radial média de uma ou mais variáveis anatômicas, ou seja, a existência de diferença significativa, parcial ou total, entre as posições, que indique a presença do lenho adulto.

Tomando-se diferentes idades, Sette Jr. (2012), em estudo da variação das dimensões das fibras em árvores de *E. grandis*, observou para as de 48 meses, valores médios de 866,0 µm para o comprimento de fibra, de 13,9 µm para a largura, de 2,4 µm para a espessura da parede e de 9,4 µm para diâmetro do lume, e ressaltou um aumento significativo das dimensões das fibras tanto do 24º para o 72º, quanto do 48º para o 72º mês de idade das árvores, exceto para o diâmetro do lume, indicando a existência de uma proporção significativa de madeira juvenil aos 48 meses de idade.

Caracterizar a transição entre o lenho juvenil e adulto permite conhecer as diferenças entre as propriedades físicas, químicas, biológicas e morfológicas que esses lenhos apresentam, possibilitando programar a época de colheita de madeira que melhor atenda às necessidades do produto, de acordo com o seu uso final (indústria moveleira, produção de carvão, papel e polpa celulósica, etc.) (RAMOS et al., 2011).

Ferreira et al. (2006), estudando 12 diferentes clones de *Eucalyptus* spp., com idade média de 7 anos, encontraram valores médios de 1,07 mm para o comprimento de fibra, de 21,25 µm para a largura, de 4,83 µm para a espessura da parede e de 11,59 µm para diâmetro do lume. Enquanto Botrel et al. (2010), em estudo de qualidade da madeira de 9 clones de *Eucalyptus* spp., observaram para o comprimento da fibra valores médios de 1,03 mm, 16,03 µm para a largura da fibra, 7,91 µm para o diâmetro do lume e 4,06 µm para a espessura da parede celular. Valores para as dimensões das fibras de clones de *Eucalyptus* foram descritos por outros autores, como Gomide et al. (2005), Trugilho et al. (2007), Alves et al. (2011) e Oliveira et al. (2012).

A variação dos elementos anatômicos e seu efeito na qualidade da madeira de árvores de *E. grandis*, aos 7 anos, foi estudada por Rocha et al. (2004). Neste estudo, foram determinados os valores das dimensões das fibras em diferentes posições axiais (base-topo) do tronco, observando-se que os maiores valores médios das dimensões das fibras foram encontrados a 25% da sua altura comercial, exceto para o diâmetro do lume que apresentou maior valor na base da altura.

Assim como observado para as fibras do lenho, o diâmetro tangencial, a frequência e a área dos vasos também apresentam um modelo de variação radial, demonstrando tendência de aumento das dimensões na direção medula-casca (FRANCO, 2014). De acordo com Sette Jr. et al. (2009), o comportamento mais

comumente observado para o lenho do eucalipto é o diâmetro e a área dos vasos aumentarem e a frequência diminuir no sentido radial. A variação radial do diâmetro, frequência e área dos vasos do lenho de *Eucalyptus* foi descrita por vários autores, dentre eles, citam-se: Leal et al. (2004), Rocha et al. (2004), Veenin et al. (2005), Tomazello Filho (2006), Lopes (2007), Silva et al. (2007), Sette Jr. (2010).

Sharma et al. (2015), avaliando os efeitos das diferentes posições axiais do tronco nas propriedades anatômicas de clones de *E. grandis* x *E. urophylla*, registram variação significativa nas dimensões das fibras, com valores entre 0,91 a 1,14 mm para o comprimento, 14,3 a 16,8 µm para diâmetro do lume e 4,0 a 6,1 µm, para a espessura de parede. Variações significativas para as dimensões dos vasos, quanto ao comprimento, diâmetro tangencial e frequência também foram observadas nas diferentes alturas do caule.

3.6.3. Características químicas

A composição química do tecido lenhoso é bastante complexa, estando os componentes químicos distribuídos de diferentes formas, segundo a estrutura anatômica (TRUGILHO et al., 1996). A maior parte da substância madeira é composta de materiais de alto peso molecular, e tem sido apropriadamente descrita como sendo um sistema interpenetrado de polímeros, em que cada componente está presente em quantidades específicas e possui características bem definidas, que podem ser influenciadas pelas condições sob as quais a madeira está submetida (BROWNING, 1963). Os vários componentes químicos da madeira podem ser agrupados em polissacarídeos, ligninas, extrativos e constituintes inorgânicos.

A celulose é o principal componente da parede celular do vegetais superiores, e constitui-se em um polissacarídeo de alto grau de polimerização, estando presente principalmente sob a forma de fibras, junto a outros componentes (TRUGILHO, et al., 1996; ROWELL, 2005). As hemiceluloses são, também, polissacarídeos constituintes da parede celular, porém com menor grau de polimerização, que junto a celulose, formam a fração da madeira denominada holocelulose (TRUGILHO, et al., 1996; ROWELL, 2005).

A lignina é um polímero de natureza aromática e tridimensional, de elevado peso molecular e altamente hidrofóbico, que confere maior rigidez e dureza à parede celular, além de atuar como material “cimentante” ou adesivo entre as fibras

(PETTERSEN, 1984; TRUGILHO, 1996; ROWELL, 2005). A maior concentração de lignina está na lamela média, porém uma quantidade significativa está dispersa nas camadas da parede secundária das fibras (MOKFIENSKI, 2004).

Os extrativos são substâncias de baixo ou médio peso molecular, podendo ser polifenóis, óleos, gorduras, gomas, resinas, ceras ou amido, e constituem os elementos que não fazem parte da estrutura essencial da madeira e, por isso, são ditos componentes acidentais (BOOTLE, 1983). A presença de alguns desses componentes influencia a resistência ao ataque de fungos e insetos, a coloração, o odor, a permeabilidade, a densidade e a dureza da madeira (PETTERSEN, 1984).

Além dos compostos orgânicos (celulose, hemicelulose, lignina e extrativos), a madeira apresenta ainda as chamadas “cinzas”, que são minerais que compõem sua fração inorgânica. A composição mineral da madeira é geralmente baixa, sendo constituída principalmente por óxidos minerais como, óxidos de cálcio, magnésio, fósforo, silício e potássio (TRUGILHO et al., 1996). Para o gênero *Eucalyptus*, espera-se que o teor de cinzas da fração lenhosa se encontre abaixo de 1% do seu peso seco (TRUGILHO et al., 1996).

Silva (2011) encontrou para *E. grandis* x *E. urophylla* aos 4 anos, cultivados em áreas de baixa produtividade, valores médios de 4,4, 29,7 e 65,9 % para extrativos totais, lignina (solúvel + insolúvel) e holocelulose, respectivamente. Colodette et al. (2004), estudando a composição química de dez espécies do gênero *Eucalyptus*, descreveram para os teores de carboidratos (celulose e hemiceluloses), lignina e extrativos, valores variando entre 70,0-74,5, 24,1-28,0 e 1,3-2,7%, respectivamente.

A composição química do material lenhoso exerce grande influência no processo de beneficiamento da madeira (ZANUNCIO et al., 2013) e o estudo dos seus componentes é imprescindível para a qualificação do seu uso, principalmente quanto ao destino energético e produção de polpa celulósica. Vale et al. (2010), Pereira et al. (2012) e Protásio et al. (2012, 2013), em seus estudos, indicam que os teores de lignina, extrativos totais, holocelulose e cinzas, influenciam direta ou indiretamente na qualidade e na produção do carvão vegetal.

3.7. Qualidade da madeira de *Eucalyptus* spp. para produção de polpa celulósica

Define-se qualidade da madeira como o seu potencial uso ou adequação em relação a uma determinada finalidade, sendo que normalmente, numa primeira etapa de seleção de clones por critérios tecnológicos de qualidade da madeira para produção de polpa celulósica são recomendados os estudos anatômicos, de densidade básica, constituição química fundamental e, inevitavelmente, de transformação da madeira em polpa celulósica (GOMIDE et al., 2010).

Os parâmetros anatômicos como porcentagem e dimensões de fibras, vasos e parênquimas além de número de fibras por grama e “coarseness” - peso de fibra por unidade de comprimento-, são os mais utilizados na avaliação da qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose e papel, estando diretamente relacionados com a qualidade da polpa celulósica e às propriedades físico-mecânicas e características superficiais e ópticas do papel produzido (CARVALHO et al., 1998). Em relação ao comprimento e a largura das fibras, Florsheim (1992) e Urbinati (1998) afirmam que são relativamente similares para as polpas de *Eucalyptus* spp., variando menos em relação à espessura da parede. A espessura da parede das fibras está relacionada a fatores genéticos, ambientais e à idade da árvore, e desempenha importante função no controle das propriedades do papel, principalmente na sua resistência ao rasgo (SHIMOYAMA, 1990).

De acordo com Tamolang (1961), na indicação de madeiras para fins papeleiros, é importante que se avalie não somente as características morfológicas das fibras (comprimento, largura, espessura da parede e diâmetro do lume) de maneira isolada, mas também as relações entre essas dimensões, a partir das quais são determinados alguns índices de qualidade. Os índices mais usuais nos estudos de qualidade da madeira para celulose e papel são: índice de Runkel, fração da parede (%), espessura da parede celular (μm), coeficiente de flexibilidade (%) e, índice de Enfeltramento.

Barrichelo e Brito (1976) propõe cinco grupos para o índice de Runkel: as fibras classificadas no grupo I (até 0,25) são consideradas excelentes para papel, do grupo II (0,25 - 0,5) muito boas, no grupo III (0,5 - 1,0) boas, no grupo IV (1,0 - 2,0) regulares e no grupo V (acima de 2,0) não devem ser usadas para produção de papel tendo em vista o baixo grau de colapso. Segundo Foelkel et al (1978), celulose

com fibras cujo índice seja superior a 1,5 são desaconselháveis para a indústria, sendo considerada de boa qualidade a que apresentar índice inferior a 1. Para a fração parede celular, Foelkel et al. (1978), recomendam limite de até 60% para produção de polpa celulósica e papel. Na prática, as indústrias admitem que quando a fração parede for maior que 40%, as fibras serão mais rígidas e difíceis de se colapsarem e, assim, produzem um papel de rede mais solta e frouxa, sem muita ligação entre fibras. Como resultado final, os papéis correspondentes são mais porosos, volumosos, rugosos e absorventes (FOELKEL, 2009).

O coeficiente de flexibilidade e o índice de Enfeltramento medem o quão flexíveis são as fibras e sua capacidade de entrelaçamento, sendo também importantes para fabricação de polpa celulósica e papel (CASTELO, 2007). O coeficiente de flexibilidade remete a facilidade da união entre as fibras, e, segundo Bektas et al. (1999) valores entre 0,50 – 0,75 classificam as fibras como flexíveis, com indicativos de que, ao se entrelaçarem, tendam a formar um papel altamente resistente. Já o índice de Enfeltramento tem relação direta com a resistência ao rasgo e arrebitamento (MOGOLLÓN; AGUILERA 2002) sendo que valores acima de 50 são mais indicados para boas características do papel relacionadas ao rasgo e dobras duplas (BALDI, 2001).

Os vasos são elementos anatômicos importantes para o processo de conversão da madeira em polpa celulósica, visto que atuam na facilitação do processo de impregnação dos cavacos pelo licor de cozimento, por serem elementos grandes e ocos e por estarem conectados às células adjacentes (parênquimas radial e axial), através das pontuações, permitindo que o licor de cozimento migre para o interior dos cavacos usando vias de acesso (FOELKEL; BARRICHELLO, 1975). Entretanto não é desejável que a madeira apresente alto teor dessas células, pois implica diretamente em menor densidade, o que proporciona menor produtividade na fábrica e maior consumo específico de material (ALVES et al., 2011).

Para a indústria de celulose e papel, uma avaliação adequada da densidade básica fornece indicações bastante precisas acerca da impregnação dos cavacos e rendimento do processo e geralmente está associada às características de qualidade e de resistências físico-mecânicas da polpa (QUEIROZ et al., 2004). Entretanto, embora seja a densidade básica umas das propriedades de maior relevância para a avaliação da qualidade da madeira visando a produção de polpa

celulósica, é importante ressaltar que por ser ela um fator resultante da interação entre propriedades físico-químicas e anatômicas da madeira, esta deve ser avaliada com cautela (FOELKEL et al., 1990).

Segundo Foelkel et al. (1990), a densidade para a madeira de *Eucalyptus* varia de 300 a 800 kg/m³; no entanto, para a produção de celulose, é recomendável que se trabalhe com uma faixa de 450 a 550 kg/m³. Já para Valente et al. (1992), a faixa recomendada está entre 530 a 580 kg/m³. De acordo com Foelkel (2009), a madeira mais densa apresenta maior quantidade de substância madeira em um mesmo volume, portanto a porosidade e a capilaridade para entrada de líquidos também serão menores. Shymoyama (1990) destaca que embora com o aumento da densidade básica a capacidade do digestor também aumente em massa, levando a um aumento da produção de polpa celulósica, o consumo de reagentes também será maior, assim como também a dificuldade para impregnação do licor nos cavacos e aumento na quantidade de rejeitos. Ainda, Parham (1983) afirma que madeira de densidade alta é mais dura e mais difícil para picar, portanto necessitam de ajustes da operação, mais manutenção do picador e aumento no consumo de energia, e produz cavacos com dimensões mais variadas.

Madeiras com densidade inferior a 400 kg/m³ levam à redução do rendimento, maior consumo de reagentes e elevado teor de rejeitos, enquanto que densidades superiores a 550 kg/m³ apresentam maior dificuldade de picagem das toras, o que acarreta além do maior desgaste das facas picadoras, uma maior proporção de cavacos de grandes dimensões, dificultando a impregnação do licor nestes e levando a uma menor produção de polpa depurada (SILVA, 2001). Além disso, explica que altos valores de densidade tornam a estrutura do papel mais porosa e a resistência à tração é reduzida.

A largura e a espessura da parede das fibras se relacionam com a densidade básica da madeira, de forma que maiores diâmetros e paredes espessas apresentam correlação positiva, enquanto as largas e finas, correlação negativa (SHIMOYAMA, 1990). Dias e Silva Jr. (1985) afirmam que para a madeira de *E. grandis*, quanto maior a largura das fibras, menor é o valor da densidade básica. Em relação aos vasos, madeiras com maiores porcentagens tendem a apresentar baixas densidades (FOELKEL, 1978). Uma variedade de estudos são encontrados na literatura quanto às características morfológicas/ anatômicas e a densidade da madeira de eucalipto, e suas relações com o processo de polpação e a qualidade da

polpa, citam-se: Kibblewhite (1999); Ona et al. (2001); Wimmer et al. (2002), Queiroz et al. (2004), Santos et al. (2008), Luo et al. (2012), Santos; Sansígolo (2012), Pirralho et al. (2014), Carvalho; Silva; Colodette (2014) e Motta et al. (2014).

É por meio do conhecimento da composição química da madeira que são estabelecidos os parâmetros do processo de polpação, sendo esta, portanto, uma avaliação primordial para a produção de celulose. Dentre os componentes da madeira, a celulose é o componente de maior importância econômica, já que é o produto de interesse ou material básico para a fabricação do papel (MOKFIENSKI, 2004). Durante o tratamento químico da madeira para produção de polpa celulósica as hemiceluloses são mais facilmente degradadas e dissolvidas que a celulose, portanto suas porcentagens na polpa são sempre inferiores, quando comparadas com a celulose (SMOOK, 2002).

As madeiras que apresentam maiores teores de lignina em sua constituição exigem maior quantidade de álcali para atingir os níveis de deslignificação desejáveis nos processos químicos de polpação, o que implica em uma maior degradação dos carboidratos e dissolução dos polissacarídeos de baixo peso molecular, resultando em decréscimo do rendimento, queda da viscosidade e resistência física da polpa, além de gerar maior quantidade de sólidos para a queima em caldeiras de recuperação (ALENCAR, 2002; QUEIROZ et al., 2004). Similarmente, os extrativos são compostos indesejáveis, pois consomem álcali e podem gerar incrustações nos equipamentos industriais e na polpa celulósica, conhecidos como depósitos de “pich” (SILVÉRIO et al., 2007). Dentre os estudos que relacionam a composição química com o processo de deslignificação e a qualidade da polpa celulósica da madeira de eucalipto, citam-se: Khristova et al. (2006), Carvalho; Gouvêa et al. (2009), Silva; Colodette (2014), Neiva et al. (2014, 2015).

Para Assis et al. (2016), a produtividade em IMAcelulose (toneladas de celulose seca ao ar com 10% de umidade-tsa.ha⁻¹.ano⁻¹) é função direta do volume de madeira (IMA: Incremento Médio Anual – m³.ha⁻¹.ano⁻¹), da densidade da madeira e do rendimento depurado em celulose, em que, o aumento simultâneo da densidade da madeira (kg madeira.m⁻³) e do rendimento em celulose (%) reduz o consumo específico da madeira (quantidade de madeira necessária para produzir 1 tsa), refletindo positiva e diretamente na produtividade industrial e na redução dos custos de fabricação.

Ferreira et al. (2006) obtiveram valores médios de 26,25 e 3,36% para lignina insolúvel e solúvel, respectivamente e de 46,07% para o rendimento em polpa, para alcance de índice kappa ± 18 avaliando 12 clones de *Eucalyptus* spp. aos 7 anos. Ademais, na análise dos licores residuais de cozimento, os autores relatam valores médios de 12% para teor de sólidos totais e de 15,9% para o teor de álcali efetivo. Carvalho et al. (2014), em estudo similar com clones de *Eucalyptus* spp, relataram valores médios de 24,0 e 4,1% para lignina insolúvel e solúvel, respectivamente; de 69,5% para teor de holocelulose, 2,1% para extrativos totais, 0,35% para teor de cinzas, e valor médio de rendimento bruto igual a 54,9%.

Sabe-se que os parâmetros de rendimento industrial no processo de polpação são influenciados pelas propriedades da madeira, que por sua vez se alteram com a idade das árvores. Morais (2017), estudando o efeito da idade na qualidade da madeira para celulose em clones de *E. grandis* e *E. grandis* x *E. urophylla* com idades de 1 a 8 anos, constatou que o rendimento da polpação, para número kappa igual a 17, correlacionou-se com o teor de celulose dos materiais avaliados e, os maiores resultados obtidos para este parâmetro foram alcançados pelas madeiras de cinco anos de idade, para ambos os clones. Similarmente, Alencar et al. (2002), em estudo com a mesma finalidade em árvores de *E. grandis* x *E. urophylla* com idades de 1 a 7 anos, constataram que tanto a densidade básica quanto o rendimento em polpa tiveram correlação com a idade, observando uma tendência de estabilização do rendimento depurado entre 5 e 6 anos de idade.

Na tabela 1 são apresentados valores médios, mínimos e máximos para as características tecnológicas de 75 amostras de madeiras de clones de *Eucalyptus* spp., em idade de corte para a produção de celulose e papel, levantados por Gomide et al. (2010).

Tabela 1. Características tecnológicas de clones de *Eucalyptus* spp.

Características	Média	Mínimo	Máximo	Desvio- padrão
Densidade básica, kg/m ³	493	429	555	26,48
Teor de extrativos, %	3,08	1,24	7,29	1,27
Teor de lignina (total), %	27,3	23,3	30,9	1,77
Álcali ativo, %	20,1	16,9	23,7	1,37
Rendimento, %	49,5	44,6	53,1	1,99
Viscosidade, cP	41,9	27,2	61	7,23
Consumo específico (m ³ / t cel)	4,11	3,69	4,71	0,26

Fonte: Gomide et al. (2010).

3.8. Processo Kraft de polpação

O processo Kraft de polpação foi desenvolvido em 1879, na Alemanha, pelo pesquisador Dahl (SILVA JR, 2001), e se tornou o principal processo de produção de celulose, sendo ainda hoje o mais empregado no mundo. O processo objetiva, em síntese, a individualização das fibras pela dissolução da lignina presente, principalmente na lamela média da parede celular do lenho, utilizando-se uma solução alcalina de hidróxido de sódio (NaOH) e o sulfeto de sódio (Na₂S), denominada licor branco (BRITT, 1965; GOMIDE, 1979).

De acordo com Britt (1965), a presença de Na₂S no licor de cozimento resulta no aumento da taxa de deslignificação e maior retenção de pentosas na polpa, e por isso, o sulfeto traz uma reação favorável ao processo de polpação, atuando como catalisador da deslignificação. Para Perissoto (2005) a utilização do sulfeto de sódio proporciona menor exposição da madeira à solução alcalina, o que permite a produção de polpas mais resistentes em função da menor degradação dos carboidratos.

O NaOH e Na₂S são eletrólitos e, em solução aquosa, dissociam-se formando os íons Na⁺, OH⁻, HS⁻ e S²⁻, em que os três últimos são os únicos ativos nas reações de polpação (GOMIDE, 1979). As reações que ocorrem no processo Kraft são bastante complexas e de forma simplificada podem ser melhor compreendidas pelas seguintes etapas: (1) transporte de íons do licor de cozimento para a superfície dos cavacos; (2) difusão dos íons para o interior dos cavacos; (3) reações químicas entre os íons e os componentes químicos do lenho; (4) difusão dos produtos das reações

para o exterior dos cavacos e (5) transporte dos produtos de reação para o licor de cozimento (MIMMS et al., 1993).

A impregnação dos cavacos na polpação se dá por penetração física e por difusão dos íons no interior dos cavacos, e esta depende da concentração e sulfidez do licor de cozimento e da acessibilidade da madeira, dada em função de suas características físicas, químicas e anatômicas. A sulfidez refere-se a participação do sulfeto de sódio no licor branco, que é a relação percentual entre a quantidade de Na_2S e o álcali ativo ($S = \text{Na}_2\text{S} \times 100/\text{AA}$) e, em geral, situa-se na faixa de 15-35%, expressa como NaOH (MOFKIENSKI, 2004).

Dentre as principais vantagens do processo Kraft, citam-se: a adaptação aos diversos materiais lenhosos, um eficiente sistema de recuperação de reagentes químicos e de energia e a produção de polpas de alta qualidade com excelentes propriedades de resistência (GOMIDE et al., 1980). A qualidade da polpa é avaliada basicamente pela taxa de lignina residual (número kappa), pelo grau de degradação dos carboidratos (viscosidade) e pelas suas propriedades físico-mecânicas (SILVA JR, 1995).

Apesar da constante busca por novas técnicas que visem maior eficiência nos processos de polpação celulósica, que tem levado ao desenvolvimento dos chamados cozimentos modificados, têm-se como consolidados os aspectos positivos do processo Kraft, sendo este ainda o mais usualmente utilizado pelas indústrias de celulose na caracterização inicial de uma matéria-prima.

Considerando a avaliação tecnológica da qualidade da madeira de clones de *Eucalyptus* sp., Gomide et al. (2004) propõe a determinação da curva de deslignificação da madeira, mediante a aplicação de diferentes cargas de álcali ativo, com o objetivo de se estabelecer a carga de álcali necessária para obtenção do número kappa desejado, a partir de análises de regressão. Ainda segundo os autores, empregando-se equações de regressão, é possível calcular a viscosidade da polpa, o rendimento do processo de polpação e o álcali ativo consumido durante o cozimento para determinado número kappa preestabelecido.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Caracterização do teste clonal de *Eucalyptus* spp.

O teste clonal foi implantado em dezembro de 2012, no município de Luziânia, no Estado de Goiás (Figura 3), localizado nas seguintes coordenadas geográficas: latitude 16° 16' 37" S, longitude 47° 44' 02" O, com altitude média de 930m, em uma propriedade privada. No total, para o experimento, foram introduzidos 93 clones puros e híbridos de diversas espécies do gênero *Eucalyptus*, advindos de diferentes empresas (Suzano Papel e Celulose, Clonar Resistência à Doenças Florestais, Grupo Plantar, Viveiro Esteio, Grupo S&D Florestal, Top Clone, V&M Florestal).

As condições edafoclimáticas do município de Luziânia são características do bioma Cerrado (Köppen e Geiger, Aw), com clima tropical sub-úmido, com invernos mais secos e verões mais úmidos. Apresenta temperatura média de 21°C, e precipitação anual de 1515 mm, com estação chuvosa geralmente com início entre os meses de setembro e outubro, se estendendo até os meses de março e abril, e outra estação seca, marcada por deficiência hídrica (Figura 4). O solo característico da região é do tipo Plintossolo háplico, classificado como cascalhento, com pH ácido, baixa saturação de bases e alta saturação por alumínio (Tabela 2).

O plantio foi conduzido obedecendo a conformação previamente estabelecida no croqui do delineamento experimental, com as mudas identificadas com etiquetas, seguindo um espaçamento de 3,0 x 3,0 m. O delineamento utilizado foi o de blocos casualizados, com 29 repetições e parcelas únicas (single tree plots), totalizando 2.697 plantas. Foi realizado o preparo do solo com subsolagem a 90 cm, aplicação de gesso e calcário, adubação com nitrogênio, fósforo, potássio e boro, de acordo com a análise química do solo, além de capina química com glifosato em área total e controle de formigas (RIBEIRO, 2017). A taxa de mortalidade observada para o experimento de estudo foi de 2,85% (RIBEIRO, 2017).

Tabela 2. Atributos químicos do solo da área experimental

Profundidade (cm)	Teor de argila (%)	pH (CaCl ₂)	CTC	V (%)	H+Al (%)
0-20	34	4,4	4,7	13	88
20-40	20	4,7	2,5	20	79

Fonte: Ribeiro (2017).

Figura 3. Imagens da área experimental: teste clonal de *Eucalyptus* spp. em Luziânia, Goiás, aos 4 anos de idade.

Figura 4. Médias mensais de temperatura (°C) e de precipitação acumulada (mm) dos últimos 30 anos para o município de Luziânia-GO.

Fonte: Agri tempo (2017).

4.2. Seleção dos híbridos de *Eucalyptus* spp.

Na tabela 3 são apresentadas as procedências, bem como os respectivos valores médios de incremento médio anual (IMA) dos seis híbridos de *Eucalyptus* spp., selecionados para o estudo.

Na seleção dos materiais genéticos, foi considerado o IMA, calculado a partir dos dados de DAP e altura total das árvores aos 24 meses de idade, obtidos dos dados de monitoramento do teste clonal (equipe da Universidade Federal de Goiás). Este parâmetro foi avaliado junto às características potenciais dos híbridos para produção de celulose, de acordo com a literatura específica, de forma que foram selecionados três materiais genéticos já estabelecidos no mercado para a produção de celulose de fibra curta, que apresentaram os melhores desempenhos em IMA (clones A, B e F, vide Tabela 3), e três materiais genéticos, cujos desempenhos em IMA foram satisfatórios, porém são estes ainda pouco avaliados quanto à aplicabilidade para produção de celulose (clones C, D e E, vide Tabela 3).

Tabela 3. Procedência e parâmetros de crescimento dos híbridos de *Eucalyptus* spp. selecionados (24 meses de idade).

Clone	Procedência/Híbrido	Empresa Fonte	IMA (m³/ha.ano)
A	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Plantar	58,83
B	Híbrido espontâneo de <i>E. urophylla</i>	Plantar	60,52
C	<i>E. pellita</i> x <i>E. grandis</i>	V. Esteio	55,25
D	<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. tereticornis</i>	S&D	48,39
E	<i>E. grandis</i> x (<i>E. urophylla</i> x <i>E. tereticornis</i>)	Suzano	46,51
F	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	Suzano	63,11

IMA: incremento médio anual.

4.3. Seleção das árvores do estudo e coleta das amostras do lenho

Cinco árvores por clone híbrido foram selecionadas e cortadas (dezembro de 2016, 48º mês, ou 4 anos), de forma sistemática, com o objetivo de se evitar o efeito de bordadura. Neste contexto, apenas os blocos 3, 9, 15, 21 e 27 foram selecionados para a realização do estudo, obtendo-se uma árvore/clone/bloco (Figura 5).

Para a caracterização do lenho, foram retirados discos de aproximadamente 6 cm de espessura, em 6 diferentes posições longitudinais (0, DAP, 25, 50, 75 e 100%), considerando-se a altura comercial de referência (6 cm de diâmetro).

Adicionalmente, foram retirados 4 toretes/árvore, com aproximadamente 50 cm de comprimento, em posições intermédias entre a base e 25%, 25 e 50%, 50 e 75% e 75 e 100%, para serem transformados em uma amostra composta de cavacos. A Figura 6 apresenta um esquema da amostragem realizada nas árvores e indica as análises delineadas para as diferentes porções da madeira.

[illegible]

Figura 5. Croqui da amostragem de árvores dos seis híbridos de *Eucalyptus* spp. selecionados.

Figura 6. Esquema representativo da amostragem no tronco das árvores e correspondentes análises.

Fonte: ROQUE (2005) - figura adaptada.

4.4. Determinação dos parâmetros de crescimento e de produção

Após a derrubada, foram avaliados o DAP (cm), a altura total (m), a altura comercial (m) e o incremento médio anual (IMA, m³/ha.ano) das árvores do estudo (Figura 7-A). Foi realizada uma cubagem rigorosa e determinado o volume real com casca até um diâmetro mínimo de 6 cm, para posterior estimativa de produtividade em celulose (m³/árvore) (Figura 7-B). Nas mesmas posições da cubagem do fuste, foram tomadas as espessuras de casca, mensuradas com régua de precisão, em milímetros.

Figura 7. Determinação dos parâmetros de crescimento dos híbridos de *Eucalyptus* spp. A) Mensuração das alturas total e comercial das árvores. B) Demarcação das posições para retirada dos discos/toras e cubagem.

4.5. Densidade básica e densidade aparente do lenho

4.5.1. Densidade básica

Para a determinação da densidade básica pelo método da balança hidrostática (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT, NBR 11941-02) foram obtidas cunhas de aproximadamente $\frac{1}{4}$ do total de cada disco, das 6 diferentes posições longitudinais das árvores (Figura 8-A).

Após a retirada da casca, as amostras foram submersas em água, permanecendo até a completa saturação (Figura 8-B). Para determinação do peso imerso utilizou-se dispositivo para imersão das cunhas em água composto por suporte, linha e parafuso (Figura 8-C). As cunhas foram fixadas no suporte através da ponta do parafuso e mergulhadas em becker contendo volume conhecido de água até ficarem submersas, evitando-se durante o procedimento a imersão do parafuso (Figura 8-D) e o contato da cunha de madeira com as paredes do recipiente. O peso seco foi determinado mantendo-se os corpos-de-prova em estufa a $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ até peso constante (aproximadamente 76 horas) do conjunto de corpos-de-prova.

A densidade básica ponderada do lenho das árvores (g/cm^3) foi determinada a partir dos valores de densidade básica média e o volume das seções longitudinais amostradas do tronco, conforme descrito por Trugilho (2009).

Figura 8. Determinação da densidade básica da madeira dos híbridos de *Eucalyptus* spp. A) Corpos-de-prova confeccionados. B) Corpos-de-prova em processo de saturação. C) Dispositivo para aferição do peso imerso. D) Aferição do peso imerso.

4.5.2. Densidade aparente

4.5.2.1. Obtenção dos perfis radiais de densidade aparente do lenho em diferentes posições longitudinais

Para obtenção dos perfis radiais de densidade aparente do lenho das árvores, através da densitometria de raios-X, foram utilizados os discos das diferentes posições longitudinais.

Da secção transversal dos discos foram cortadas porções radiais (aproximadamente 20x10 mm, largura e altura), coladas em suporte de madeira (Figura 9-A) e seccionadas amostras na direção transversal (2 mm, de espessura), em equipamento de dupla serra circular paralela. Essas amostras foram, em seguida, acondicionadas a 20° C, 60% de umidade relativa, até o alcance da umidade de equilíbrio (aproximadamente 12%) (AMARAL E TOMAZELLO, 1998). A densidade aparente das amostras do lenho foi determinada com uso do equipamento QTRS-01X Tree Ringer Analyzer, da Quintek Measurement Systems (EUA). As amostras foram fixadas em suporte metálico acessório interno (Figura 9-B), e submetidas a uma varredura na direção radial (sentido medula-casca), a cada 0,08 milímetros (Figura 9-C). A determinação dos valores de densidade gerados pelo equipamento, em tempo real, é baseada na relação entre a atenuação de raios X, e a densidade, expressa pela Equação 1:

$$\frac{I}{I_0} = e^{(-\mu t)} \quad (1)$$

Em que: I = intensidade do feixe de radiação após atravessar pela amostra; I_0 = intensidade do feixe de radiação sem que tenha atravessado a amostra; μ = coeficiente de atenuação linear da amostra (cm^{-1}); t = espessura da amostra (cm); e = base logarítmica natural.

Para cada ponto ao longo do perfil radial, as intensidades I e I_0 são medidas enquanto μ é calculado. O coeficiente linear de atenuação (μ) está relacionado com a densidade através da Equação 2:

$$\mu_l = \mu_m \times \rho \quad (2)$$

Em que: μ_m = coeficiente de atenuação de massa da amostras (cm^2/g); ρ = densidade (g/cm^3)

O coeficiente de atenuação de massa (μ_m) é uma propriedade importante dada em função da energia da radiação incidente e da composição do material, o

que para a madeira inclui a celulose, hemicelulose, lignina, extrativos, cinzas e água. A água presente em cada um desses componentes é considerada um elemento fundamental na acurácia da determinação da densidade (QMS, 1999), justificando a necessidade do controle de umidade das amostras, certificando-se que estejam em equilíbrio com a umidade relativa da atmosfera.

Enquanto μ_m é conhecido, a densidade (ρ) pode ser calculada para cada ponto ao longo do perfil da amostra em que μ_i foi determinada. A calibração do sistema é feita através da determinação do coeficiente de atenuação de massa do material que está sendo analisado.

Figura 9. Determinação da densidade aparente do lenho das árvores de *Eucalyptus* spp. através da densitometria de raios-X. A) Preparo das amostras- corte e colagem em suporte de madeira. B) Equipamento de raios- X e encaixe das amostras no suporte metálico. C) Varredura e perfil de densidade aparente das amostras de diferentes posições longitudinais.

4.5.2.2. Análise qualitativa do lenho

Para a avaliação qualitativa do lenho das árvores de *Eucalyptus* spp., foram obtidas das amostras transversais seccionadas dos discos (vide item 4.5.2.1.) imagens digitais escaneadas e imagens radiográficas, utilizando-se equipamento de densitometria de raios- X (Faxitron X-ray, LX 60) (Figura 10-A). Para a obtenção das imagens radiográficas, as amostras do lenho foram dispostas na câmara de irradiação (20 seg, 30 KV, 83 cm da fonte- ajustados em análise prévia) (Figura 10-B) e geradas em escala de cinza, onde quanto mais próximo da cor branca, maiores são os valores de densidade do lenho (Figura 10-C). Estas imagens foram empregadas na interpretação dos perfis radiais de densidade aparente (item 4.5.2.1.).

Figura 10. Avaliação qualitativa dos perfis radiais do lenho. A) Equipamento de raios- X. B) Amostras dispostas na câmara de radiação. C) Imagens digitais das amostras do lenho, geradas em escala de cinza.

4.6. Características anatômicas do lenho

4.6.1. Morfologia das fibras

A determinação dos parâmetros quantitativos das fibras das 6 diferentes posições longitudinais (base-topo), bem como das 3 porções radiais (medula-casca), referentes à 0, 50 e 100% de cada amostra radial, foi realizada de acordo com o método de Franklin (JOHANSEN, 1940), através da confecção de macerado, em que fragmentos do lenho foram colocados em tubos de ensaio (ácido acético e peróxido de hidrogênio 120 vol., 1:1) fechados e mantidos em estufa (60°C, 48h) para a dissociação dos elementos celulares (Figura 11- A e B); em seguida, as fibras do lenho foram lavadas em água destilada, coradas em safranina, montadas com glicerina em lâminas de vidro e analisadas sob microscopia de luz (Figura 12- A, B e C). Foram obtidas imagens dos materiais macerados, mensurando-se o comprimento de fibra no aumento de 10x e a largura e diâmetro de lume no aumento de 40x (INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMY- IAWA-COMMITTEE, 2004), a partir das imagens capturadas e submetidas em programa Image Pro-Plus (Figura 13- A, B e C).

A partir das medições das dimensões das fibras: (D) = diâmetro do lume, μm ; (L) = largura da fibra, μm ; (C) = comprimento da fibra, μm ; e (E) = espessura da

parede (obtida a partir da diferença entre a largura da fibra e o diâmetro do lume), μm ; foram calculados índices indicativos da qualidade da polpa celulósica (FOELKEL; BARRICHELO, 1975). São estes:

- Coeficiente de flexibilidade (%), $[CF = (D/L) \times 100]$;
- Índice de enfeltramento, $[CE = C/L]$;
- Fração parede (%), $[FP = 2 \times E/L]$;
- Índice de Runkel, $[IR = 2 \times E/D]$.
- Coeficiente de rigidez, $[C/L]$
- Fator de forma de luce, $[(L^2 - D^2)/(L^2 + D^2)]$

Figura 11. Preparo das amostras de madeira para maceração, em laboratório. A) Fragmentos de madeira em tubos com solução de ácido acético e peróxido de hidrogênio. B) Amostras em estufa à temperatura de 60°C .

Figura 12. Processo de confecção de lâminas histológicas temporárias e de mensuração de fibras. A) Reagentes utilizados na confecção das lâminas. B) Montagem de lâmina com material macerado. C) Obtenção das imagens das fibras através do software do microscópio estereoscópio Leica.

Figura 13. Fibras dissociadas de *Eucalyptus*. Imagens obtidas através do software do microscópio. A) Fibras em ampliação de 40x. B) Fibras em ampliação de 400x. C) Mensuração de fibras no software Image-Pro Plus.

4.6.2. Morfologia dos vasos

Para a análise morfológica dos vasos foram utilizadas as amostras radiais dos discos do DAP obtidas anteriormente para a densitometria de raios-X (item 4.5.2). Essas amostras foram coladas em suporte de madeira (Figura 14-A) e polidas no plano transversal com lixas abrasivas de granulometria crescente (120-1000 grãos/mm²) (Figura 14-B), seguido de aplicação de ar comprimido para desobstrução dos vasos.

Foram coletadas imagens digitais das amostras na seção transversal com microscópio de luz (aumento de 10x), em 3 diferentes posições do perfil radial (0, 50 e 100%), para posterior mensuração do diâmetro tangencial, área ocupada e

frequência dos vasos, através da aplicação do software de análise do Image Pro-Plus (versão 5.0).

Figura 14. Preparo das amostras para a análise morfológica dos vasos do lenho. A) Amostras coladas em suporte de madeira. B) Amostras no processo de polimento com lixas abrasivas.

4.7. Composição química

A composição química do lenho foi determinada para os teores de extrativos, lignina e de cinzas das amostras provenientes do disco do DAP. Porções dos discos do lenho foram moídas em moinho do tipo Willey (Retsch, modelo SM100), sendo a serragem obtida classificada através de um conjunto de peneiras de 40 e 60 mesh, para posterior retirada da fração retida na peneira de 60 mesh (descrição no Apêndice-A), destinada aos ensaios químicos TAPPI T cm- 85 (TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY- TAPPI, 2007). A serragem foi armazenada em frascos hermeticamente fechados e devidamente identificados (Figura 15-A). O teor seco das amostras de serragem foi determinado de acordo com a norma TAPPI T264 cm-97 (TAPPI, 2007).

A determinação do teor de extrativos totais foi realizada através de duas extrações consecutivas em equipamento Soxhlet (Figura 15-B), utilizando-se como solvente uma mistura de álcool tolueno e álcool etílico (2:1), e, na segunda etapa, somente álcool etílico; seguindo-se uma terceira etapa de extração em água quente, conforme descrito pela norma TAPPI T204 cm-97 (TAPPI, 2007) (Apêndice-B).

A determinação do teor de lignina Klason (solúvel e insolúvel) foi realizada através de hidrólise ácida com ácido sulfúrico em autoclave (Figura 15-C). O teor de

lignina insolúvel, foi verificado pela massa resultante (TAPPI T222 om-02- TAPPI, 2007) e o teor de lignina solúvel foi determinado por espectrofotometria (Figura 15-D). Por conseguinte o teor de holocelulose foi calculado por diferença (Equação 3), conforme descrito na norma T19 m-54 (TAPPI, 2007) (Apêndice-C).

O teor de cinzas foi obtido em função do processo de combustão de serragem em mufla a 600° C (Figura 15-E), conforme determinação da TAPPI T211 om-02 (TAPPI, 2007) (Apêndice-D).

$$\text{Holocelulose (\%)} = 100 - (\text{extrativos\%} + \text{lignina total \%} + \text{cinzas \%}) \quad (3)$$

Figura 15. Determinação da composição química dos materiais de estudo. A) Serragem destinada aos ensaios químicos. B) Determinação do teor de extrativos em Soxhlet. C) Autoclave utilizada nos ensaios para a determinação do teor de lignina. D) Espectrofotômetro utilizado nos ensaios para a determinação de lignina solúvel. E) Determinação do teor de cinzas em mufla.

4.8. Cozimento Kraft

4.8.1. Preparo do material

A partir dos toretes amostrados das diferentes porções do tronco das 5 árvores/clone de *Eucalyptus* spp. (vide item 4.3), foram retiradas discos de aproximadamente 6 cm de altura, a partir dos quais foram confeccionados cavacos,

em torno de 0,5 mm de espessura. Na sequência os cavacos foram armazenados em sacos de polietileno para posterior condução das demais etapas de estudo.

4.8.2. Cozimentos testes

Foram realizados cozimentos testes pelo processo de polpação Kraft, utilizando-se diferentes níveis de carga alcalina, a partir dos parâmetros apresentados na Tabela 4, com o objetivo de explorar limites de cargas de álcali ativo (%), visando alcance de kappa em torno de 18, dos materiais de estudo (GOMIDE; FANTUZZI NETO; LEITE, 2004; CARVALHO; SILVA; COLODETTE, 2014).

Tabela 4. Condições dos cozimentos testes pelo processo de polpação Kraft.

Parâmetro	Condição
Álcali ativo, % (como NaOH)	12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26 e 28
Sulfidez, %	25
Massa seca de cavacos, g	70
Relação licor/madeira	4:1
Temperatura máxima, °C	166
Tempo de aquecimento, minutos	90
Tempo de cozimento, minutos	60
Fator H	780

4.8.3. Curvas de cozimento

A elaboração da curva de cozimento tem como principal objetivo estipular a carga alcalina necessária para a obtenção de determinados níveis de deslignificação (expresso em número kappa) (GOMIDE; FANTUZZI NETO; LEITE, 2004). No presente estudo, a curva de cozimento de cada material genético foi estabelecida a partir de 4 diferentes cargas de álcali ativo, selecionados com base nos cozimentos testes. Os cozimentos foram realizados em autoclave rotativa (Figura 16-A), constituída por oito cápsulas de aço inoxidável, com capacidade individual de 450 ml, seguindo-se os parâmetros descritos na Tabela 5.

O processo de polpação foi conduzido em triplicata do material composto de cavacos de 5 árvores de cada material genético (Figura 16-B). Após cada

cozimento, a polpa obtida foi submetida às seguintes etapas: (1) acondicionamento em sacos de microfibras devidamente identificados; (2) extração e armazenamento do licor negro; (3) lavagem com água corrente para a retirada do excesso de licor aderido (Figura 17-A); (4) desagregação em “hidrapulper” laboratorial (Figura 17-B); (5) reacondicionamento em sacos de microfibras e centrifugação (Figura 17-C); (6) depuração em depurador laboratorial com fenda de 0,2 mm (Figura 17-D); (7) coleta dos materiais ‘rejeitos’ retidos na superfície da tela e transferência para estufa a $103 \pm 2^\circ \text{C}$; e (8) centrifugação e acondicionamento da polpa depurada.

A partir dos resultados obtidos nas curvas de cozimento, foi definida a carga alcalina necessária para obtenção de polpa com número kappa 18, utilizando-se de equações de regressão.

Figura 16. Cozimento Kraft dos materiais de estudo. A) Cozimento em autoclave rotativa. B) Amostra composta de cavacos.

Figura 17. Etapas pós-cozimento das polpas celulósicas dos materiais de estudo. A) Polpa celulósica lavada B) Desagregação da polpa celulósica em “hidrapulper” laboratorial. C) Reacondicionamento da polpa celulósica em sacos de microfibras e centrifugação. D) Depurador laboratorial com fenda de 0,2 mm.

Tabela 5. Condições do cozimento Kraft para obtenção das curvas características de cada material genético.

Parâmetro	Condição
Álcali ativo, % (como NaOH)	22, 24, 26 e 28
Sulfidez, %	25
Massa seca de cavacos, g	70
Relação licor/madeira	4:1
Temperatura máxima, °C	166
Tempo de aquecimento, minutos	90
Tempo de cozimento, minutos	60
Fator H	780

4.8.4. Caracterização da polpa Kraft

Em relação ao desempenho tecnológico para produção de celulose dos diferentes clones híbridos de estudo, foram avaliadas propriedades da polpa celulósica, de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros avaliativos da polpa celulósica kraft.

Parâmetro	Norma/ Cálculo
Rendimento bruto, %	Relação entre peso seco de polpa marrom e peso seco de madeira (cavacos)
Rendimento depurado, %	Relação entre peso seco de polpa depurada e peso seco de madeira (cavacos)
Teor de rejeitos, %	Relação entre peso seco de rejeitos e peso seco de madeira (cavacos)
Número kappa	TAPPI Methods T 236 om-99
TAPPI Methods – Technical Association of Pulp and Paper Industry.	

A partir dos parâmetros descritos na Tabela 6, foram calculados o consumo específico de madeira e o IMACEL (Incremento médio anual de celulose), conforme Equações 4 e 5.

$$CEm = \frac{1}{dB \cdot RD} \times 0,9 \quad (4)$$

Em que: CEm = consumo específico de madeira, em $m^3 \cdot tsa^{-1}$; dB = densidade básica da madeira, em $g \cdot cm^{-3}$; RD= rendimento depurado, em decimal; 0,9 – fator de conversão para tsa (tonelada seca ao ar), considerando a polpa com 10% de umidade.

$$IMACEL = \frac{IMA_{C/C} \cdot (1 - \% casca)}{CEm} \quad (5)$$

Em que: $IMA_{C/C}$ = incremento médio anual de madeira com casca, em $m^3 \cdot ha \cdot ano$; % casca= teor de casca em volume, em decimal; CEm = consumo específico de madeira, em $m^3 \cdot tsa^{-1}$.

4.8.5. Caracterização do licor negro

Do licor negro coletado ao final de cada cozimento, foram avaliados o álcali ativo residual (base NaOH e pH) (Apêndice-E), através do método descrito por Segura (2012), e o teor de sólidos totais (TAPPI Methods T 650 om-89).

Com base nos resultados dessas avaliações foram calculados: (i) teor de sólidos gerados por tonelada de polpa celulósica, (ii) álcali ativo consumido, e (iii) álcali ativo consumo por tonelada de celulose produzida, de acordo com as Equações 6 a 8.

$$(i) \quad tss/adt = \frac{(1 - RB) + AA}{RD} \times 0,9 \quad (6)$$

Em que: tss/ adt = teor de sólidos gerados por tonelada de polpa celulósica, em $ttsa^{-1}$; RB = rendimento bruto, em decimal; RD = rendimento depurado, em decimal; AA = álcali ativo aplicado, em decimal; 0,9 – fator de conversão para tsa (tonelada seca ao ar), considerando a polpa com 10% de umidade.

$$(ii) \quad AAC = AAA - AAR \quad (7)$$

Em que: AAC – álcali ativo consumido, $g.L^{-1}$; AAA – álcali ativo aplicado, $g.L^{-1}$; AAR – álcali ativo residual, $g.L^{-1}$.

$$(iii) \quad AAC = \frac{AAC \cdot LM}{RD} \times 0,9 \quad (8)$$

Em que: álcali ativo consumido, $g.L^{-1}$; LM = relação licor: madeira, em $L \cdot kg^{-1}$; RD = rendimento depurado, em decimal; 0,9 – fator de conversão para tsa (tonelada seca ao ar), considerando a polpa com 10% de umidade.

4.9. Análise estatística dos dados

Na análise estatística dos resultados, além da determinação das estatísticas básicas como média, desvio-padrão e coeficiente de variação, foram aferidos os “outliers” pelo método Box- Plot (TUKEY, 1977), a normalidade de distribuição dos dados pelo método Shapiro- Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965) e a heterogeneidade da variância pelos métodos Bartlett (BARTLETT, 1937) e Levene (LEVENE, 1960). Foi aplicada a análise de variância (ANOVA) para verificar o efeito dos diferentes materiais genéticos sobre cada variável-chave analisada e o teste de Tukey, ajustado a 95% de probabilidade. Na análise dos parâmetros de cozimento foram também realizadas análises de regressão, e, ao final, foi utilizado o software Past para análise de componentes principais (ACP), para as variáveis de estudo do lenho e dos parâmetros de cozimento Kraft.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Parâmetros de crescimento e de produtividade das árvores de *Eucalyptus* spp.

Na Tabela 7 são apresentados os valores médios dos parâmetros de crescimento e de produtividade das árvores de *Eucalyptus* spp. Os valores médios de porcentagem de casca e fator de forma (f), determinados a partir da cubagem rigorosa das árvores encontram-se no Apêndice-F. Houve variação estatística entre clones significativa ($p < 0,05$) para todas as variáveis. Em relação às alturas total e comercial, o clone D mostrou o menor valor para ambas, de 20,18 e 14,51 m, respectivamente, diferindo significativamente aos demais clones. O clone F apresentou a maior média de DAP, com 18,06 cm, significativamente superior aos clones D e E, com 14,06 e 14,92 cm, respectivamente. Para os parâmetros volume com casca, volume sem casca e incremento médio anual, os clones B e F foram superiores, os clones A, C e E intermediários e o clone D de desempenho inferior. As estimativas dos coeficientes de variação (C.V, %) estão dentro da faixa normalmente encontrada na literatura (TOLFO et al., 2005; MASSARO et al., 2010; HSING et al., 2016) e coerentes com as características avaliadas, com valores superiores para os volumes e biomassas.

Em relação a exploração comercial da madeira, busca-se principalmente o estabelecimento de florestas economicamente viáveis, em que o objetivo corrente seja produzir mais, em menos espaço, visando manter as perspectivas de ganho florestal (ABISOLO, 2017). Dentro deste contexto, pode-se dizer que o volume e o incremento médio de madeira (IMA), constituem-se os parâmetros dendrométricos que melhor refletem o potencial de mercado dos híbridos de *Eucalyptus* spp. do estudo, estando relacionados a todas as ações técnicas e operacionais desenvolvidas.

O crescimento e a produtividade dos clones, de forma geral, foram elevados, considerando estimativas médias conhecidas no Brasil para plantios de eucalipto. Neste sentido, tem-se que, apesar de jovens, os clones apresentaram bom desempenho, demonstrando a boa adaptação e potencialidade ao local. Em um teste clonal conduzido no Município de Jaboticabal- SP, com parcelas de árvores únicas espaçadas a 3,5 x 2,0 m, Hsing et al. (2016) encontraram, para híbridos de *E.*

grandis x *E. urophylla* com 2,25 anos de idade, valores médios de DAP, altura comercial e de volume sem casca, respectivamente, de 11,48 cm, 11,55 m e 0,0632 m³.árvore⁻¹. Trugilho et al. (2015), estudando clones e espécies de *Eucalyptus*, aos 4 anos, no Estado de Minas Gerais, encontraram DAP médio de 12,40 cm, altura total de 19,93 m e volume sem casca de 0,10 m³.árvore⁻¹. Sansígolo e Ramos (2010), estudando clones de *E. grandis*, com idade aproximada de 4 anos, plantados em três solos com características distintas, encontraram para as árvores plantadas em áreas de baixa fertilidade, valores médios de 25 e 21,8 m, para altura total e altura comercial, respectivamente; de 20,7 para DAP; e de 0,42 e 0,36 m³.árvore⁻¹, para respectivos volume com casca e sem casca.

Tabela 7. Valores médios para as características de crescimento e de produtividade dos seis clones de *Eucalyptus* spp., aos 4 anos.

Clone	HT (m)	HC (m)	DAP (cm)	VCC (m ³)	VSC (m ³)	IMA (m ³ .ha ⁻¹ .ano ⁻¹)
A	22,91 a (4,93)	17,49 a (9,52)	15,88 abc (13,86)	0,20 ab	0,18 ab (31,15)	55,40 ab
B	23,96 a (13,80)	18,74 a (21,90)	17,56 ab (22,15)	0,22 a	0,19 a (28,50)	60,47 a
C	23,43 a (11,62)	18,61 a (19,98)	16,66 abc (17,24)	0,21 ab	0,18 ab (18,98)	57,47 ab
D	20,18 b (2,36)	14,51 b (2,74)	14,06 c (9,69)	0,12 b	0,11 b (20,84)	34,60 b
E	22,56 a (3,62)	16,97 a (4,11)	14,92 bc (4,06)	0,18 ab	0,15 ab (11,20)	48,70 ab
F	23,88 a (3,56)	18,24 a (4,94)	18,06 a (7,08)	0,25 a	0,21 a (16,63)	68,26 a

Clone A= *E. grandis* x *E. urophylla*; clone B= híbrido espontâneo de *E. urophylla*; clone C= *E. pellita* x *E. grandis*; clone D= *E. camaldulensis* x *E. tereticornis*; clone E= *E. grandis* x (*E. urophylla* x *E. tereticornis*); clone F= *E. urophylla* x *E. grandis*; HT= altura total; HC= altura comercial; VCC= volume com casca; VSC= volume sem casca; IMA= incremento médio anual. Médias e, entre parênteses, valores de coeficiente de variação (%). Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p > 0,05%).

Vários fatores podem afetar a produtividade do eucalipto, a exemplo do genótipo, do espaçamento de plantio, do tipo de solo e clima, bem como a idade da floresta (HSING et al., 2016). Neste sentido, é importante salientar que os resultados

obtidos indicam o potencial de desenvolvimento dos seis híbridos de *Eucalyptus* spp., aos 4 anos, na região de Luziânia- GO.

Abayomiad e Adedoyin (2004), afirmam que a produtividade é uma característica complexa resultante da interação dos parâmetros morfológicos, fisiológicos e ambientais no crescimento das plantas. Em complemento, Kamell e Losel (1995) destacam que, em várias regiões do mundo, o déficit hídrico é sua maior limitante, pois a taxa de crescimento é diretamente proporcional à disponibilidade de água no solo. Para os híbridos de *Eucalyptus* spp. do estudo, nota-se um excelente desempenho no crescimento e produtividade das árvores, embora o clima característico da região de plantio seja marcado por períodos de déficit hídrico, ligeiramente superior a outras regiões com florestas plantadas no Brasil. Isso supostamente se deve ao desenvolvimento de materiais genéticos mais adaptados à condições de seca, de maior rusticidade.

5.2. Densidade básica e densidade aparente do lenho das árvores de *Eucalyptus* spp.

5.2.1. Densidade básica

Os valores médios de densidade básica geral e ponderada do lenho, obtidos através da avaliação das diferentes posições longitudinais do tronco das árvores dos seis híbridos de *Eucalyptus* spp. são apresentados na Tabela 8. O valor médio da densidade básica difere entre os clones pelo teste de Tukey, com o maior valor obtido para o clone E, de 0,50 g/cm³, superior aos clones A e C, de 0,46 e 0,45 g/cm³, respectivamente. Os valores de densidade básica ponderada variaram entre 0,46-0,50 g/cm³, não apresentando diferença significativa entre os clones.

Tabela 8. Valores médios de densidade básica e densidade básica ponderada dos seis clones de *Eucalyptus* spp.

Clone	Densidade básica	Densidade básica ponderada
	(g/cm ³)	
A	0,46 bc (11,42)	0,47 a (7,46)
B	0,49 a (14,79)	0,50 a (7,53)
C	0,45 c (17,94)	0,46 a (7,52)
D	0,47 abc (8,91)	0,47 a (5,02)
E	0,50 a (4,68)	0,49 a (2,66)
F	0,49 ab (6,81)	0,50 a (2,85)

Clone A= *E. grandis* x *E. urophylla*; clone B= híbrido espontâneo de *E. urophylla*; clone C= *E. pellita* x *E. grandis*; clone D= *E. camaldulensis* x *E. tereticornis*; clone E= *E. grandis* x (*E. urophylla* x *E. tereticornis*); clone F= *E. urophylla* x *E. grandis*. Médias e, entre parênteses, valores de coeficiente de variação (%). Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05\%$).

De acordo com Downes et al. (1997) e Trugilho et al. (2009), diferentes formas de amostragens longitudinais no tronco das árvores podem levar a diferentes estimativas da densidade básica da madeira e, dessa maneira, tanto o tipo de amostragem quanto a forma e o método de obtenção da estimativa da densidade básica podem promover diferenças nas estimativas de massa seca e, conseqüentemente, nas estimativas de produtos por área. Neste contexto, para os híbridos do estudo, os valores médios de densidade básica ponderada, estimados a partir da relação entre a densidade básica média e o volume do fuste comercial dos indivíduos, mostram-se bastante próximos aos valores médios de densidade básica geral obtidos através de média aritmética.

Os valores de densidade básica observados para os seis clones de *Eucalyptus* spp., são coerentes com os verificados em outros estudos com árvores de *Eucalyptus* em idades semelhantes, exemplo de Trugilho et al. (2015) e Castro et al. (2016), que obtiveram valores médios entre 0,45 e 0,50 g/cm³, para clones e

espécies de eucalipto aos 4 anos. Hsing et al. (2016), encontraram valores médios de $0,45 \text{ g/cm}^3$ para híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla*, com 2,25 anos de idade, enquanto Alzate et al. (2005), estudando árvores em idade mais avançada, obtiveram valor médio de densidade básica de $0,49 \text{ g/cm}^3$.

Para os híbridos de estudo, a densidade ponderada média variou entre $0,46$ e $0,50 \text{ g/cm}^3$. Alzate et al. (2005) em estudo com híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla*, aos 7 anos, encontraram média ponderada da densidade de $0,49 \text{ g/cm}^3$, enquanto Gonçalves et al. (2014) estudando o mesmo híbrido, aos 8 anos, apresentaram densidade de $0,51 \text{ g/cm}^3$. Tem-se a partir destes trabalhos, que os valores de densidade ponderada encontrados neste estudo, aos 4 anos, mostram-se similares aos valores observados na literatura para árvores com idades mais avançadas. Trugilho et al. (2010) afirmam que tanto o volume individual da árvore quanto a densidade básica e a estimativa de massa de matéria seca estão sob forte controle genético. Contudo, sabe-se que os fatores como idade e sítio também influenciam no crescimento e na densidade do lenho, ocasionando pequenas variações para estas propriedades. O que se observa é que, geralmente, a densidade básica eleva-se com o aumento da idade (MENESES et al., 2015). Ademais, Meneses et al. (2015) mencionam que, em alguns trabalhos, têm-se verificado que a densidade básica média, considerando árvores de mesma idade, apresenta a tendência de ser maior em solos de pior qualidade, a exemplo o de Raymond e Muneri (2001), estudando espécies de *E. globulus* e *E. nitens*, o que pode vir a corroborar com os resultados observados no presente estudo.

Analisando a variação desta propriedade entre os clones de A a F, em que se observam valores médios entre $0,46$ a $0,50 \text{ g/cm}^3$, entende-se que estão dentro da faixa considerada ideal para a produção de celulose (FOELKEL et al. 1990).

Não foi verificado efeito significativo das posições longitudinais do tronco para a maioria dos clones. Os valores de variação longitudinal da densidade básica dos seis clones, são apresentados na Tabela 9, de modo a saber:

- (i) Clones A e B com maiores valores na região da base ($0,50$ e $0,51 \text{ g/cm}^3$, respectivamente), estabilização da região do DAP a 75% e menores valores na posição 100% ($0,39$ e $0,44 \text{ g/cm}^3$, respectivamente).
- (ii) Clone C com maior valor na região da base ($0,48 \text{ g/cm}^3$), com decréscimo da posição 25% até o topo da árvore ($0,46$ - $0,42 \text{ g/cm}^3$);

- (iii) Clone D com valores médios entre 0,47 a 0,49 g/cm³ ao longo do tronco, com maior valor verificado na posição 75%;
- (iv) Clone E com valores médios entre 0,48 e 0,52 g/cm³, com maior valor verificado na região superior do tronco (100%);
- (v) Clone F com aumento da densidade básica de 0,46 para 0,51 g/cm³ da posição 0% até 25% e seguinte estabilização em direção ao topo.

A pequena variação existente entre os valores da densidade básica, no sentido longitudinal, pode ter influência no processamento da madeira destinada a produção de polpa celulósica, conferindo mais homogeneidade ao material composto de cavacos, sendo este um aspecto importante para o rendimento e para a qualidade da polpa. (GONÇALEZ et al., 2014).

Tabela 9. Valores médios da densidade básica por posição longitudinal do tronco dos seis clones de *Eucalyptus* spp.

Clone	Densidade básica (g/cm ³)						Representação gráfica
	Posição longitudinal						
	Base	DAP	25%	50%	75%	100%	
A	0,50 (1,53)	0,47 (1,00)	0,47 (5,30)	0,47 (6,89)	0,46 (7,41)	0,39 (18,14)
B	0,51 (11,53)	0,49 (15,13)	0,49 (11,77)	0,50 (10,54)	0,50 (11,51)	0,44 (8,58)
C	0,48 (11,15)	0,44 (10,02)	0,46 (13,57)	0,44 (7,23)	0,43 (18,77)	0,42 (7,49)
D	0,47 (12,52)	0,47 (8,24)	0,48 (7,54)	0,47 (10,71)	0,49 (6,36)	0,48 (9,39)
E	0,51 (10,09)	0,50 (2,29)	0,48 (2,75)	0,50 (1,62)	0,50 (8,49)	0,52 (1,80)
F	0,46 (6,41)	0,46 (3,75)	0,51 (6,52)	0,50 (2,59)	0,50 (7,05)	0,50 (8,70)

Clone A= *E. grandis* x *E. urophylla*; clone B= híbrido espontâneo de *E. urophylla*; clone C= *E. pellita* x *E. grandis*; clone D= *E. camaldulensis* x *E. tereticornis*; clone E= *E. grandis* x (*E. urophylla* x *E. tereticornis*); clone F= *E. urophylla* x *E. grandis*. Médias e, entre parênteses, valores de coeficiente de variação (%).

5.2.2. Densidade aparente

Os valores médios de densidade aparente do lenho dos seis híbridos de *Eucalyptus* spp. são apresentados na Tabela 10. Foi observada diferença significativa entre os clones, sendo que o clone E apresentou o maior valor (0,65 g/cm³), diferindo estatisticamente dos clones A e C, com menores valores (0,56 e 0,58 g/cm³, respectivamente). Os coeficientes de variação da análise de variância indicam, de maneira geral, uma boa homogeneidade dos dados.

Tabela 10. Valores médios de densidade aparente dos seis clones de *Eucalyptus* spp.

Clone	Densidade aparente (g/cm ³)
A	0,56 c (9,81)
B	0,60 abc (7,97)
C	0,58 bc (15,75)
D	0,63 ab (7,41)
E	0,65 a (6,49)
F	0,61 abc (6,17)

Clone A= *E. grandis* x *E. urophylla*; clone B= híbrido espontâneo de *E. urophylla*; clone C= *E. pellita* x *E. grandis*; clone D= *E. camaldulensis* x *E. tereticornis*; clone E= *E. grandis* x (*E. urophylla* x *E. tereticornis*); clone F= *E. urophylla* x *E. grandis*. Médias e, entre parênteses, valores de coeficiente de variação (%). Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p >0,05%).

Arango e Tamoya (2008) obtiveram para clones de *E. grandis* x *E. urophylla*, aos 8 anos, valores médios de densidade aparente entre 0,49 e 0,58 g/cm³, enquanto Arantes et al. (2016), para o mesmo clone, aos 6 anos, obtiveram valores médios entre 0,52 e 0,59 g/cm³. Tem-se, portanto, quanto a essas referências, que os valores médios de densidade aparente encontrados para os clones do estudo, aos 4 anos, foram similares ou superiores aos encontrados para clones de idades mais avançadas. Essas variações nos valores de densidade aparente das árvores do estudo são, provavelmente, decorrentes das diferenças na estrutura anatômica e na composição química do lenho, em função de fatores genéticos e, principalmente, do índice de sítio, que refletem nos valores de densidade, implicando em variações na qualidade geral da madeira. Knapic et al. (2014), numa região de Lisboa, conduzindo um estudo com 19 espécies de *Eucalyptus*, aos 4 anos, obtiveram valor médio de densidade aparente igual a 0,67 g/cm³. De acordo com Kolmman e Côtê

(1968), as condições do clima e a localização geográfica onde árvores se encontram influenciam a densidade do lenho.

Através da técnica de densitometria de raios- X, foi possível obter, além dos perfis radiais de densidade aparente do lenho ao longo do tronco (posições longitudinais) em intervalos pontuais, imagens digitais da seção transversal do lenho, que permitiram a análise qualitativa da variação da densidade aparente das árvores de *Eucalyptus* spp. (Figuras 18, 19, 20, 21, 22 e 23). Essas imagens indicam as regiões do lenho de maior e menor densidade representadas pelas colorações mais claras e escuras, respectivamente, pela diferença na atenuação dos feixes de raios- X, no processo irradiação das amostras.

Figura 18. Perfil radial da densidade aparente ao longo do tronco (base, DAP, 25, 50 75 e 100%) de uma árvore representativa do clone A (*E. grandis* x *E. urophylla*). Imagens das seções transversais das amostras diametrais obtidas em scanner e em equipamento Faxitron X-ray (imagens radiográficas).

Figura 19. Perfil radial da densidade aparente ao longo do tronco (base, DAP, 25, 50 75 e 100%) de uma árvore representativa do clone B (híbrido espontâneo de *E. urophylla*). Imagens das seções transversais das amostras diametraís obtidas em scanner e em equipamento Faxitron X-ray (imagens radiográficas).

Figura 20. Perfil radial da densidade aparente ao longo do tronco (base, DAP, 25, 50 75 e 100%) de uma árvore representativa do clone C (*E. pellita* x *E. grandis*). Imagens das seções transversais das amostras diametrais obtidas em scanner e em equipamento Faxitron X-ray (imagens radiográficas).

Figura 21. Perfil radial da densidade aparente ao longo do tronco (base, DAP, 25, 50 75 e 100%) de uma árvore representativa do clone D (*E. camaldulensis* x *E. tereticornis*). Imagens das seções transversais das amostras diametraes obtidas em scanner e em equipamento Faxitron X-ray (imagens radiográficas).

Figura 22. Perfil radial da densidade aparente ao longo do tronco (base, DAP, 25, 50 75 e 100%) de uma árvore representativa do clone E (*E. grandis* x (*E. urophylla* x *E. tereticornis*)). Imagens das seções transversais das amostras diametraes obtidas em scanner e em equipamento Faxitron X-ray (imagens radiográficas).

Figura 23. Perfil radial da densidade aparente ao longo do tronco (base, DAP, 25, 50 75 e 100%) de uma árvore representativa do clone F (*E. urophylla* x *E. grandis*). Imagens das seções transversais das amostras diametraes obtidas em scanner e em equipamento Faxitron X-ray (imagens radiográficas).

A análise dos padrões de variação radial da densidade do lenho permite a caracterização das regiões do lenho de madeira juvenil e adulta, sendo a primeira delimitada pela camada interna no tronco, resultado do crescimento em diâmetro nos anos iniciais e a segunda, a camada mais externa do tronco, formada pela atividade do câmbio fisiologicamente maduro (CHAGAS, 2014). Segundo Tomazello Filho et al. (2008), são comuns em perfis radiais densitométricos de árvores de *Eucalyptus* spp., a ocorrência de valores de densidade aparente do lenho menores na região central, com aumento gradativo em direção à casca; oscilações dos valores radiais devido aos elementos de vaso de maior diâmetro; picos de densidade nas camadas de crescimento de fibras espessadas; e menor diâmetro dos vasos. Quanto aos perfis densitométricos do lenho das árvores dos 6 clones de *Eucalyptus* spp., foi verificado, de modo geral, um padrão de variação radial caracterizado pelo aumento sutil da densidade aparente no sentido medula-casca com oscilações pouco acentuadas. Essas características decorrem em função da pouca idade das árvores, em que se tem um material relativamente homogêneo, com predomínio ou totalidade de madeira dita juvenil

O perfil da variação da densidade aparente verificado para as árvores do estudo foi diferente do observado por Sette Júnior et al. (2009), que estudando o efeito da aplicação de potássio e sódio nas características do lenho de árvores de *E. grandis*, aos 24 meses de idade, obtiveram valores mais altos de densidade próximos à medula, seguidos de redução e estabilização próximos à casca. Este padrão de variação radial da densidade aparente do lenho é também verificado nos trabalhos de Tomazello Filho e Piedade (2005), Tomazello Filho (2006 e 2008), Oliveira et al. (2012) e Franco (2014). Knapic et al. (2014), para árvores jovens de diferentes espécies de *Eucalyptus*, apresentam distintos modelos de variação da densidade média ao longo de dez posições radiais.

A determinação da densidade aparente média por posição longitudinal não mostrou diferença significativa para os clones (Tabela 11). Entende-se, a partir disto, que as árvores de *Eucalyptus* spp. do estudo apresentam densidade aparente uniforme ao longo da altura do tronco.

Tabela 11. Valores médios de densidade aparente por posição longitudinal do tronco dos seis clones de *Eucalyptus* spp.

Clone	Densidade aparente (g/cm ³)					
	Posição longitudinal					
	Base	DAP	25%	50%	75%	100%
A	0,62 (5,69)	0,60 (6,61)	0,55 (6,65)	0,56 (9,11)	0,55 (12,64)	0,50 (23,48)
B	0,62 (7,62)	0,55 (11,47)	0,59 (8,22)	0,62 (7,89)	0,62 (2,20)	0,59 (7,12)
C	0,69 (2,17)	0,58 (8,41)	0,60 (9,23)	0,57 (23,89)	0,52 (20,61)	0,53 (18,45)
D	0,62 (11,81)	0,59 (7,45)	0,61 (6,63)	0,65 (7,50)	0,63 (7,71)	0,66 (1,07)
E	0,65 (5,12)	0,64 (1,98)	0,64 (4,34)	0,64 (1,16)	0,66 (8,14)	0,67 (3,32)
F	0,58 (11,03)	0,59 (1,91)	0,60 (3,33)	0,63 (3,02)	0,66 (1,49)	0,61 (3,71)

Clone A= *E. grandis* x *E. urophylla*; clone B= híbrido espontâneo de *E. urophylla*; clone C= *E. pellita* x *E. grandis*; clone D= *E. camaldulensis* x *E. tereticornis*; clone E= *E. grandis* x (*E. urophylla* x *E. tereticornis*); clone F= *E. urophylla* x *E. grandis*; HT= altura total; HC= altura comercial. Médias e, entre parênteses, valores de coeficiente de variação (%).

O lenho de árvores de *Eucalyptus* de diferentes espécies, idades e locais tem sido analisado através de técnicas nucleares, e de forma específica, de raios-X, citam-se os estudos de Nicholls e Griffin (1978), Nicholls e Matheson (1980), Lausberg et al. (1995), Tomazello Filho et al. (1995), Wimmer et al. (2002), Silva et al. (2004), Alzate (2004), Moya et al. (2005), Arango e Tamayo (2008), Knapic et al. (2014) e Arantes et al. (2016). Considerando estudos de qualidade da madeira quanto ao potencial tecnológico para produção de polpa celulósica, a determinação da densidade aparente por meio da técnica de densitometria de raio- X não é comum, devido esta requerer o uso de equipamentos sofisticados, sendo considerada dispendiosa. Todavia, uma vez que é possível sua utilização, tem-se que a precisão dos dados, a alta sensibilidade, bem como a velocidade de processamento dos dados e interpretação dos perfis radiais de densidade do lenho, representam excelentes vantagens do processo.

Foram ajustadas equações de regressão correlacionando os valores de densidade básica e densidade aparente do lenho com as 6 posições longitudinais do tronco das árvores de *Eucalyptus* spp. (Figura 24- A, B, C, D, E e F). Exceto para a densidade básica do clone D, todos os modelos de variação foram validados.

De maneira geral, é possível verificar similaridade no comportamento tendencial de variação entre a densidade básica e a densidade aparente, com ênfase para os clones B e C. Essa similaridade reflete a aplicabilidade das diferentes metodologias utilizadas na avaliação da densidade ao longo da altura do tronco. Verifica-se, de modo geral, que os clones A, B e C apresentam uma tendência de maiores densidades médias na parte basal do tronco, seguida de queda na posição do DAP e conseguinte decréscimo da posição 25% até o topo. Para o clone E, a menor densidade básica é verificada na posição 25%, enquanto a densidade aparente se apresenta bastante uniforme ao longo do tronco. Em relação ao clone F, observam-se distintas tendências de variação, porém, com ambas as densidades apresentando maiores valores na parte superior do tronco.

As pequenas variações observadas para os padrões de comportamento entre a densidade básica e a densidade aparente, devem-se, provavelmente, ao maior nível de precisão da análise pela técnica de raios- X, que considera a variação da densidade no lenho a cada 80µm, repercutindo na maior justeza dos valores médios representativos das árvores.

Figura 24. Modelos de variação longitudinal da densidade básica e densidade aparente dos seis clones de *Eucalyptus* spp. 1= densidade básica; 2= densidade aparente. * significativo ($p < 0,05$).

5.3. Características anatômicas do lenho das árvores de *Eucalyptus* spp.

5.3.1. Dimensões das fibras

Em relação aos valores médios do comprimento, da largura, da espessura da parede e do diâmetro do lume das fibras, obtidos a partir das diferentes posições longitudinais do tronco, foram observadas diferenças significativas entre os seis híbridos de *Eucalyptus* spp. (Tabela 12). O clone A apresentou o maior comprimento médio (886,21 μm), significativamente superior aos apresentados pelos clones D e F; a menor espessura média de parede (3,81 μm), sem diferença significativa ao clone C; e junto ao clone C, os maiores diâmetros de lume (10,41 e 11,28 μm respectivamente). Em relação a largura de fibra, o clone C foi o que apresentou maior valor (19,44 μm), diferindo significativamente aos clones A e E.

Tabela 12. Valores médios das dimensões das fibras dos seis clones de *Eucalyptus* spp.

Clone	Comprimento	Largura	Espessura de parede	Diâmetro do lume
	(μm)			
A	886,21 a (19,17)	17,69 bc (8,82)	3,81 c (18,00)	10,41 ab (16,07)
B	858,60 ab (18,26)	18,65 ab (15,33)	4,51 a (32,43)	9,56 b (25,12)
C	856,68 ab (17,42)	19,44 a (20,44)	3,99 bc (30,55)	11,28 a (25,60)
D	812,80 b (19,57)	18,07 ab (8,99)	4,35 a (19,40)	9,67 b (19,22)
E	859,13 ab (15,04)	16,95 c (9,96)	4,57 a (16,85)	8,14 c (25,12)
F	811,71 b (17,18)	18,38 ab (8,18)	4,32 ab (17,33)	9,97 b (19,21)

Clone A= *E. grandis* x *E. urophylla*; clone B= híbrido espontâneo de *E. urophylla*; clone C= *E. pellita* x *E. grandis*; clone D= *E. camaldulensis* x *E. tereticornis*; clone E= *E. grandis* x (*E. urophylla* x *E. tereticornis*); clone F= *E. urophylla* x *E. grandis*; HT= altura total; HC= altura comercial. Médias e, entre parênteses, valores de coeficiente de variação (%). Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05\%$).

Os valores de dimensões das fibras encontrados para os clones de estudo, estão próximos aos apresentados por Sette Júnior et al. (2012) para *E. grandis*, aos

4 anos, que citam valores médios de 866,00 μm para comprimento da fibra, 9,43 μm para diâmetro do lume e 2,24 μm para espessura da parede. Botrel et al. (2010), em estudo de qualidade da madeira de 9 clones de *Eucalyptus* spp., e aos 42 meses de idade, observaram para o comprimento da fibra valor médio de 1030 μm , 16,03 μm para a largura da fibra, 7,91 μm para o diâmetro do lume e 4,06 μm para a espessura da parede, assemelhando aos resultados encontrados no presente estudo, porém com valores de comprimento de fibra superiores. Similarmente, Baldin et al. (2017), avaliando a anatomia da madeira de árvores jovens de quatro espécies de *Eucalyptus*, encontraram valores médios variando entre 903 e 1078 μm para o comprimento, 15,7 a 18,0 μm para a largura e de 3,2 a 4,3 μm para o diâmetro do lume. Em estudo com *E. grandis*, aos 7 anos, Rocha et al. (2004) encontraram valores médios de 930 μm para comprimento da fibra, 19,03 μm para largura de fibra, 11,39 μm para diâmetro do lume e 3,86 μm para espessura da parede. Costa (2011) e González et al. (2014) também observaram dimensões de fibras semelhantes para *E. urograndis* aos 6 e 8 anos de idade, respectivamente.

As dimensões das fibras da madeira (comprimento, largura, espessura da parede e diâmetro do lume) são importantes indicadores no que tange a sua qualificação para atender a grande variedade de usos, como o segmento de madeira serrada, a produção de painéis MDF e carvão vegetal e, para definição do potencial de uma madeira para a fabricação de polpa celulósica e papel (SHIMOYAMA, 1990; NAHUZ, 2000; SILVA et al., 2005; BELINI et al., 2008; GONÇALEZ et al., 2014; TAKARADA, 2015). O conhecimento das características anatômicas dos elementos fibrosos das polpas permite que sejam previstas indicações das propriedades de seus papéis, sendo sua qualidade influenciada pelas características morfológicas das fibras e pela quantidade destas por unidade de massa (GOMIDE et al., 2005).

O comprimento das fibras tem efeito na resistência superficial e resistência úmida e seca do papel além de influenciá-lo no rasgo, sendo variável diretamente proporcional à resistência do papel, em que maiores comprimentos propiciam uma melhor rede de fibras favorecendo a resistência e a rigidez do papel (HILLIS 1972; PAULA 1999; BENITES et al., 2015). De acordo com Gomide et al. (2005), as fibras mais curtas contribuem para uma boa formação da folha, enquanto as fibras mais longas favorecem a resistência ao rasgo. Ainda segundo o autor, a opacidade é uma característica que pode ser melhorada com a utilização de polpa com maior número

de fibras por grama, em razão do maior número de superfícies ópticas para a dispersão de luz na estrutura do papel. No Brasil, a produção brasileira de celulose é majoritariamente em função do processo químico de fibra curta, proveniente do eucalipto (IBÁ, 2017).

A largura das fibras também tem efeito sobre a resistência do papel ao arrebentamento, em que, de maneira geral, fibras muito largas representam desvantagens na produção do papel, pois ocasiona uma diminuição da resistência ao arrebentamento. Já a espessura da parede está intimamente ligada ao rendimento de celulose, resistência do papel ao rasgo, tração e umidade. Fibras com paredes mais espessas possuem maior teor relativo de celulose do que fibras de parede mais finas, havendo, assim, uma conexão positiva entre a espessura da parede e o rendimento em produção de celulose (HILLIS 1972; PAULA 1999; BENITES et al., 2015). Ainda, Gomide et al. (2005) relata que a espessura da parede é uma importante característica das fibras relacionada aos papéis de impressão “high bulk” e “tissue”, e também pode ser correlacionada com o “coarseness” da polpa, no qual, em geral, polpas produzidas com uma mesma espécie florestal que apresentam fibras com maiores espessuras de paredes tendem a produzir polpas com maiores “coarseness” e papéis com volumes específicos aparentes mais elevados, características estas, que podem contribuir favoravelmente para a maciez dos papéis “tissues” e para opacidade dos papéis de imprimir (GOMIDE et al., 2005). Quanto à esses aspectos, o clone E foi o que obteve o melhor desempenho no estudo, apresentando baixo valor médio de largura e elevado para espessura de parede das fibras.

A Tabela 13 mostra os valores médios do comprimento, largura, espessura da parede e diâmetro do lume das fibras por posição longitudinal dos clones de *Eucalyptus* spp. Em seguida, são demonstradas as curvas de tendência representativas, em que os correspondentes valores de R^2 e equações de regressão são apresentados junto à Tabela 13.

Tabela 13. Valores médios, R² e equações de regressão da variação longitudinal das dimensões das fibras dos seis clones de *Eucalyptus* spp.

Clone	Comprimento (µm)						R²	Equação
	Posição Longitudinal							
	Base	DAP	25%	50%	75%	100%		
A	874,62 (14,86)	937,16 (6,90)	952,83 (10,74)	838,28 (14,06)	901,39 (4,68)	778,70 (6,64)	0,59*	$y = -0,0249x^2 + 1,3682x + 899,11$
B	843,28 (9,92)	929,99 (4,41)	883,84 (6,55)	857,58 (28,30)	808,03 (16,12)	795,03 (3,22)	0,86*	$y = 0,0008x^3 - 0,1347x^2 + 4,8339x + 856$
C	755,04 (6,40)	971,71 (11,82)	906,11 (5,29)	887,47 (5,71)	827,39 (3,26)	795,88 (4,50)	0,74*	$y = 0,0016x^3 - 0,285x^2 + 12,647x + 783,79$
D	836,79 (7,98)	848,82 (7,65)	857,91 (14,69)	779,62 (2,53)	816,41 (6,73)	785,66 (1,98)	0,54*	$y = 0,0015x^2 - 0,7777x + 850,06$
E	836,93 (5,65)	920,01 (2,46)	851,47 (10,87)	885,79 (2,02)	816,46 (19,14)	792,12 (5,24)	0,67*	$y = 0,0004x^3 - 0,085x^2 + 3,5707x + 848,46$
F	830,84 (3,17)	906,67 (3,79)	840,43 (4,65)	863,80 (4,53)	760,33 (17,65)	779,87 (6,29)	0,74*	$y = 0,0008x^3 - 0,1342x^2 + 4,6241x + 837,36$

Clone	Largura (µm)						R²	Equação
	Posição Longitudinal							
	Base	DAP	25%	50%	75%	100%		
A	17,13 (3,13)	17,75 (3,09)	18,01 (4,89)	18,37 (5,54)	18,05 (5,05)	16,83 (5,83)	0,99*	$y = -0,0006x^2 + 0,0529x + 17,125$
B	18,11	21,07	18,10	18,51	18,48	17,53	0,27ns	$y = 7E-06x^3 - 0,0013x^2$

	(3,76)	(16,38)	(7,80)	(6,86)	(4,16)	(7,34)		+ 0,0452x + 18,83
C	16,46 (13,10)	22,63 (12,88)	20,01 (13,50)	18,25 (4,27)	18,41 (10,91)	19,33 (8,36)	0,51*	$y = 5E-05x^3 - 0,0079x^2 + 0,3069x + 17,523$
D	18,48 (2,21)	19,35 (4,13)	18,03 (5,15)	17,54 (1,77)	17,54 (7,04)	17,44 (8,22)	0,7*	$y = 5E-06x^3 - 0,0006x^2 - 0,0026x + 18,768$
E	17,62 (6,48)	17,14 (11,91)	17,08 (1,91)	17,33 (1,36)	16,32 (5,30)	16,08 (3,95)	0,83*	$y = -8E-05x^2 - 0,0059x + 17,444$
F	18,88 (3,97)	19,10 (1,43)	18,24 (5,57)	18,36 (4,04)	17,70 (2,60)	17,76 (3,52)	0,82*	$y = 8E-05x^2 - 0,0211x + 19,013$

Clone	Espessura da parede (µm)						R²	Equação
	Posição Longitudinal							
	Base	DAP	25%	50%	75%	100%		
A	3,81 (2,81)	4,08 (6,71)	4,00 (12,41)	3,47 (8,02)	3,79 (8,07)	3,73 (3,80)	0,41ns	$y = 3E-06x^3 - 0,0004x^2 + 0,0085x + 3,903$
B	4,53 (23,16)	5,83 (5,83)	4,46 (30,20)	4,56 (12,77)	4,31 (16,47)	4,14 (7,04)	0,42ns	$y = 6E-06x^3 - 0,0009x^2 + 0,0258x + 4,8306$
C	3,48 (18,69)	5,79 (7,97)	4,11 (26,39)	4,03 (9,49)	3,56 (15,35)	3,89 (8,83)	0,43*	$y = 2E-05x^3 - 0,0026x^2 + 0,0919x + 3,9012$
D	3,66 (6,57)	5,42 (13,47)	4,34 (1,40)	4,29 (9,40)	4,07 (20,83)	4,37 (11,96)	0,41ns	$y = 1E-05x^3 - 0,002x^2 + 0,0768x + 3,9623$
E	4,17 (27,56)	5,21 (26,46)	4,58 (10,93)	4,50 (4,45)	4,23 (12,80)	4,78 (13,87)	0,58*	$y = 1E-05x^3 - 0,0015x^2 + 0,054x + 4,3247$

F	4,04 (7,11)	5,44 (2,59)	4,25 (11,67)	4,06 (8,53)	4,22 (6,16)	4,28 (7,68)	0,25ns	$y = 8E-06x^3 - 0,0011x^2 + 0,0353x + 4,3649$
Clone	Diâmetro do lume (µm)						R²	Equação
	Posição Longitudinal							
	Base	DAP	25%	50%	75%	100%		
A	9,50 (5,91)	9,59 (14,54)	10,01 (4,62)	11,44 (4,21)	10,47 (2,81)	9,37 (13,72)	0,84*	$y = -7E-06x^3 + 0,0004x^2 + 0,0287x + 9,3568$
B	9,05 (18,14)	9,41 (28,81)	9,17 (15,78)	9,39 (27,11)	9,85 (15,74)	9,26 (8,41)	0,65*	$y = -4E-06x^3 + 0,0005x^2 - 0,0064x + 9,1691$
C	9,50 (8,07)	11,05 (17,68)	11,79 (5,43)	10,20 (10,38)	11,30 (10,57)	11,56 (8,07)	0,61*	$y = 2E-05x^3 - 0,0028x^2 + 0,1232x + 9,7205$
D	11,17 (8,70)	8,51 (10,64)	9,34 (9,24)	8,96 (7,21)	9,39 (16,15)	8,70 (5,78)	0,72*	$y = -2E-05x^3 + 0,0034x^2 - 0,1562x + 10,843$
E	9,29 (21,24)	6,71 (6,34)	7,93 (11,54)	8,32 (1,50)	7,86 (10,23)	6,52 (15,56)	0,64*	$y = -2E-05x^3 + 0,0032x^2 - 0,122x + 8,8366$
F	10,81 (3,33)	8,22 (4,30)	9,75 (4,22)	10,24 (7,25)	9,26 (11,54)	9,20 (2,11)	0,23ns	$y = -1E-05x^3 + 0,002x^2 - 0,0805x + 10,224$

Clone A= *E. grandis* x *E. urophylla*; clone B= híbrido espontâneo de *E. urophylla*; clone C= *E. pellita* x *E. grandis*; clone D= *E. camaldulensis* x *E. tereticornis*; clone E= *E. grandis* x (*E. urophylla* x *E. tereticornis*); clone F= *E. urophylla* x *E. grandis*. Médias e, entre parênteses, valores de coeficiente de variação (%). * significativo ($p < 0,05$).

Figura 25. Modelos de variação longitudinal das dimensões das fibras dos seis clones de *Eucalyptus* spp. A) Comprimento. B) Largura. C) Espessura da parede. D) Diâmetro do lume.

Os valores médios das dimensões das fibras do lenho das árvores de *Eucalyptus* spp., ao longo do tronco, indicam, de maneira geral, que o comprimento das fibras é maior nas alturas intermediárias (DAP- 50%), decrescendo até o topo. Para a largura das fibras é observada pouca variação entre as posições, em que os menores valores foram encontrados nas posições de 75 e 100% do fuste. A espessura da parede das fibras aumenta da parte inicial do fuste até 25%, diminuindo posteriormente até a altura de 75% e aumentando a seguir até 100% (modelo validado para os clones C e E). Já para o diâmetro do lume das fibras, não se verifica tendência comum aos clones, em que para os clones D e E são observados maiores valores nas posições intermediárias da altura (DAP e 25%) e ao final do fuste (100%), e para os clones A e B, menores valores na parte superior do tronco (75 e 100%).

Rocha et al. (2004), em estudo da variação longitudinal das dimensões das fibras de árvores de *E. grandis*, aos 7 anos, citam valores médios de 0,93 mm, 19,03 µm, 11,39 µm e 3,86 µm, respectivamente, para comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede das fibras. O padrão de variação longitudinal observado para os híbridos do estudo se assemelha ao apresentado por Quilhó et al. (2006), que relatam pouca variação nas dimensões das fibras no sentido longitudinal em híbridos de *E. urophylla* e *E. grandis*, entre 5 e 6 anos de idade. Em contrapartida, Sharma et al. (2015), estudando híbridos também de *E. grandis* x *E. urophylla*, de mesma idade, relataram diferenças significativas para o comprimento de fibras, diâmetro do lume e espessura da parede em amostragem longitudinal. Gonzalez et al. (2014), ao estudar a variação anatômica ao longo do tronco de árvores de *E. grandis* x *E. urophylla*, aos 8 anos, apresentaram maiores valores de comprimento das fibras na parte superior da altura (50% a 100%) em relação às demais posições (0% e 25%), diferindo do padrão observado no presente estudo, entretanto, mostraram comportamento similar para os resultados de variação da largura, diâmetro e espessura da parede das fibras.

A variação das dimensões das fibras nas três posições radiais (0, 50 e 100%), do conjunto de amostras longitudinais das árvores de *Eucalyptus* spp., é apresentada na Figura 26. A variação radial dos componentes celulares do lenho constitui um indicativo do comportamento tendencial relacionado à idade (CHEN; EVANS, 2004) e constitui uma informação valiosa no que diz respeito a avaliação realizada em material lenhoso coletado em idades precoces, como é o caso dos materiais do estudo.

Com relação ao comprimento das fibras (Figura 26-A), observou-se tendência de aumento significativo no sentido radial para os seis híbridos do estudo, com menores valores próximos da medula (650 µm - 750 µm), seguido de aumento gradual em direção à casca (750 µm - 1.010 µm). Essa tendência de variação tem sido comumente relatada para diferentes espécies de *Eucalyptus* por Tomazello Filho (1985a, 1985b, 1985c, 1987), e por outros autores, citam-se Sette Júnior et al. (2009; 2012), Pillai et al. (2013), Piralho et al. (2014) e Baldin et al (2017).

A largura das fibras (Figura 26- B) apresentou uma sutil tendência de elevação na direção radial (medula para a casca), sendo significativa para o clone C. Semelhantemente, Tomazello Filho (1987) apontou para as espécies *E. globulus*, *E.*

pellita e *E. acmenioides*, tendência de aumento da largura no sentido medula-casca. Em contrapartida, Piralho et al. (2014) e Baldin et al. (2017), mostraram para algumas espécies de *Eucalyptus*, tendência de ligeiro aumento da largura até a posição cerne periférico, com posterior diminuição em direção à casca.

A espessura da parede (Figura 26-C), assim como o comprimento de fibra, mostrou-se crescente em relação à posição no raio, com valores próximos à medula entre 3,0; e 4,2 μm e próximos à casca entre 4,0 e 6,0 μm , aproximadamente. Esse comportamento é também observado nos estudos de Sette Júnior et al. (2012), para *E. grandis*, e de Baldin et al. (2017), para as espécies *E. dunnii* e *E. saligna*.

Em relação ao diâmetro do lume (Figura 26-D), observou-se para todos os clones, uma leve tendência de aumento até a posição intermediária do raio, seguida de decréscimo em direção à casca, sendo esta variação significativa somente para o clone B. Comportamento semelhante foi relatado por Franco (2014), para árvores de *E. grandis*. Contrariamente, Sette Júnior et al. (2009), observaram para árvores da mesma espécie, aos 4 anos, tendência de aumento significativo do diâmetro do lume ao longo do raio.

Figura 26. Modelos de variação radial das dimensões das fibras dos seis clones de *Eucalyptus* spp. A) Comprimento. B) Largura. C) Espessura da parede. D) Diâmetro do lume. * significativo ($p < 0,05$).

Percebe-se que os resultados são adversos nas pesquisas desenvolvidas com o gênero *Eucalyptus*, quando se estuda as dimensões de fibras nas variações longitudinal e radial do tronco das árvores, mesmo considerando os valores médios para cada material estudado. Gonzalez et al. (2014) explica que isso se deve porque, não só os fatores genéticos, mas também, certamente, o sítio, o solo, os fatores ambientais e os tratos silviculturais da procedência de cada material irão influenciar suas características anatômicas e demais propriedades do material. Segundo o autor, esta é uma preocupação que as indústrias possuem, principalmente a de celulose e papel, em caracterizar suas matérias primas provenientes de cada região, ou mesmo, de sítios diferentes de uma mesma região, antes de entrar no processo de produção, uma vez que os resultados destas pesquisas é que irão recomendar a otimização de cada fase do processo de fabricação para obtenção de um produto mais homogêneo e de qualidade desejada.

A avaliação detalhada das propriedades físico-anatômicas a nível individual das árvores, ou seja, o estudo das variações que ocorrem nas direções radial e longitudinal do tronco das árvores de *Eucalyptus* spp., possibilita à indústria de celulose um conhecimento aprofundado de sua matéria-prima, que é uma condição fundamental para a otimização dos processos tecnológicos de transformação da madeira em polpa e para a melhoria da qualidade do produto final.

Ademais, verifica-se a partir destas avaliações, que até os 4 anos, idade de observação das árvores de *Eucalyptus* do estudo, não houve tendência de estabilização dos valores de comprimento, largura, espessura da parede e diâmetro do lume das fibras. De acordo com Baldin et al. (2017), esse padrão de variação de fibras indica que a camada cambial dos híbridos de estudo encontra-se, ainda, formando lenho caracterizado como juvenil. Segundo Tomazello Filho (1987), a variação das dimensões das fibras, principalmente do comprimento, ocorre em função da variação das células iniciais fusiformes, de onde as fibras se originam, e sua estabilização só ocorre quando as células do câmbio atingem comprimento máximo, sendo este o momento em que se inicia a formação de madeira adulta. Souza et al. (2012) estudando a delimitação estatística dos lenhos juvenil e adulto de *Eucalyptus* e *Corymbria*, citam 7 e 8 anos para *C. maculata* e *E. saligna* e 14 e 16

anos para *E. cloeziana* e *E. pilularis*, para as idades em que se verifica a estabilização do comprimento das fibras.

Por ser o eucalipto uma espécie de rápido crescimento, estabelecida majoritariamente em plantios de curtos ciclos de corte (em torno de 7 anos) no país, espera-se que a madeira obtida contenha grande proporção de lenho juvenil, característica esta verificada para as árvores de estudo, e que, portanto, não deva representar um aspecto restritivo ao uso qualificado. Ademais, embora a qualidade da madeira juvenil seja dada como inferior a da madeira adulta, para a produção de papel a partir de folhosas, é viável a utilização de árvores que contenham alta proporção de madeira juvenil, sendo que o produto final pode ser até superior ao obtido com árvores adultas (IPEF, 1979).

5.3.2. Índices de qualidade das fibras para celulose e papel

Os índices qualitativos dos híbridos de *Eucalyptus* spp, aos 4 anos, determinados a partir da morfologia das fibras, são apresentados na Tabela 14. Segundo Foelkel (1976), as relações entre as dimensões das fibras têm sido de considerável interesse na interpretação da qualidade da celulose e do papel, podendo auxiliar na explicação dos resultados para as resistências do produto final e, ainda, na identificação e seleção de materiais.

Tabela 14. Índices de qualidade das fibras dos seis clones de *Eucalyptus* spp.

Clone	Índices					
	IR	FP (%)	CF	IE	CR	FFL
A	0,76	43,94	0,57	49,63	49,63	0,51
B	1,05	50,19	0,50	45,91	45,91	0,60
C	0,76	43,46	0,57	44,34	44,34	0,51
D	0,93	48,65	0,52	45,13	45,13	0,58
E	1,19	54,77	0,46	50,80	50,80	0,65
F	0,92	49,68	0,55	46,59	46,59	0,54

Clone A= *E. grandis* x *E. urophylla*; clone B= híbrido espontâneo de *E. urophylla*; clone C= *E. pellita* x *E. grandis*; clone D= *E. camaldulensis* x *E. tereticornis*; clone E= *E. grandis* x (*E. urophylla* x *E. tereticornis*); clone F= *E. urophylla* x *E. grandis*; IR = Índice de Runkel; FP= fração parede; CF= coeficiente de flexibilidade; IE= Índice de enfieltamento; CR= coeficiente de rigidez; FFL= fator de forme de luce.

Com relação à anatomia da madeira, a melhor visualização de influências sob a qualidade do material para produção de celulose e papel é verificada ao se analisar as dimensões das fibras e inter-relações. O Índice de Runkel fornece informações sobre a capacidade de união das fibras, relacionando-a com a resistência à tração e ao arrebitamento, de forma que quanto maior o seu valor, mais rígida é a fibra, podendo vir a afetar as propriedades de resistência do papel (FOELKEL e BARRICHELO, 1975; BALDI, 2001; GONÇALEZ et al., 2014). Considerando a classificação de Barrichelo e Brito (1976) e Foelkel et al (1978), os clones do estudo podem ser dados como apropriados para o uso na produção de papel, sendo que os clones A, C, D e F categorizam-se como bons, enquanto os clones B e E de desempenho regular.

O índice fração parede é um valor que indica a rigidez da fibra e associa-se à facilidade de colapso e à flexibilidade para ligação das fibras (BOSCHETTI et al., 2015). De acordo com Gonzalez et al. (2014), a fração parede, assim como o índice de Runkel, relaciona-se à firmeza da fibra, sendo que, quanto maior o seu valor, mais rígida essa pode se tornar, afetando as propriedades de resistência do papel. Para este índice, os seis híbridos avaliados encontram-se dentro do limite de até 60% recomendado por Foelkel et al. (1978), assumindo paredes medianamente espessas e rígidas (35 – 50 %). Na prática quando a fração parede for maior que 40%, as fibras serão mais rígidas e difíceis de colapsarem, afetando as propriedades físico-mecânicas e óticas do papel e, assim, produzindo um papel de rede mais solta e frouxa, sem muita ligação entre fibras. Com isso, os papéis correspondentes são mais porosos, volumosos, rugosos e absorventes e tendem a ter menor resistência à tração e ao arrebitamento (FOELKEL, 2007; BOSCHETTI et al., 2015). Em contrapartida, polpas produzidas com espécies de paredes finas, resultam em maior população fibrosa, maior entrelaçamento de fibras e possibilidades de contatos fibra a fibra e, com isso, melhoram as propriedades de tração, estouro, rasgo, dobramento, resistência superficial e resistência interna da folha (FOELKEL, 2007). As médias para o índice Fração Parede obtidas no presente estudo foram semelhantes às observadas por Santos (2005) em clones de *E. grandis* x *E. urophylla*, aos 6 anos de idade, e inferiores às obtidas no estudo de Rodrigues (2016), para a mesma espécie, aos 7 anos.

O coeficiente de flexibilidade, por sua vez, remete a facilidade da união entre as fibras, e, segundo Bektas et al. (1999) valores entre 0,50 – 0,75, como os

encontrados neste estudo (exceto para o clone E), classificam as fibras como flexíveis, que, ao se entrelaçarem, tendem a formar um papel altamente resistente. Conforme Saikia et al. (1997), espécies com bons valores de flexibilidade, como no caso dos híbridos do estudo, são adequadas para produção de papéis com alta resistência mecânica, tais como os de escrita, impressão, embalagem. Baldin et al. (2017) observou valores de coeficiente de flexibilidade em árvore jovens de *Eucalyptus* spp., próximos aos obtidos neste estudo.

O índice de enfieltramento tem relação direta com a resistência ao rasgo e arrebentamento (MOGOLLÓN; AGUILERA 2002) sendo que valores acima de 50 são mais indicados para boas características do papel relacionadas ao rasgo e dobras duplas (BALDI, 2001). O índice de Enfieltramento também está relacionado à flexibilidade da fibra, e maiores valores desse índice caracterizam fibras mais flexíveis e melhores propriedades do papel. O Índice de Enfieltramento variou de 44-51, entre os seis híbridos do estudo, em que apesar de se apresentarem um pouco abaixo do limite considerado ideal, para a maioria dos clones, mostraram-se valores elevados. Estes valores estão similares aos obtidos por Santos e Sansígolo (2007), para clones de *E. grandis* x *E. urophylla*.

O comprimento das fibras relaciona-se à rigidez do material, em que menores valores refletem em baixos coeficientes de rigidez, face a menor superfície de contato fibra-fibra, que por sua vez, reduz consideravelmente a resistência do papel produzido, ocasionando deficiência na colagem (BALDIN et al., 2017). Os clones A e E apresentaram os maiores valores médios de coeficiente de rigidez, sendo, portanto, quanto a este aspecto, os de melhor desempenho.

Em relação ao fator de forma de luce, foram obtidos valores médios de 0,51, para os clones A e C, 0,54 para o clone F, 0,58 para o clone D, 0,60 para o clone B e de 0,65 para o clone E. Relacionado com a densidade final da folha de papel, o fator de luce, pode ser uma propriedade utilizada na seleção dos exemplares quanto à qualidade da madeira para produção de celulose e papel (PIRALHO et al., 2014; BALDIN et al., 2017).

5.3.3. Dimensões e frequência dos vasos

Os valores médios e os respectivos coeficientes de variação, obtidos para a dimensão, porcentagem de área e frequência dos vasos do lenho no DAP do tronco

das árvores dos seis híbridos de *Eucalyptus* spp. avaliados, são apresentados na Tabela 15.

Pela tabela observa-se que os vasos de maiores diâmetros tangenciais foram encontrados para o clone F (93,32 μm), que diferiu significativamente dos clones A e E (84,00 e 79,70 μm , respectivamente), de menores valores. A maior porcentagem de área foi observada para o clone D (14,37%), sem diferença significativa ao clone C (12,61%). O clone F se destacou por produzir lenho com menor frequência de vasos (10,52 $\text{n}^\circ/\text{mm}^2$), diferindo significativamente aos demais clones. O clone B obteve valor intermediário de frequência vascular do lenho (12,66 $\text{n}^\circ/\text{mm}^2$), diferindo significativamente ao clone A, que apresentou o maior valor (15,35 $\text{n}^\circ/\text{mm}^2$).

Os coeficientes de variação do diâmetro e da porcentagem de área dos vasos variaram entre 11,12-22,90%, e pode-se considerar, a partir disto, que o conjunto de dados variou pouco para estas variáveis. Já os coeficientes de variação da frequência de vasos variaram entre 31,60-38,14%, valores considerados elevados. Os coeficientes de variação encontrados para a frequência dos elementos vasculares dos híbridos de estudo estão similares aos observados por Oliveira et al. (2012).

Tabela 15. Valores médios das dimensões dos vasos dos seis clones de *Eucalyptus* spp.

Clone	Diâmetro Tangencial	% de Área	Frequência
	µm	%	nº/mm²
A	84,00 bc (18,13)	12,04 b (19,44)	14,09 ab (31,60)
B	88,60 ab (13,87)	11,83 b (14,40)	12,66 b (34,75)
C	86,27 abc (22,09)	12,61 ab (22,90)	14,54 ab (38,14)
D	85,96 abc (22,60)	14,37 a (11,12)	15,35 a (31,70)
E	79,70 c (16,87)	11,19 b (18,67)	13,67 ab (33,72)
F	93,32 a (16,38)	12,18 b (16,66)	10,52 c (36,56)

Clone A= *E. grandis* x *E. urophylla*; clone B= híbrido espontâneo de *E. urophylla*; clone C= *E. pellita* x *E. grandis*; clone D= *E. camaldulensis* x *E. tereticornis*; clone E= *E. grandis* x (*E. urophylla* x *E. tereticornis*); clone F= *E. urophylla* x *E. grandis*. Médias e, entre parênteses, valores de coeficiente de variação (%). Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05\%$).

As dimensões dos elementos vasculares observados no presente estudo, estão de acordo com os apresentados por Sette Júnior et al. (2012), para árvores de *E. grandis*, aos 4 anos, com respectivas médias de 102,68 µm, 11,01 n°/mm² e 12,90% para diâmetro tangencial, porcentagem de área e frequência dos vasos. Piralho et al. (2014), estudando 14 espécies de *Eucalyptus*, com idade de 5 anos, obteve valores médios de 80 e 88 µm, para o diâmetro tangencial dos vasos de *E. camaldulensis* e *E. tereticornis*, respectivamente, valores estes também similares aos observados para os híbridos do estudo. Outrossim, Oliveira et al. (2012), em estudo com árvores de *E. grandis*, aos 64 meses, plantadas em diferentes regiões, relatou valores médios entre 91,59-103,46 µm e 13,06-14,32 n°/mm², para o diâmetro e frequência vascular, respectivamente. Alzate (2004), avaliando as propriedades anatômicas da madeira de clones de *E. grandis*, aos 8 anos, que cresceram no Estado de São Paulo, encontrou valor de diâmetro tangencial dos vasos igual a 106,00 µm e de frequência vascular variando de 9-14 n°/mm². Motta et al. (2014) apresentaram para *E. urophylla* x *E. grandis*, com idade desconhecida,

valor médio de 127,29 μm para o diâmetro tangencial e de 10,20 $\text{n}^\circ/\text{mm}^2$ para a frequência vascular.

February et al. (1995), estudando as relações entre disponibilidade hídrica, crescimento e características dos vasos, determinaram que em árvores de *E. grandis* e *E. grandis* x *E. camaldulensis*, o diâmetro e o comprimento dos vasos foram menores em condições de seca, comparadas com a úmida, sem significância para a frequência, enquanto que em *E. grandis* x *E. nitens*, a frequência dos vasos foi maior em condição de seca, sem diferença para diâmetro e comprimento, sugerindo que as plantas deste híbrido, fazem uso de água mais eficiente. Em contrapartida, Castro et al. (2015), não observaram efeito significativo da disponibilidade hídrica para as dimensões e frequência dos vasos de *E. grandis*, aos 24 e 36 meses de idade, embora tenham ressaltado a importância de se avaliar essas mesmas características em árvores de idades mais avançadas. Sabe-se que as plantas reagem diferentemente às condições de déficit hídrico dependendo da intensidade e duração do mesmo, bem como da idade, grau de adaptação e da atividade sazonal ou diária, levando à expressões de conjuntos de genes envolvidos na aclimação e adaptação ao estresse (LARCHER, 2006; TAIZ; ZEIGER, 2009; LANDSBERG, SANDS, 2012). Considerando a similaridade dos valores médios das dimensões e frequência dos vasos observados no presente estudo em relação à ampla literatura verificada, pouco foi possível considerar sobre a sensibilidade dos híbridos de *Eucalyptus* spp. às condições adversas de clima e solo características da região de Goiás, sendo necessário verificar, a partir de um estudo mais aprofundamento, a estreita relação existente entre a estrutura anatômica, em suma os elementos de vasos, e os aspectos edafoclimáticos relacionados.

Ressalta-se a importância da dimensão e do número de vasos no lenho, considerando sua influência na penetração do licor, densidade e qualidade superficial dos papéis de impressão (STOCKAN, 1970; COLLEY, 1975; CHEN E EVANS, 2004, ALVES et al., 2011). A presença de vasos nas madeiras de folhosas favorece a penetração e impregnação dos cavacos de folhosas pelo licor de cozimento kraft. Entretanto, não é desejável que a madeira utilizada para produção de celulose apresente alta porcentagem dessas células, pois alto teor de vasos implica em madeira de menor densidade, além de problemas associados à qualidade do papel.

A variação radial do diâmetro tangencial, porcentagem de área e frequência dos vasos do lenho no DAP do tronco das árvores de *Eucalyptus* spp., é apresentada na Figura 27.

Com relação ao diâmetro tangencial dos vasos (Figura 27-A), nota-se tendência de aumento significativa dos valores da medula para a casca para os seis híbridos. Os valores médios próximos à medula estão entre 65,25-74,30 μm e na região próxima à casca, encontram-se médias entre 94,21-107,27 μm .

A porcentagem de área ocupada pelos vasos (Figura 27-B) mostrou tendência de decréscimo da região medular até a região intermediária do raio, seguida de aumento em direção à casca. Porém, embora esse comportamento tenha sido observado para todos os híbridos do estudo, nenhum deles apresentou variação significativa a 5% de probabilidade.

Quanto à frequência dos vasos (Figura 27-C), foi observada tendência significativa de diminuição dos valores da medula para a casca para os seis clones, com modelos de variação muito similares entre eles, em que nota-se acentuada redução dos valores da posição 0% (região medular) para a posição 50% (região intermediária), seguida de redução mais sutil da posição intermediária até a posição 100% (região da casca). Os valores médios variam entre 15,5-22,0 $\text{n}^\circ/\text{mm}^2$ para a região próxima à medula e entre 7,8-11,4 $\text{n}^\circ/\text{mm}^2$, para a região próxima à casca.

Figura 27. Modelos de variação radial das dimensões dos vasos dos seis clones de *Eucalyptus* spp. A) Diâmetro tangencial. B) Porcentagem de área. C) Frequência. * significância ($p < 0,05\%$).

A variação das dimensões e frequência dos vasos nas posições radiais 0, 50 e 100% no DAP do tronco das árvores de *Eucalyptus* spp. do estudo, estão em consonância com as observadas por Sette Júnior et al. (2012), para árvores de *E.*

grandis, nas idades de 24, 48 e 72 meses. Leal et al. (2004); Veenin et al. (2005), Tomazello Filho (2006), Silva et al (2007), Florsheim et al. (2010) e Franco (2014), da mesma forma, apresentam modelos de variação radial do diâmetro e frequência dos vasos similares para árvores de *Eucalyptus* spp.

Conforme já mencionado, as dimensões dos elementos celulares tendem à estabilização na madeira adulta (TOMAZELLO FILHO, 1985), o que mais uma vez indica a composição lenhosa essencialmente juvenil das árvores de *Eucalyptus* spp. estudadas, em que não se verifica estabilização das dimensões dos elementos de vasos. Segundo Koga (1988) o lenho juvenil apresenta algumas características tais como paredes celulares mais finas, menor diâmetro celular, menor comprimento de fibra e vasos, bem como também maiores proporções de fibras e menores proporções de vasos.

5.4. Caracterização química do lenho das árvores de *Eucalyptus* spp.

Na Tabela 16, são apresentados os valores médios das porcentagens do elementos químicos da madeira das árvores dos seis híbridos de *Eucalyptus* spp, aos 4 anos.

Os clones B e C apresentaram os maiores teores de extrativos, de 6,25 e 5,46%, respectivamente, diferindo significativamente dos clones A e E, com respectivos valores de 4,04 e 3,69%. O teor de lignina insolúvel variou de 24,01% a 25,05%, não diferindo significativamente entre os clones. O clone A apresentou o maior teor de lignina total (28,78%), diferindo significativamente ao clone B (27,46). O teor de holocelulose variou entre 65,85% - 67,99%, sendo os maiores valores verificados para os clones A e E. O menor teor de cinzas foi o verificado para o clone B, de 0,25%, significativamente inferior ao verificados para os clones C, E e F, com variação entre 0,35-040%. Observou-se, também, que os coeficientes de variação (CV) foram de baixa magnitude para todas as variáveis. Trugilho et al. (2007 e 2012), trabalhando com diferentes clones de *Eucalyptus*, aos 5,8 anos de idade, encontraram variação elevada para os teores de cinzas e extrativos na madeira, sendo o teor de extrativos na madeira o que apresentou a maior variabilidade entre os clones, assim como verificado no presente estudo.

Tabela 16. Valores médios das características químicas dos seis clones de *Eucalyptus* spp.

Clone	Extrativos totais	Lignina insolúvel	Lignina solúvel	Lignina total	Holocelulose	Cinzas
%						
A	4,04 c (12,89)	24,83 a (3,72)	3,95 a (10,89)	28,78 a (2,70)	66,91 ab (1,11)	0,27 bc (20,14)
B	6,25 a (8,14)	24,01 a (1,80)	3,45 ab (10,96)	27,46 b (2,18)	66,04 b (1,24)	0,25 c (12,32)
C	5,46 ab (3,45)	24,80 a (2,84)	3,49 ab (11,59)	28,29 ab (2,03)	65,85 b (0,95)	0,40 a (11,54)
D	5,07 b (6,24)	25,05 a (2,65)	3,37 ab (7,08)	28,42 ab (2,36)	66,16 b (1,01)	0,34 abc (13,07)
E	3,69 c (11,51)	24,73 a (0,90)	3,21 b (5,31)	27,94 ab (0,92)	67,99 a (0,37)	0,40 a (10,16)
F	4,55 bc (20,14)	24,93 a (1,88)	3,63 b (4,45)	28,56 ab (1,25)	66,54 b (1,47)	0,35 ab (18,23)

Clone A= *E. grandis* x *E. urophylla*; clone B= híbrido espontâneo de *E. urophylla*; clone C= *E. pellita* x *E. grandis*; clone D= *E. camaldulensis* x *E. tereticornis*; clone E= *E. grandis* x (*E. urophylla* x *E. tereticornis*); clone F= *E. urophylla* x *E. grandis*. Médias e, entre parênteses, valores de coeficiente de variação (%). Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05\%$).

Trugilho et al. (2014), estudando as alterações nas características da madeira de espécies e clones de *Eucalyptus*, em função da idade e do material genético, encontrou teores médios de extrativos totais variando entre 4,5-9,0%, corroborando com os valores verificados no presente estudo. Entretanto, para grande parte dos trabalhos encontrados na literatura para clones de *Eucalyptus* spp., verificam-se valores inferiores de porcentagem de extrativos, citam-se Gouvêa et al. (2009), Santos e Sansígolo (2011), Protásio et al. (2014a) Protásio et al. (2014b), Castro et al. (2016) e Moraes et al. (2017).

De acordo com Lopes (2008), a transformação da parte mais interna do alburno em cerne, ocasionada pela perda da atividade fisiológica das células, é acompanhada pela formação de várias substâncias orgânicas, conhecidas genericamente como extrativos, sendo sua composição e quantidade relativa dependente de diversos fatores, como espécie, idade da planta e região de plantio. Segundo o mesmo autor, os extrativos são indesejáveis ao processo de fabricação

de celulose por causarem redução no rendimento, aumento no consumo de reagentes químicos, inibição da reação de deslignificação, corrosão de equipamentos e decréscimo da qualidade da polpa celulósica (escurecimento e impermeabilidade). Ainda, de acordo com Gomide et al. (2005), os clones com maiores teores de extrativos deverão apresentar menor rendimento da polpação, com perdas de até 4% no rendimento, devido exclusivamente à remoção dos extrativos.

Os clones de *Eucalyptus* spp. do estudo, de maneira geral, apresentaram baixos teores de lignina (inferior a 30%), com valores semelhantes aos relatados por Trugilho et al. (2015) para clones de *Eucalyptus* spp., com idade de 4 anos. Os resultados também estão próximos aos observados por Neves et al. (2011) e Protásio et al. (2014). Gomide et al. (2005) relataram valores entre 22,4-28,6%, 3,1-5,1% e 27,5-31,7%, para os teores de lignina Klason insolúvel, solúvel e total, respectivamente. Neiva et al. (2015), estudando 12 espécies de *Eucalyptus*, obteve valores médios de 24,0 e 27,8%, de lignina total para *E. camaldulensis* e *E. grandis*, respectivamente.

Quanto ao teor de cinzas, os resultados observados para os clones de *Eucalyptus* spp. do presente estudo estão similares aos verificados por Neves et al. (2009), para clones de *Eucalyptus* spp. avaliados em diferentes regiões. Em estudo desenvolvido por Moraes et al. (2017), com clones de *Eucalyptus* spp., o teor de cinzas foi correlacionado com a idade, sendo verificada diminuição significativa com o avanço desta. Segundo o mesmo autor, as árvores mais jovens requerem maiores quantidades de minerais, porque estão em fase de crescimento, onde o metabolismo é acelerado, justificando, assim, o maior teor de cinzas constituintes. Em relação à qualidade para produção de celulose e papel, esta variável representa um aspecto negativo, estando associada a problemas com incrustações e desgastes dos equipamentos fabris.

Considerando a afirmação de Gomide et al. (2010), de que elevados teores de extrativos e lignina na madeira afetam negativamente o rendimento em polpa celulósica e de que elevados teores de holocelulose são desejáveis para a produção de polpa celulósica, tem-se que o clone E apresentou madeira com melhor potencial para esta atividade. Entretanto, é importante ressaltar que este mesmo clone apresentou desempenho inferior em relação a outros parâmetros de qualidade da

madeira já anteriormente estudados (dendrometria e índices de fibras) o que indica a necessidade de uma análise conjunta para a determinação do potencial dos clones de estudo.

Altos teores de lignina na madeira, associado com baixos valores de cinzas e holocelulose, são mais desejáveis para a produção de bioenergia (TRUGILHO et al., 1997; TRUGILHO et al., 2001; TRUGILHO, 2009; PROTÁSIO et al., 2012). Sendo assim, cita-se como informação complementar que, quanto às características químicas, os clones A e D foram os que apresentaram maior potencial para bioenergia.

5.5. Polpação Kraft

5.5.1. Curvas de cozimento para obtenção do Kappa $\pm$ 18

Os resultados de todos os cozimentos, abrangendo números kappa, rendimentos, características dos licores residuais e os sólidos totais, estão apresentados na Tabela 17.

Por meio de análise de regressão, determinou-se os modelos de regressão que melhor se ajustavam aos resultados obtidos, usando-se modelos lineares e polinomiais, em que Y representa o número kappa, rendimento depurado ou álcali consumido, e Xi, as cargas de álcali ativo utilizadas. Nas Figuras (28, 29, 30) estão apresentados os gráficos obtidos e as respectivas equações estabelecidas para determinar, matematicamente, a carga de álcali necessária à obtenção de número kappa 18, bem como o rendimento e o álcali consumido correspondentes a esse nível de kappa, dos seis híbridos de *Eucalyptus* spp., aos 4 anos.

Tabela 17. Caracterização dos cozimentos Kraft dos seis clones de *Eucalyptus* spp.

Clone	AAA (%)	Número Kappa	Rendimentos, %		Licor negro residual		ST (%)
			Bruto	Depurado	AAR, g.l ⁻¹	Sulfidez, %	
A	22	19,65	52,19	51,73	19,43	48,25	14,76
	24	18,82	51,63	51,41	21,06	51,79	15,41
	26	15,73	50,91	50,64	24,08	53,38	15,90
	28	14,46	49,59	49,46	26,78	50,54	16,61
B	22	21,96	53,34	53,01	14,38	60,82	14,62
	24	19,34	52,22	52,05	19,13	50,00	15,32
	26	16,71	51,96	51,91	24,67	49,37	15,83
	28	14,49	50,23	50,23	25,73	48,56	16,52
C	22	22,11	53,70	53,34	18,43	58,82	14,66
	24	19,85	52,48	52,22	22,17	47,36	15,05
	26	16,80	51,62	51,54	26,83	42,02	15,78
	28	16,42	50,40	50,19	29,34	34,29	16,36
D	22	18,86	53,39	53,16	16,53	57,72	14,78
	24	17,27	52,56	52,44	20,00	53,73	15,35
	26	16,17	52,00	51,91	22,82	53,26	15,78
	28	14,35	51,56	51,47	27,57	47,57	16,24
E	22	19,17	52,82	52,41	22,95	48,78	14,62
	24	17,40	52,75	52,73	27,98	44,78	14,90
	26	16,12	51,51	51,49	31,28	39,63	15,51
	28	14,86	50,46	50,44	36,81	34,07	15,99
F	22	20,16	53,48	53,36	19,11	60,31	14,49
	24	17,00	52,02	51,96	24,90	58,74	15,27
	26	16,69	52,01	51,93	29,06	39,49	15,71
	28	15,10	50,81	50,76	35,26	33,40	16,47

Clone A= *E. grandis* x *E. urophylla*; clone B= híbrido espontâneo de *E. urophylla*; clone C= *E. pellita* x *E. grandis*; clone D= *E. camaldulensis* x *E. tereticornis*; clone E= *E. grandis* x (*E. urophylla* x *E. tereticornis*); clone F= *E. urophylla* x *E. grandis*; AAA= álcali ativo aplicado; AAR= álcali ativo residual; ST= teor de sólidos totais.

Figura 28. Modelos de regressão do número Kappa em função do álcali ativo aplicado, dos seis clones de *Eucalyptus* spp. A) clone A (*E. grandis* x *E. urophylla*). B) clone B (híbrido espontâneo de *E. urophylla*). C) clone C (*E. pellita* x *E. grandis*). D) clone D (*E. camaldulensis* x *E. tereticornis*). E) clone E (*E. grandis* x (*E. urophylla* x *E. tereticornis*)). F) clone F (*E. urophylla* x *E. grandis*).

Figura 29. Modelos de regressão do rendimento depurado em função do álcali ativo aplicado, dos seis clones de *Eucalyptus* spp. A) clone A (*E. grandis* x *E. urophylla*). B) clone B (híbrido espontâneo de *E. urophylla*). C) clone C (*E. pellita* x *E. grandis*). D) clone D (*E. camaldulensis* x *E. tereticornis*). E) clone E (*E. grandis* x (*E. urophylla* x *E. tereticornis*)). F) clone F (*E. urophylla* x *E. grandis*).

Figura 30. Modelos de regressão do álcali consumido em função do álcali ativo aplicado, dos seis clones de *Eucalyptus* spp. A) clone A (*E. grandis* x *E. urophylla*). B) clone B (híbrido espontâneo de *E. urophylla*). C) clone C (*E. pellita* x *E. grandis*). D) clone D (*E. camaldulensis* x *E. tereticornis*). E) clone E (*E. grandis* x (*E. urophylla* x *E. tereticornis*)). F) clone F (*E. urophylla* x *E. grandis*).

Pelo uso das equações, foram determinadas as características tecnológicas da madeira para produção de polpa celulósica Kraft com Kappa ± 18 , dos seis híbridos de *Eucalyptus* spp. (Tabela 18).

Tabela 18. Cozimento Kraft para produção de polpa com Kappa ± 18

Clone	Variáveis correlacionadas ao Kappa ± 18		
	Álcali aplicado	Rendimento depurado	Álcali consumido
		%	(g.l ⁻¹)
A	24,15 abc	51,31 a	39,26 a
B	25,10 ab	52,29 a	40,57 a
C	25,54 a	51,34 a	38,48 a
D	23,18 c	52,79 a	39,72 a
E	23,45 bc	52,67 a	32,02 b
F	23,47 abc	52,23 a	35,29 ab

Clone A= *E. grandis* x *E. urophylla*; clone B= híbrido espontâneo de *E. urophylla*; clone C= *E. pellita* x *E. grandis*; clone D= *E. camaldulensis* x *E. tereticornis*; clone E= *E. grandis* x (*E. urophylla* x *E. tereticornis*); clone F= *E. urophylla* x *E. grandis*.

Por esta tabela, observa-se que somente o rendimento depurado não apresentou diferença significativa entre os clones, com valores entre 51,31-52,79%. Considerando a designificação para obtenção de polpa celulósica com kappa ± 18 , o clone D foi o que exigiu menor carga de álcali ativo (23,18%), diferindo significativamente aos clones B e C. Os clones E e F apresentaram os menores valores para o álcali consumido (32,02 e 35,29 g.l⁻¹, respectivamente), com o clone E diferindo significativamente aos demais.

Gomide et al. (2004) realizando curvas de cozimento Kraft para um clone de *Eucalyptus* sp., observou valor de 18,4% para o álcali ativo necessário na produção de polpa celulósica com Kappa ± 18 . Similarmente, Gouvêa et al., (2009) cita para clones de *Eucalyptus* spp., com idade de 3 anos, carga de álcali de 18,4%, necessária para kappa ± 17 . Gomide et al. (2010), em contrapartida, avaliando setenta e cinco amostras de madeiras de clones de *Eucalyptus* spp., de diferentes regiões geográficas do Brasil, fornecidas por empresas nacionais de celulose, mencionam porcentagens de álcali ativo entre 20,1 e 23,7%, para Kappa ± 18 , destacando a grande variabilidade existente para este parâmetro tecnológico. A partir destes conhecimentos, verifica-se que os clones de *Eucalyptus* spp. do estudo

exigiram elevadas cargas de álcali na produção de polpa com Kappa ± 18 , o que representa uma grande desvantagem quanto à potencialidade tecnológica dos materiais, principalmente visando aplicabilidade industrial, já que aumento do nível de álcali em cozimentos de grande escala repercutem em expressiva elevação dos custos de produção.

A elevada carga alcalina exigida para os clones do estudo pode ser justificada pela composição química do lenho, em que se verificam altos teores de extrativos. Entretanto, os materiais apresentam baixos teores de lignina, o que indica que outras propriedades devam estar relacionadas. Queiroz et al. (2004), em estudo com dois clones de *Eucalyptus* spp., com diferentes densidade básicas (0,45 e 0,55 g/cm³), observaram que na madeira de alta densidade foi necessário empregar carga de álcali de 19,6%, substancialmente mais elevada que na madeira de baixa densidade (17,7%). As madeiras dos clones de estudo, em referência, apresentaram valores de densidade básica média baixos à intermediários (0,46-0,50 g/cm³). Morais et al. (2017), avaliando clones de *Eucalyptus* spp. em diferentes idades (1 a 8 anos), não verificou influência expressiva da idade na carga alcalina. Faz-se necessária uma avaliação mais completa da qualidade dos materiais do estudo, visando melhor caracterizar a constituição química, quanto aos tipos de lignina e carboidratos presentes na madeira, bem como das condições de cozimento aplicadas, visando uma maior otimização.

Os valores de rendimento depurado dos clones de estudo estão próximos aos verificados por Ferreira et al. (2006), que na avaliação do potencial tecnológico para a produção de celulose Kraft de 12 clones de *Eucalyptus* spp., em idades de 7 a 9 anos, observou médias variando entre 48,8 e 53,9%. Similarmente, Gouvêa et al. (2009), avaliando a produção de polpa celulósica kraft em seis clones de *Eucalyptus* spp., aos 3 anos, plantados em diferentes regiões do Estado de Minas Gerais, relataram valores de rendimento depurado entre 50,3 e 52,9%.

Quanto ao álcali ativo consumido nos cozimentos, têm-se que os resultados do presente estudo estão em consonância com a literatura. Segura (2015) cita, para materiais de idades mais avançadas, valores entre 28 e 37 g.l⁻¹ para *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana* e seus híbridos. Vivian (2015) menciona valor médio de 34,2 g.l⁻¹ para *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (Kappa ± 15).

Em retomada à tabela 17, observa-se que os valores de rendimento depurado encontram-se muito próximos aos valores de rendimento bruto, dada a baixa porcentagem de rejeitos obtida das polpas produzidas. É esperado baixo teor de rejeitos para altas cargas de álcali ativo aplicada, como no caso do presente estudo.

Em relação ao álcali ativo residual (vide Tabela 17), são observados valores entre 14,38 e 36,81 g.l⁻¹, para as diferentes cargas alcalinas (22, 24, 26 e 28%). Estes valores estão superiores aos relatados por Santos e Sansígolo (2007), de 10,02 e 11,22 g.l⁻¹, para a polpa celulósica de dois híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptu urophylla*, Kappa ±17. Similarmente, Vivian (2015) menciona valor médio de 11,1 g.l⁻¹, para o mesmo híbrido, na produção de polpa com Kappa ±15. Justifica-se a superioridade dos valores encontrados para os materiais de estudo dada as elevadas cargas de álcali aplicadas e menores taxas de deslignificação.

Os valores de sólidos totais (vide Tabela 17) presentes nos licores negros amostrados das diferentes cargas de álcali, mostraram-se muito similares entre os seis clones, variando de 14 a 17%, nas faixas entre 22 e 24% de álcali ativo. Os resultados observados no presente estudo estão próximos aos verificados por Ferreira et al. (2006), que relatam valores entre 10,4 e 17,7% para o teor de sólidos totais de 12 clones de *Eucalyptus* spp. submetidos à polpação Kraft para Kappa ±18. De acordo com Duarte (2007), a carga alcalina é a que mais influencia na composição inorgânica do licor negro, apresentando efeito direto sobre a quantidade de sólidos gerados na polpação, enquanto que os componentes da madeira dissolvidos durante o processo de polpação, por sua vez, representam a principal fonte de componentes orgânicos do licor negro.

Ressalta-se que em análises comparativas do desempenho de processos de polpação Kraft, é importante que as informações sejam avaliadas com cautela, considerando que as condições de cozimento, como a relação entre a temperatura e o tempo, denominada Fator H, e o álcali aplicado, podem ser variadas, estando associadas aos resultados verificados.

5.5.2. Aspectos de produtividade e eficiência dos cozimentos Kraft

Na Tabela 19, são apresentados alguns parâmetros relacionados à eficiência e produtividade dos cozimentos Kraft dos seis híbridos de *Eucalyptus* spp., aos 4

anos. São eles: consumo específico de madeira (CEM), incremento médio anual de celulose (IMACEL), álcali ativo consumido por tonelada de celulose (AAC/ton.cel) e teor de sólidos gerados por tonelada de celulose (TS/ton.cel).

Tabela 19. Parâmetros de eficiência e produtividade dos cozimentos Kraft ($Kappa \pm 18$) dos seis clones de *Eucalyptus* spp., aos 4 anos.

Clone	CEM ($m^3.tsa^{-1}$)	IMACEL ($t.sa.ha^{-1}.ano^{-1}$)	AAC/ton.cel ($kg.tsa^{-1}$)	TS/ton.cel ($t.tsa^{-1}$)
A	3,78 b (0,91)	14,70 b (0,91)	274,45 a (1,88)	1,26 a (1,77)
B	3,47 d (0,08)	14,67 b (0,08)	279,76 a (11,09)	1,24 ab (0,40)
C	3,94 a (0,96)	12,46 d (0,96)	269,83 a (7,10)	1,26 a (1,27)
D	3,62 c (0,94)	9,54 e (0,94)	270,84 a (1,73)	1,19 b (1,55)
E	3,46 d (1,38)	14,09 c (1,38)	218,90 b (3,22)	1,21 ab (2,36)
F	3,46 d (1,61)	19,75 a (1,60)	243,29 ab (1,10)	1,22 ab (1,37)

Clone A= *E. grandis* x *E. urophylla*; clone B= híbrido espontâneo de *E. urophylla*; clone C= *E. pellita* x *E. grandis*; clone D= *E. camaldulensis* x *E. tereticornis*; clone E= *E. grandis* x (*E. urophylla* x *E. tereticornis*); clone F= *E. urophylla* x *E. grandis*; CEM= consumo específico de madeira; IMACEL= incremento médio anual de celulose; AAC. /ton.cel= álcali ativo consumido por tonelada de celulose; TS/ton.cel= teor de sólidos gerados por tonelada de polpa celulósica. Médias e, entre parênteses, valores de coeficiente de variação. Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05\%$).

Houve variação significativa entre os 6 clones de *Eucalyptus* spp., para todos os parâmetros determinados. De maneira geral, o clone F foi o que mostrou o melhor desempenho, com baixos valores de CEM ($3,46 m^3.tsa^{-1}$), AAC/ton.cel ($243,29 kg.tsa^{-1}$) e TS/ton.cel ($1,22 t.tsa^{-1}$), e elevado valor de IMACEL ($19,75 tsa.ha^{-1}.ano^{-1}$). Essa notoriedade ao clone F é dada principalmente em função da excelente performance em produtividade da madeira (vide item 5.1), o que ressalta a importância dos parâmetros volumétricos e de biomassa no processo de seleção de materiais genéticos visando destino industrial. O clone E, embora tenha apresentado os melhores resultados para as variáveis AAC/ton.cel e TS/ton.cel, com valores de $218,90 kg.tsa^{-1}$ e $1,21 t.tsa^{-1}$, respectivamente, obteve um valor inferior de IMACEL

(14,09 tsa.ha⁻¹.ano⁻¹) em relação aos clones A, B e F. Os clone C e D, foram os de inferior desempenho, com o maior valor de CEM verificado para o clone C (3,94 m³.tsa⁻¹) e menor valor de IMACEL obtido para o clone D (9,54 tsa.ha⁻¹.ano⁻¹). Os clones A e B apresentaram desempenhos intermediários.

Os resultados obtidos para as características de produtividade e eficiência dos cozimentos kraft dos materiais de estudo mostram-se em consonância com os relatados por Segura (2015) e Vivian (2015). Segura (2015) cita que a variação observada para o álcali ativo consumido, deve-se, principalmente, às diferenças químicas observadas entre os materiais, e este, além de influenciar o rendimento do processo de polpação, reflete diretamente na área de caustificação de uma fábrica de celulose, onde é produzido o licor branco.

De acordo com Bassa (2006) a caldeira de recuperação de uma fábrica de celulose apresenta capacidade de queima de sólidos determinada e, desde que não haja restrição na alimentação de cavacos nem na disponibilidade de vapor, a capacidade de queima de sólidos determina a capacidade de produção de polpa celulósica de uma unidade industrial. Desta forma, o teor de sólidos gerados no processo de produção de celulose apresenta relação direta com a capacidade máxima de produção de uma fábrica.

5.6. Análise de componentes principais (ACP)

No estudo presente, a ACP foi realizada considerando-se dois conjuntos distintos de variáveis cujos valores médios foram determinados em posições longitudinais específicas do tronco das árvores dos clones de *Eucalyptus* spp., a saber:

- i. Somente no DAP (Figura 33): variáveis anatômicas de fibras (espessura da parede, diâmetro do lume, comprimento e largura) e de vasos (frequência, diâmetro tangencial e área ocupada) e químicas (extrativos, cinzas, lignina total e holocelulose) e densidade básica.
- ii. A partir das 6 diferentes posições longitudinais do tronco (Figura 34): densidade básica, DAP, altura total (HT) e os parâmetros da polpação (teor de sólidos, rendimento depurado, sulfidez, álcalis ativos aplicado e consumido e incremento médio anual de celulose (IMACEL)).

De acordo com Muñoz et al. (1992), em uma figura que represente a ACP, os vetores com medidas mais distantes de zero correspondem às variações com maior influência sobre o valor do componente principal, enquanto os vetores mais próximos de zero correspondem a uma variável com pequena influência.

A Figura 32 evidencia o agrupamento dos clones A (*E. grandis* x *E. urophylla*), B (híbrido de *E. urophylla*) e F (*E. urophylla* x *E. grandis*) pela similaridade de características anatômicas, notadamente diâmetro tangencial de vasos e comprimento de fibras. Os demais clones apresentam-se separados no plano geométrico, sendo o clone C (*E. pellita* x *E. grandis*) pelas características de largura das fibras e teor de extrativos em sua madeira; o clone D (*E. camaldulensis* x *E. tereticornis*) pelos parâmetros anatômicos frequência e área ocupada pelos vasos e o clone E (*E. grandis* x (*E. urophylla* x *E. tereticornis*)) pelo teor de holocelulose e densidade básica da madeira.

Figura 31. Análise de componentes principais das variáveis anatômicas de fibras (comprimento, largura, espessura da parede e diâmetro do lume) e vasos (diâmetro tangencial, frequência e vasos/mm²), químicas e da densidade básica dos seis clones de *Eucalyptus* spp. Diâmetro= diâmetro tangencial dos vasos; A= *E. grandis* x *E. urophylla*; B= híbrido espontâneo de *E. urophylla*; C= *E. pellita* x *E. grandis*; D= *E. camaldulensis* x *E. tereticornis*; E= *E. grandis* x (*E. urophylla* x *E. tereticornis*); F= *E. urophylla* x *E. grandis*.

A posição de cada um dos vetores no gráfico indica a relação entre as características que definem cada um dos clones estudados. São variáveis

diretamente relacionadas: (i) a espessura da parede das fibras e teor de cinzas, apresentando uma relação inversa com o diâmetro tangencial de vasos, (ii) teor de extrativos e diâmetro do lume de fibras e (iii) holocelulose e densidade básica. Estabelecem relações inversamente proporcionais: (i) teor de holocelulose e densidade básica em relação a teor de extrativos e diâmetro do lume de fibras, além de comprimento de fibras e frequência de vasos.

Segundo Trugilho et al. (1996), dentre certos limites, maiores valores de densidade básica da madeira são encontrados em genótipos com menores teores de holocelulose e extrativos e maiores de lignina. Quanto ao componente cinzas, por este compor uma porcentagem muito baixa da estrutura da madeira de *Eucalyptus* (geralmente <0,5%), pouco se verifica a respeito de sua relação com outras propriedades. A variável lignina, de dimensão vetorial reduzida, exibe-se como um atributo do qual os clones de *Eucalyptus* spp. mostram pouca diferenciação.

Não foi verificada forte correlação entre as variáveis densidade básica e espessura de parede das fibras, como comumente se relata na literatura, a exemplo dos trabalhos de Yi-Quing et al. (2006), Lobão et al. (2010) e Faria (2016), em que maiores valores de espessura da parede da fibra indicam maiores valores de densidade do lenho. Dinus e Welt (1997) relatam que a alta densidade básica em híbridos de *Eucalyptus* spp., entretanto, pode ser em razão de um elevado número de fibras com lume estreito e paredes celulares relativamente finas e flexíveis. Considerando os resultados obtidos no presente trabalho e a literatura consultada, é sugerível que as relações entre densidade básica e dimensões de fibras na madeira dos híbridos de *Eucalyptus* spp. sejam melhor estudadas.

A frequência dos vasos apresentou relação direta com a área ocupada por estes, no entanto, não se pode afirmar que quanto maior a frequência maior a área ocupada pelos vasos, já que a porcentagem de área ocupada é função também das dimensões dos mesmos, ou seja, algumas madeiras podem apresentar grande número de vasos com diâmetros reduzidos e outras um número pequeno de vasos com diâmetros maiores, que configuram semelhantes porcentagens de área ocupada. Esse comportamento pode ser também verificado analisando-se a variação dimensional dos vasos em perfil radial do tronco das árvores, em que maiores valores de frequência de vasos não necessariamente resultam em maior área ocupada pelos mesmos, em função de suas dimensões reduzidas (vide item 5.3.3.).

A densidade básica mostrou devida relação inversa com a porcentagem de área ocupada pelos vasos. Sabe-se que a variação natural de peso em madeiras reflete a quantidade de matéria lenhosa por unidade de volume ou a quantidade de espaços vazios nelas existentes, em que, quanto maior for a sua porosidade, menor deverá ser a sua densidade, sendo que a presença de inclusões e conteúdos como gomo-resina, cristais, sílica, etc., quando em grande proporção, podem aumentar o peso da madeira (BURGER; RICHTER, 1991).

De maneira geral, a análise de valores médios de densidade básica e dos parâmetros dendrométricos e da polpação Kraft das árvores do estudo (Figura 33) indicou que os clones possuem características individuais determinante para o agrupamento observado, sendo elas:

- (i) AAC e teor de sólidos para o clone A;
- (ii) AAA, HC e DAP para o clone B;
- (iii) Teor de sólidos para o clone C;
- (iv) Sulfidez, com menor influência, para o clone D;
- (v) Densidade básica e rendimento depurado para o clone E;
- (vi) IMACEL para o clone A

As relações passíveis de serem estabelecidas entre as variáveis de estudo que caracterizam cada um dos 6 clones são: álcali ativo aplicado (AAA) e teor de sólidos, HC, DAP e IMACEL, densidade básica e rendimento depurado. Correlações entre a densidade básica da madeira e o rendimento depurado em polpa são verificadas em outros trabalhos (SANSÍGOLO; RAMOS, 2010; QUEIROZ et al., 2004). Queiroz et al. (2004) reforça que uma avaliação adequada da densidade básica fornece indicações bastante precisas acerca da impregnação dos cavacos e rendimento do processo de polpação celulósica, estando, geralmente, associada às características de qualidade e de resistências físico-mecânicas da polpa.

Ainda, a análise do gráfico 34 permite estabelecer as relações contrapostas mais evidentes entre as variáveis, como por exemplo entre AAA e teor de sólidos com rendimento depurado, AAC e densidade básica DAP e HC com sulfidez.

Figura 32. Análise de componentes principais da densidade básica, parâmetros dendrométricos (HC, DAP, IMACEL) e parâmetros do cozimento Kraft (rendimento depurado, sulfidez, álcali ativo consumido, álcali ativo aplicado e teor de sólidos) dos seis clones de *Eucalyptus* spp. IMACEL= incremento médio anual de celulose; DAP= diâmetro à altura do peito; HC= altura comercial; AAA= álcali ativo aplicado; AAC= álcali ativo consumido; A= *E. grandis* x *E. urophylla*; B= híbrido espontâneo de *E. urophylla*; C= *E. pellita* x *E. grandis*; D= *E. camaldulensis* x *E. tereticornis*; E= *E. grandis* x (*E. urophylla* x *E. tereticornis*); F= *E. urophylla* x *E. grandis*.

A relação inversa entre a carga de álcali e o rendimento depurado corrobora com o que se afirma na literatura, que aumentos do álcali proporcionam significativa queda no rendimento do processo. Segundo Gomide et al. (2010), demanda de altas cargas de álcali constitui uma característica altamente desfavorável, estando fortemente relacionada com a perda de rendimento e degradação mais intensa das cadeias de carboidratos. Em complemento, Gomide et al. (2005) cita o rendimento de polpação como um parâmetro global de qualidade perfeitamente válido para ser utilizado, uma vez que tal característica tecnológica é consequência de várias fatores, englobando as características anatômicas e químicas da madeira, e a demanda de álcali para produção de polpa celulósica.

A forte relação existente entre as variáveis IMACEL, DAP e altura comercial é esperada, uma vez que se relacionam ao volume das árvores, pelo qual o incremento médio anual de celulose é calculado. A sulfidez apresentou relação inversa à estas variáveis, porém com efeito de menor intensidade dentre todas as variáveis analisadas, indicado pelo vetor de menor tamanho.

Como já anteriormente mencionado (vide item 5.5.1), a carga alcalina é a variável que mais influencia na composição inorgânica do licor negro, apresentando efeito direto sobre a quantidade de sólidos gerados na polpação, relação esta confirmada no presente trabalho.

6. CONCLUSÕES

Os resultados do presente trabalho permitem concluir que:

- Os clones-elite de *Eucalyptus* spp. apresentaram notáveis características de crescimento e produtividade, aos 4 anos, indicando boa adaptabilidade às condições edafoclimáticas do estado de Goiás, especificamente à região do Município de Luziânia- GO, a exceção do clone D.
- As características dendrométricas apresentaram efeito significativo do material genético (clone), com os maiores valores de DAP, volume e IMA verificados para o clone F (*E. urophylla* x *E. grandis*), significativamente superior ao clone D (*E. camaldulensis* x *E. tereticornis*), de desempenho inferior;
- O efeito de clone foi verificado para a densidade básica do lenho das árvores de *Eucalyptus* spp. e, do contrário, mostrou-se não significativo para a densidade básica ponderada. Os valores médios de densidade básica e densidade básica ponderada do lenho dos clones de *Eucalyptus* spp. variaram entre 0,46 e 0,50 g/cm³, caracterizando-os como de média densidade, aptos à aplicação tecnológica na produção de celulose de mercado;
- Não foi verificado efeito significativo das posições longitudinais do tronco das árvores de *Eucalyptus* spp. na densidade básica, para a maioria dos clones de estudo. Os modelos de variação longitudinal da densidade básica foram diversos, não sendo observado um padrão comum a todos os clones;
- O valor mais alto de densidade aparente do lenho foi encontrado para o clone E [*E. grandis* x (*E. urophylla* x *E. tereticornis*)], com média de 0,65 g/cm³. Não foi verificado efeito significativo das posições longitudinais do tronco das árvores de *Eucalyptus* spp. na densidade aparente;
- A técnica de densitometria de raios X mostrou-se útil na avaliação do perfil densitométrico radial do tronco das árvores de *Eucalyptus* spp., indicando uma composição relativamente homogênea, com predomínio ou totalidade de lenho juvenil;

- Em relação a análise morfológica das fibras e dos vasos, tem-se que os valores médios obtidos para os clones de *Eucalyptus* spp. do estudo estão coerentes com os verificados na literatura específica.
- O comprimento, a largura e a espessura da parede de fibras do lenho das árvores de *Eucalyptus* spp. mostram tendência de serem maiores na porção entre o DAP e 50% da altura do fuste;
- Os índices de qualidade das fibras, indicam que, de modo geral, os clones de *Eucalyptus* spp. podem ser classificados como bons para produção de celulose e papel;
- Na variação radial do tronco das árvores de *Eucalyptus* spp. não foi verificada tendência de estabilização das dimensões dos elementos anatômicos (fibras e vasos), caracterizando o lenho dos clones de *Eucalyptus* spp. de estudo como juvenil;
- Foi verificado efeito significativo do material genético nos teores de extrativos, lignina solúvel, holocelulose e cinzas. Do ponto de vista químico, o clone E apresentou madeira com melhor potencial para a produção de polpa celulósica Kraft.
- Os modelos de regressão ajustados para as variáveis carga de álcali, rendimento depurado e álcali consumido, correspondentes ao Kappa ± 18 , apresentaram alto grau de confiabilidade. Para estas variáveis, somente o rendimento depurado não apresentou diferença significativa entre os clones;
- O clone D (*E. camaldulensis* x *E. tereticornis*) foi o que exigiu menor carga de álcali ativo (23,18%) e o clone E, o que apresentou o menor valor médio para o álcali consumido (32,02 g.l⁻¹).
- O clone F (*E. urophylla* x *E. grandis*) foi o que mostrou o melhor desempenho em relação aos parâmetros de produtividade e eficiência do cozimento kraft, com baixos valores de CEM (3,46 m³.tsa⁻¹), AAC/ton.cel (243,29 kg.tsa⁻¹) e TS/ton.cel (1,22 t.tsa⁻¹), e elevado valor de IMACEL (19,75 tsa.ha⁻¹.ano⁻¹);
- Análise de componentes principais (ACP) permitiu o agrupamento ou separação dos clones de acordo com a variação com a variação das características física, dendrométricas, anatômicas e químicas de suas madeiras e daquelas relacionadas à transformação tecnológica em polpa celulósica Kraft. Ademais, possibilitou o

estabelecimento de relações entre as variáveis que caracterizam cada um dos materiais, sendo algumas destas reportadas na literatura especializada, enquanto outras não puderam ser justificadas.

- Em geral, os clones analisados apresentaram variações consideráveis com respeito às características anatômicas, físicas e químicas da madeira, bem como no desempenho da polpação. Considerando uma análise conjunta dos aspectos primordiais relacionados à qualidade da madeira e ao seu desempenho na polpação, conclui-se que os clones E e F são os de maior potencial tecnológico para a produção de celulose Kraft na região de Luziânia, Goiás.

7. RECOMENDAÇÕES

Como recomendações são apresentadas sugestões para futuras pesquisas visando melhor diagnosticar a potencialidade tecnológica dos seis clones-elite de *Eucalyptus* spp., provenientes do teste clonal no Município de Luziânia- GO, com vistas à geração de importantes informações técnicas que contribuam para indicar o potencial para a expansão de florestas plantadas de eucalipto no Estado de Goiás, destinadas ao mercado de celulose. São elas:

- Complementariedade das análises estatísticas, correlacionando: densidade aparente x características anatômicas; características químicas x parâmetros de cozimento, dentre outras; em busca do conhecimento mais aprofundado a cerca das relações existentes entre as características de qualidade do lenho das árvores dos clones-elite de *Eucalyptus* spp. e o seu potencial tecnológico para transformação em polpa celulósica;
- Reavaliação das propriedades anatômicas, físicas e químicas do lenho, bem como dos aspectos de crescimento e produtividade de árvores com idades mais avançadas (entre 6 e 7 anos), visando verificar o efeito das características edafoclimáticas a longo prazo;
- Inclusão de metodologias que relacionem dados climáticos e propriedades do lenho, bem como o uso de modelos ecofisiológicos de variação do crescimento das árvores de *Eucalyptus* spp. em função das condições edafoclimáticas características da região do estado de Goiás;
- Reavaliação das propriedades do lenho e da produção de polpa celulósica em árvores de maiores idades visando identificar possíveis diferenças entre os resultados obtidos do presente trabalho, que possam alterar de forma significativa o diagnóstico da qualidade da madeira bem como do “ranking” dos diferentes materiais genéticos;
- Reavaliação das propriedades do lenho em idades subsequentes visando identificar a idade de colheita mais adequada, atentando-se à qualidade do lenho para produção de celulose e aos aspectos econômicos relacionados.

REFERÊNCIAS

- ABAYOMIAD, Y. A.; ADEDOYIN, G. A. Effects of planting date and nitrogen fertilizer application on growth and yield of contrasting maize (*Zea mays* L.) genotypes II: morphophysiological growth characters and their contributions to grain yield. **Nigerian Journal of Pure and Applied Science**, Lagos, v.19, p.641-652, 2004.
- ALENCAR, G. S. B.; BARRICHELO, L. E. G.; SILVA JÚNIOR, F. G. Qualidade da madeira de híbrido de *E. grandis* x *E. urophylla* e seleção precoce. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABTCP, 35., 2002, São Paulo, **Anais...**São Paulo: ABTCP, 2002.
- ALVES, I. C. N.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; SILVA, H. D. da. Caracterização tecnológica da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de celulose Kraft. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 1, p. 167-174, jan.-mar., 2011.
- ALZATE, S. B. A.; TOMAZELLO FILHO, M.; PIEDADE, S. M. S. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, *E. saligna* Sm. *E. grandis* x *urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 68, p. 87-95, ago. 2005.
- ANUÁRIO ESTATÍSTICO DA ABRAF 2013: ano base 2012. Brasília, DF, 2013. 145p.
- ARANGO, B.; TAMAYO, L. Densidad de la madera en clones de *Eucalyptus* por densitometría de rayos X. **Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia** N.º 45 pp. 87-99. Sep. 2008.
- ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; CARNEIRO, A. de C. O.; ALVES, E.; GUERREIRO, M. C. Longitudinal and radial variation of extractives and total lignin contents in a clone of *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Cerne**, v. 17, n. 3, p. 283–291, 2011.
- ASSIS, T. F. de; MAFIA, R. G. **Hibridação e Clonagem**. In: BORÉM, A. (Ed.). Biotecnologia Florestal. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2007. Cap. 5. p. 93-121.

- ASSIS, T. F. de; ABAD, J. I. M.; AGUIAR, A. M. Melhoramento genético do eucalipto. Silvicultura do Eucalipto no Brasil. Santa Maria - RS: Universidade Federal de Santa Maria, 2016. Cap. 7. p. 215-242.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. Guia ABTCP de Fornecedores & Fabricantes: **A indústria de celulose e papel no Brasil- 2016**. São Paulo, 2017. p. 16-28.
- BALDI, F. Il processo di produzione delle paste chimiche e il loro trattamento. In: CORSO DI TECNOLOGIA PER TECNICI CARTARI, 8., 2000, Verona. **Anais...** Verona: Scuola Grafica Cartaria, 2001. 41p.
- BALDIN, T.; MARCHIORI, J. N. C.; NISGOSKI, S.; TALGATTI, M.; DENARDI, L. Anatomia da madeira e potencial de produção de celulose e papel de quatro espécies jovens de *Eucalyptus* L'Hér. **Revista Ciência da Madeira - RCM**, v. 8, n. 2, p. 114–126, 2017.
- BARRICHELO, L.E.G. & BRITO, J.O. **A madeira das espécies de eucalipto como matéria prima para a indústria de celulose e papel**. Brasília/DF, PRODEPEF, 1976. 145p. (Série de Divulgação nº 13).
- BASSA, A. G. M. C. **Misturas de madeiras de *Eucalyptus globulus* e *Pinus taeda* para produção de celulose kraft através do Processo Lo-Solids®**. 2006. 168 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.
- BEKTAS, I.; TUTUS, A.; EROGLU, H. A study of the suitability of Calabrian Pine (*Pinus burtia*, Jen) for pulp and paper manufacture. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v. 23, n. 3, p. 589-597. 1999.
- BELINI, U. L.; TOMAZELLO FILHO, M.; CHAGAS, M. P.; & DIAS, C. T. D. S. Caracterização da estrutura anatômica, densidade básica e morfologia de cavacos da madeira de *Eucalyptus grandis* para a produção de painéis MDF. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.32, n.4, p.707-713, 2008.
- BENITES, P. K. R. M.; GOUVÊA, A. F. G.; CARVALHO, A. M. M. L.; SILVA, F. C. Caracterização Anatômica das Fibras de Oito Espécies Florestais do Cerrado de Mato Grosso do Sul para a Produção de Papel. **Revista Ciência da Madeira - RCM**, v. 6, n. 2, p. 88–93, 2015.

- BISON, O. **Melhoramento de eucalipto visando à obtenção de clones para a indústria de celulose**. 2004. 182 p. Tese (Genética e Melhoramento de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.
- BISON, O.; RAMALHO, M. A. P.; REZENDE, G. D. S. P.; AGUIAR, A. M.; RESENDE, M. D. V. de. Combining ability of elite clones of *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus urophylla* with *Eucalyptus globulus*. **Genetics and molecular biology**, v.30, n. 2, p. 417-422, 2007.
- BOLAND, D.; BROKER, M. H.; CHIPPENDALE, G. M.; HALL, N.; HYLAND, B. P. M.; JOHNSTON, R. D.; KLEINING, D. A.; MCDONALD, M. W.; TURNER, J. D. **Forest trees of Australia**. Melbourne: CSIRO, 2006. 736 p.
- BOOTLE, K. R. **Wood in Australia: types, properties and uses**. Sydney: McGraw-Hill Book, 1983, 440 p.
- BOSCHETTI, W. T. N.; PAES, J. B.; OLIVEIRA, J. T. da S.; DUDECKI, L. Características anatômicas para produção de celulose do lenho de reação de árvores inclinadas de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 6, p. 459–467, 2015.
- BOTELHO, S. A. **Princípios e métodos silviculturais**. Lavras: UFLA, 2003. 144 p.
- BOTREL, M. C. G.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; SILVA, J. R. M. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 391-398, 2007.
- BOTREL, M. C. G.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; SILVA, J. R. M. Seleção de clones de *Eucalyptus* para biomassa florestal e qualidade da madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, SP, v. 38, n. 86, p. 237-245, 2010.
- BRASIL. **Florestas plantadas: bases para a política nacional**. Brasília, DF: Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, 2014. 8 p. (Notas Técnicas SAE, 1).
- BRITT, K. W. **Handbook of pulp and paper technology**. New York: Reinhold, 1965. 537 p.
- BROWNING, B.L. **The chemistry of Wood**. New York: John Wiley & Sons, 1963. 689p.

- BUNDOCK, P. C., POTTS, B. M.; VAILLANCOURT, R. E. Detection and stability of quantitative trait loci (QTL) in *Eucalyptus globulus*. **Tree Genetics & Genomes**, v.4, p. 85-95, 2008.
- BURGER, L.M. & RICHTER, H.G. **Anatomia da madeira**. São Paulo/SP, Nobel S/A, 1991. 154p.
- CARVALHO, D. M. de; SILVA, M. R. da; COLODETTE, J. L. Efeito da qualidade da madeira no desempenho da polpação Kraft. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 3, p. 677–684, 2014.
- CARVALHO, H. G.; OLIVEIRA, R. C.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; Efeito da idade de corte da madeira e de variáveis de refino nas propriedades da celulose Kraft branqueada de eucalipto. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABTCP, 31º, São Paulo, 1998. **Anais...** São Paulo: ABTCP, p. 367-381, 1998.
- CASTELO, P. A. R. **Avaliação da qualidade da madeira de *Pinus taeda* em diferentes sítios e espaçamentos através do método não destrutivo de ondas de tensão**. 2007, 151f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
- CASTRO, C. A. de O.; RESENDE, R. T.; BHERING, L. L.; CRUZ, C. D. Brief history of *Eucalyptus* breeding in Brazil under perspective of biometric advances. **Ciencia Rural**, v. 46, n. 9, p. 1585–1593, set. 2016.
- CASTRO, P. De; ROBERTO, C.; JR, S.; CASTRO, V. R. De; CHAIX, G.; LACLAU, P.; FILHO, T. Efeito da disponibilidade hídrica e da aplicação de potássio e sódio nas características anatômicas do lenho juvenil de *Eucalyptus grandis*. *Revista Árvore*, v. 39, n. 2, p. 405–416, 2015.
- CHAGAS, M. P. **Caracterização dos anéis de crescimento e dendrocronologia de árvores de *Grevillea robusta* A. Cunn, *Hovenia dulcis* Thunb., *Persea americana* Mill., *Tabebuia pentaphylla* Hemsl. E *Terminalia catappa* L. nos municípios de Piracicaba e Paulínia, SP**. 2009. 114 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Produtos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

- CHEN, F.; EVANS, R. A robust approach for vessel identification and quantification in eucalypt pulpwoods. In: APPITA ANNUAL CONFERENCE, 2004, Canberra. **Proceedings** ... Canberra: APPITA, 2004. p.4.
- CIFLORESTAS. **Centro de Inteligência em Florestas**. Disponível em: <www.ciflorestas.com.br >Acesso em: 12/01/2017.
- COLLEY, J. Factors affecting the vessel picking tendency of hardwood pulps. **Appita**, 28(6): 392-398. 1975.
- COLODETTE, J. L.; MOKFIENSKI, A.; GOMIDE, J. L.; OLIVEIRA, R. C. Relative importance of wood density and carbohydrate content on pulping yield and product quality. **Journal of Tianjin University of Science and Technology**, Tianjin, v. 19, p-71-80, 2004. Supplement Book A.
- COSTA, J. A. **Qualidade da Madeira de *Eucalyptus urograndis*, Plantados no Distrito Federal, para Produção de Celulose Kraft**. 2011. 86 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília. Brasília, 2011.
- COSTA, V. E. **Caracterização físico-energética da madeira e produtividade de reflorestamentos de clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla***. 99p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.
- DINUS, R. J.; WELT, T. Tailoring fiber properties to paper manufacture: recent developments. **Tappi Journal**, v. 80, n. 4, p. 127-139, 1997.
- DOWNES G. M.; HUDSON I. L.; RAYMAYMAYMOND C. A.; DEAN G. H.; MICHELL A. J.; SCHIMLECK L. S.; EVANS R; MUNERI A. 1997. Sampling Plantation Eucalypts for Wood and Fibre Properties. CSIRO Publishing, Melbourne.
- DUARTE, F. A. S. **Avaliação da madeira de *Betula pendula*, *Eucalyptus globulus* e de híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* destinados à produção de polpa celulósica Kraft**. 2007. 107 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

- FARIA, M. C. G. de. **Potencial madeireiro de 22 espécies arbóreas do Cerrado: caracterização anatômica, física e energética**. 2016. 103p. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Vegetal)- Universidade Federal de Goiás, Goiânia-GO, 2016.
- FEBRUARY, E.C.; Stock, W.D.; Bond, W.J.; Roux, D.J. Relationship between water availability and selected vessels characteristics in *Eucalyptus grandis* and two hybrids. **IAWA Journal**, 16(3):269-276. 1995.
- FERNANDES, D. E.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; FERREIRA, M. Z. Influência da produtividade de clones híbridos de eucalipto na densidade da madeira e na polpação Kraft. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 39, n. 90, p. 143–150, 2011.
- FERREIRA, C. R.; FANTINI JUNIOR, M.; COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L.; CARVALHO, A. M. M. L. Technological assessment of *Eucalyptus* wood clones : part 1 - wood quality for kraft pulp production. **Scientia Forestalis**, v. 70, p. 161–170, 2006.
- FLORES, T. B.; ALVARES, C. A.; SOUZA, V. C.; STAPE, J. L. ***Eucalyptus* no Brasil: zoneamento climático e guia para identificação**. IPEF, Piracicaba-SP, 2016, 447 p.
- FLORSHEIN, S. M. B. **Variações da estrutura anatômica e densidade básica da madeira de árvore de aroeira *Myracrodruon urundeuva* F.F. & M. F. Alemão (ANACARDIACEAE)**. 1992. 252 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1992.
- FOELKEL, C.E.B.; BARRICHELLO, L.E.G. Avaliação das madeiras para produção de celulose através de suas características estruturais: uma referência especial para o gênero *Eucalyptus*. IN: SEMINÁRIO DE INTEGRAÇÃO FLORESTA-INDÚSTRIA, 1975, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba:IPEF, 1975. 180p. p.5-33.
- FOELKEL, C. E. B. Madeira de eucalipto: da floresta ao digestor. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 11, São Paulo, 1978. Boletim Informativo do Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, v. 6, n. 20, p. E1-E25, 1978.

- FOELKEL, C. E. B.; MORA, E.; MEMOCHELLI, S. Densidade básica: sua verdadeira utilidade como índice de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6., 1990, Campos do Jordão. **Anais...** Campos do Jordão, SP: Sociedade Brasileira de Silvicultura, p. 719-728, 1990.
- FOELKEL, C. E. B. As fibras dos eucaliptos e as qualidades requeridas na celulose Kraft para a fabricação de papel. In: Eucalyptus Online Book & Newsletter, 2007. 48 p.
- FOELKEL, C. E. Individualização das Fibras da Madeira do Eucalipto para a Produção de Celulose Kraft. **Eucalyptus Online Book & Newsletter**, 2009. Disponível em: <
http://www.eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT16_IndividualizacaoFibras.pdf>. Acesso em: 12 mai. 2017.
- FONSECA, S. M. da; RESENDE, M. D. V. de; ALFENAS, A. C.; GUIMARÃES, L. M. da S.; ASSIS, T. F.; GRATTAPAGLIA, D. Manual Prático de Melhoramento Genético do Eucalipto. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010, 200 p.
- FRANCO, M. P. **Efeito da substituição do potássio pelo sódio em árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, visando a expansão das plantações florestais sob condições de estresse hídrico.** 2014. 200p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”- Universidade Federal de Goiás, Piracicaba- SP, 2014.
- GÉRARD, J.; BAILLÈRES, H.; FOURNIER, M.; THIBAUT, B. Qualité du bois chez les *Eucalyptus* de plantation: étude de variation de tris propriétés de référence. **Bois et Forêts des Tropiques**, Nogent-sur-Marne, n. 245, p. 101-111, 1995.
- GOIÁS. Secretaria de Estado de Gestão e Planejamento- Goiás em dados 2015. Instituto Mauro Borges de Estatísticas e Estudos Socioeconômicos, 2016, 105p. Disponível em: < <http://www.imb.go.gov.br/>>. Acesso em: 28 mar. 2017.

- GOIÁS. Governo do Estado. **Macrozoneamento, agroecológico e econômico do Estado de Goiás: um novo olhar sobre o território goiano**. Goiânia, 2014a. Disponível em: < http://www.sieg.go.gov.br/RGG/MacroZAEE/Relat%C3%B3rio_-_PRODUTO_V_-_TERMO_DE_REFER%C3%8ANCIA_DO_ZONEAMENTO_AGROECOL%C3%93GICO_E_EC%C3%94NOMICO_DO_ESTADO_DE_GOI%C3%81S.pdf >. Acesso em: 07 dez. 2017.
- GOIÁS. Governo do Estado. **Governo lança Programa Goiás Florestal Competitivo**. 2014b. Disponível em: <<http://www.segplan.go.gov.br/post/ver/179750/governo-lanca-programa-goias-florestal-competitivo>>. Acesso em: 10 mar. 2017.
- 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.
- GOMIDE, J. L. Reação dos carboidratos e dissolução dos constituintes da madeira durante polpação alcalina. **O Papel**, São Paulo, v. 40, n.11, p-119-128, nov. 1979.
- GOMIDE, J. L. Antraquinona – Um eficiente aditivo para polpação alcalina de madeiras. Viçosa, 1980. 27 p. (Boletim Técnico, 6).
- GOMIDE, J. L.; FANTUZZI NETO, H.; LEITE, H. G. Estratégia de análise da qualidade de madeira de *Eucalyptus* sp. para produção de celulose. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 28, n. 3, p. 443-450, 2004.
- GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; CHAVES DE OLIVEIRA, R.; SILVA, C. M. Technological characterization of the new generation of *Eucalyptus* clones in Brazil for kraft pulp production. **Revista Árvore**, v. 29, n. 1, p. 129–137, 2005.
- GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L. Qualidade da madeira. In: BOREM, A. (Ed.) **Biotecnologia florestal**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2007. p.25-54.

- GOMIDE, J. L.; FANTUZZI NETO, H.; REGAZZI, A. J. Análise de Critérios de qualidade da madeira de eucalipto para produção de Celulose Kraft. **Revista Árvore**, v. 34, n. 2, p. 339–344, 2010.
- GONÇALEZ, J. C.; DOS SANTOS, G. L.; DA SILVA JUNIOR, F. G.; MARTINS, I. S.; COSTA, J. D. A. Relações entre dimensões de fibras e de densidade da madeira ao longo do tronco de *Eucalyptus urograndis*. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 42, n. 101, p. 81–89, 2014.
- GOUVÊA, A. de F. G.; TRUGILO, P. F.; COLODETTE, J. L.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M. da; GOMIDE, J. L. Avaliação da madeira e da polpação kraft em clones de eucaliptos. **Revista Árvore**, v. 33, n. 6, p. 1175–1185, 2009.
- GUIA TÉCNICO DE REFERÊNCIA: anuário do setor madeireiro: 2014. Curitiba: Jota, 2014, ano 16, n. 147. 90 p.
- HIGA, A. R.; HIGA, R. C. V. **Indicação de espécies para reflorestamento**. In: GALVÃO, A. P. M. (Ed.). Reflorestamento de propriedades rurais para fins produtivos e ambientais: um guia para ações municipais e regionais. Brasília, DF: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 2000. p. 101-124.
- HILLIS, W. E. Properties of Eucalypt woods of importance to the pulp and paper industry. **Appita Journal**, Melbourne, v. 26, n. 2, p. 113–121, 1972.
- HSING, T. Y.; DE PAULA, N. F.; DE PAULA, R. C. Características dendrométricas, químicas e densidade básica da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Ciencia Florestal**, v. 26, n. 1, p. 273–283, 2016.
- HONGYU, K; SANDANIELO, V. L. K.; OLIVEIRA JUNIOR, G. J. de. Principal Component Analysis: theory, interpretations and applications. *Engineering and Science*, v. 1, ed. 5, p. 83–90, 2015.
- IBGE. Produção da extração vegetal e da silvicultura 2015. Rio de Janeiro, v. 27. Disponível em: [http://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Producao_da_Extracao_Vegetal_e_da_Silvicultura_\[anual\]/2015/pevs2013.pdf](http://ftp.ibge.gov.br/Producao_Agricola/Producao_da_Extracao_Vegetal_e_da_Silvicultura_[anual]/2015/pevs2013.pdf) >. Acesso em: 22 mar. 2017.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório IBÁ 2015**. São Paulo, 2015. 80p.

- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório IBÁ 2016**. São Paulo, 2016. 100p.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório IBÁ 2017**. São Paulo, 2017. 80p.
- JORNAL BRASILEIRO DE INDÚSTRIAS DA BIOMASSA. Biomassa florestal no Estado de Goiás. Edição 13º: p. 10-14, 2015.
- KAMELI, A.;LOSEL, D. M. Contribution of carbohydrates and other solutes to osmotic adjustment in wheat leaves under water. **Journals of plant Physiology**, Stuttgart, v.145,n. 3,p.363-366,1995.
- KHRISTOVA, P.; KORDSACHIA, O.; PATT, R., DAFAALLA, S.; Alkaline pulping of some *Eucalypts* from Sudan. **Bioresour. Technol.** v.97, n. 4, p. 535–544. 2006.
- KNAPIC, S.; PIRALHO, M.; LOUZADA, J. L.; PEREIRA, H. Early assessment of density features for 19 *Eucalyptus* species using X-ray microdensitometry in a perspective of potential biomass production. *Wood Science and Technology*, Berlin, v. 48, p. 37–49, 2014.
- KOGA, M.E.T. Matérias-primas fibrosas. In: PHILIPP, P. & D'ALMEIDA, M.L.O. Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica. IPT, São Paulo, 2ª ed., 1988. p. 15-44.
- KOLLMANN, F. F. P.;CÔTÉ JR, W. A. Principles of wood science and technology. I. Solid Wood. New York: Springer,1968.
- LANDBERG, J.; SANDS, P. **Physiological ecology of forest production: principles, process and models**. 4th ed. San Diego: Academic Press, 2012. 352 p.
- LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. 4 ed. São Carlos: RiMa, 2006, 531p.
- LATORRACA, J. V.; ALBUQUERQUE, C. E. C. Efeito de rápido crescimento sobre as propriedades da madeira. **Revista Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 7, n.1, p. 279-291, 2000.
- LAUSBERG, M.J.F.; GILCHRIST, K.F.; SKIPWITH, J.H. Wood properties of *Eucalyptus nitens* grown in New Zealand. **New Zealand Journal of Forestry Science**, 25(2); 147-163, 1995.

- LEAL, S.; PEREIRA, H.; GRABNER, M.; WIMMER, R. Clonal and site variation of vessels in 7 yer old *Eucalyptus globulus*. **IAWA Journal**, Leiden, v. 24, n. 2, p. 185-195, 2004.
- LOBÃO, M. S.; CHAGAS, M. P.; COSTA, D. S. P.; FERREIRA, A. T. B.; SETTE JUNIOR, C. R.; CARVALHO, I. L.; TOMAZELLO FILHO, M. Agrupamento de espécies florestais pela similaridade das características físico-anatômicas e usos da madeira. **Cerne**, v. 16, suplemento, p.97-105, 2010.
- LOPES, C. S. D. **Caracterização da madeira de três espécies de eucalipto para uso em movelaria**. 2007. 88p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais)- Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”- Universidade de São Paulo, Piracicaba- SP, 2007.
- LOPES, O. R. **Influência dos extrativos e da relação cerne/alburno nas análises da madeira por espectroscopia de infravermelho próximo para produção de celulose**. 2008. 86 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.
- MACIEL, K. de J. S. **Análise da diversidade e divergência em clones de Eucalyptus spp . potencialmente importantes para Goiás**. 2014. Mestrado (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.
- MAGATON, A. da S.; COLODETTE, J. L.; GOUVÊA, A. de F. G.; GOMIDE, J. L.; MUGUET, M. C. D. S.; PEDRAZZI, C. Eucalyptus Wood Quality and its Impact on Kraft Pulp Production and Use. **Tappi Journal**, v. 8, p. 32–39, 2009.
- MALLAN, F.A. *Eucalyptus* improvement for lumber production. In: SEMINARIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, São Paulo, IPEF/IPT, **Anais ...**, São Paulo, IPEF/IPT, 05-06, p.1-19. abr. 1995.
- MARQUES JÚNIOR, O. G. **Estimativas dos parâmetros genéticos e fenotípicos e avaliação da eficiência da seleção precoce em *Eucalyptus cloeziana* F. Muell.** 1995. 69 p. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1995.

- MASSARO, R. A. M.; BONINE, C. A. V.; SCARPINAT, E. A.; de PAULA, R. C. Viabilidade de aplicação da seleção precoce em testes clonais de *Eucalyptus* spp. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 4, p. 597-609, 2010.
- MENESES, V. A.; TRUGILHO, P. F.; CALEGARIO, N.; HELIO, E.; LEITE, G. Efeito da idade e do sítio na densidade básica e produção de massa seca de madeira em um clone do *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 105, p. 101–116, 2015.
- MIMMS, A.; KOCUREK, M. J.; PYATTE, J. A.; WRIGHT, E. E. Kraft Pulping- A compilation o Notes. Atlanta: Tappi Press, USA, 1990. 181 p.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Florestas. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/florestas>>. Acesso em: 7 mar. 2015.
- MOFKIENSKI, A. **Importância relativa da densidade básica e da constituição química de madeira de *Eucalyptus* spp no rendimento, branqueabilidade e qualidade da polpa Kraft**. 2004. 136 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.
- MOGOLLÓN, G.; AGUILERA, A. **Guia teórica y práctica de morfología de la fibra**. Mérida: Universidad de Los Andes, 2002. 48p.
- MORA, A.L.; GARCIA, C.H. *Eucalypt* cultivation in Brazil. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2000. 112p
- MORA, F.; SERRA, N. Bayesian estimation of genetic parameters for growth, stem straightness, and survival in *Eucalyptus globulus* on an Andean Foothill site. **Tree Genetics & Genomes**, v. 10, p. 711-719, 2014.
- MORAIS, P. H. D. de; LONGE JÚNIOR, D.; COLODETTE, J. L.; MORAIS, E. H. da C.; JARDIM, C. M. Influência da idade de corte de clones de *Eucalyptus grandis* e híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* na composição química da madeira e polpação kraft. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 1, p. 237- 248, jan-mar. 2017.
- MORALES, M. M.; NICOLI, C. M. L.; MORAES, A. da. C.; COAN, R. M.; PACHECO, A. R.; TONINI, H. **Caracterização do setor florestal goiano**. Colombo- PR: Embrapa Florestas. 2012. 51 p.

- MOTTA, J. P.; OLIVEIRA, J. T. da Si.; BRAZ, R. L.; DUARTE, A. P. C.; ALVES, R. C. Caracterização da madeira de quatro espécies florestais. **Ciência Florestal**, v. 44, n. 12, p. 2186–2192, 2014.
- MUNOZ, A. M.; CIVILLE, G. V.; CARR, B. T. **Sensory evaluation in quality control**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 240 p
- NAHUZ, M. A. R. (1974). **Some aspects of the introduction of lesser known brazilian species to the european timber market**. Department of Forestry and Wood Science University College of North Wales, Bangor. 243p.
- 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**, v. 31, n. 68, p. 319–330, 2011.
- NICHOLLS, J.W.P.; Griffin, A.R. Variation in wood characteristics in field trial of *Eucalyptus obliqua*, *E. regans* and some intermediate forms. **Australian Forestry Research**, 8:93-102. 1978.
- NICHOLLS, J.W.P.; Matheson, A.C. Variation in wood characteristics in thinning from field trial of *Eucalyptus obliqua*. **Australian Forestry Research**, 10:239-247. 1980.
- NOVAES, E.; COUTINHO M. M.; PORTO, R. M.; CAMPOS, A. S.; CARVALHO, C. A.; MORAES, L. F.; ZAUZA, E. A. V.; SIQUEIRA, L.; COELHO, A. S. G.; CHAVES, L. J.; ALFENAS A. C. Implantação de uma Rede de Testes Clonais para Expansão da Eucaliptocultura em Goiás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MELHORAMENTO DE PLANTAS, 7., 2013, Uberlândia. Variedade melhorada: a força da nossa agricultura: anais. Viçosa, MG: SBMP, 2013. v. 9. 391 p.
- ODA, S. Estratégia na utilização de novas tecnologias no melhoramento genético do eucalipto. **Anais**. VII Workshop em Melhoramento Florestal (04-06 nov.). Piracicaba- SP, 2014.

- OLIVEIRA, B. R. U.; LATORRACA, J. V. F.; TOMAZELLO FILHO, M.; PALERMO, G. P. M.; CARVALHO, A. M. de; PASTRO, M. S. Microdensitometria de raios X aplicada na determinação da variação da densidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* E. Hill. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.40, n. 93, p. 103-112, mar. 2012.
- OLIVEIRA, J. G. L. de; OLIVEIRA, J. T. da S.; ABAD, J. I. M.; SILVA, A. G. da; FIEDLER, N. C.; VIDAURE, G. B. Parâmetros quantitativos da anatomia da madeira de eucalipto que cresceu em diferentes locais. **Revista Árvore**, v. 36, n. 3, p. 559–567, 2012.
- OLIVEIRA, J. T. da S. **Caracterização da madeira de eucalipto para construção civil**. 1997. 429p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- OLIVEIRA, J. T. da S.; HELLMEISTER, J. C.; SIMÕES, J. W.; FILHO, M. T. Caracterização da madeira de sete espécies de eucaliptos para a construção civil: 1 - Avaliações dendrométricas das árvores. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, n. 56, p. 113–124, 1999.
- PALUDZYSZYN FILHO, E.; SANTOS, P. E. T. **Programa de melhoramento genético de eucalipto da Embrapa Florestas: resultados e perspectivas**. Curitiba: Embrapa Florestas. 2011. 66p. (Embrapa Florestas. Documentos, 214).
- PALUDZYSZYN FILHO, E.; FARDIN, A. E.; SANTOS, A. L.; REIS, C. A. F.; SANTOS, P. E. T. dos; MACHADO, A. M.; COIMBRA, G. R. **Base genética de melhoramento de eucaliptos e corimbias no norte do Estado de Goiás: resultados da cooperação técnica entre a Embrapa Florestas e a Anglo American Níquel Brasil - Codemin**. Colombo: Embrapa Florestas, 2013. 50p.
- PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 3 ed. New York: McGraw-Hill, 1970, 735 p.
- PARHAM, R.A. Trees and their Production of Wood. In Pulp and Paper Manufacture: Properties of Fibrous Raw Materials and their Preparation for Pulping, Kocurek, M.J., Stevens, C.F.B. (eds.). **Joint Textbook Committee of the Paper Industry**, New York, v. 1, p. 10-21, 1983.

- PAULA, J. E. Caracterização anatômica de madeiras nativas do Cerrado com vistas à produção de energia. **Cerne**, Lavras, v. 5, n. 2, p. 26-40, 1999.
- PEREIRA, A. B.; MARQUES JÚNIOR, O. G.; RAMALHO, M. A. P.; ALTHOFT, P. Eficiência da seleção precoce em famílias de meios-irmãos de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh., avaliadas na região noroeste do estado de Minas Gerais. **Cerne**, Lavras, v. 3, n. 1, p. 67-81, 1997.
- PERISSOTO, D. O. **Estudo comparativo das propriedades químicas de polpas Kraft convencionais e MCC de eucalipto**. 2005. 129 p. Tese (Doutorado em Química)- Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- PETTERSEN, R.C. The chemical composition of wood. In: ROWELL, R. (ed). The chemistry of solid wood. Washington, American Chemical Society, 1984. p. 54-126.
- PILLAI, P. K. C.; PANDALAI, R. C.; DHAMODARAN, T. K.; SANKARAN, K. V. Effect of silvicultural practices on fibre properties of Eucalyptus wood from short-rotation plantations. **New Forests**, v. 44, n. 4, p. 521–532, 2013.
- PIRRALHO, M.; FLORES, D.; SOUSA, V. B.; QUILHÓ, T.; KNAPIC, S.; PEREIRA, H. Evaluation on paper making potential of nine Eucalyptus species based on wood anatomical features. **Industrial Crops and Products**, v. 54, p. 327–334, 2014.
- POLGE, H. Fifteen years wood radiation densitometry. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 12, p. 187-196, 1978.
- PORTO, R. M.; COUTINHO M. M.; CAMPOS, A. S.; CARVALHO, C. A.; MORAES, L. F.; ZAUZA, E. A. V.; SIQUEIRA, L.; COELHO, A. S. G.; ALFENAS A. C.; NOVAES, E. Avaliação inicial de uma rede de testes clonais de *Eucalyptus* implantados em Goiás. In: CONGRESSO FLORESTAL NO CERRADO, 1., 2013, Goiânia. **Anais...** Goiânia: Win Eventos, 2013. v. 9. 105 p.
- PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; NEVES, T. A.; VIEIRA, C. M. M. Análise de correlação canônica entre características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, SP, v. 40, n. 95, p. 317-326, 2012.
- PROTÁSIO, T. P.; NEVES, T. A.; DOS REIS, A. A.; TRUGILHO, P. F. Effect of age and clone on the quality of *Eucalyptus* spp. wood aiming bioenergy production . **Ciencia Florestal**, v. 24, n. 2, p. 465–477, 2014a.

- PROTÁSIO, T. D. P.; GOULART, S. L.; NEVES, T. A.; DE ASSIS, M. R.; TRUGILHO, P. F. Clones comerciais de *Eucalyptus* de diferentes idades para o uso bioenergético da madeira. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 42, n. 101, p. 113–127, 2014b.
- QUEIROZ, S. C. S.; GOMIDE J. L. Efeito das características anatômicas e químicas na densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **O Papel**, São Paulo, v. 64, n. 5, p. 79-84, 2003.
- QUEIROZ, S. C. S.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C. de. Influência da densidade básica da madeira na qualidade da polpa kraft de clones híbridos de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden X *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Revista Árvore**, v. 28, n. 6, p. 901–909, 2004.
- QUILHÓ, T.; MIRANDA, I.; PEREIRA, H. Within-tree variation in wood fibre biometry and basic density of the urograndis eucalypt hybrid (*Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*). **IAWA Journal**, Leiden, v. 27, n. 3, p. 243-254, 2006.
- RAMOS, L. M. A.; LATORRACA, J. V. de F.; PASTRO, M. S.; SOUZA, M. T. de; GARCIA, R. A.; CARVALHO, A. M. de. Variação radial dos caracteres anatômicos da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill Ex Maiden e idade de transição entre lenho juvenil e adulto. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 92, p. 411–418, 2011.
- RAYMOND, C. A.; MUNERI, A. Nondestructive sampling of *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* for wood properties. I. Basic density. **Wood Science and Technology**, New York, v. 35, n. 1-2, p. 27-39, abr. 2001.
- REIS, C. F.; MORAES, A. da C.; PEREIRA, A. V.; AGUIAR, A. V. de; SOUSA, V. A. de; BORGES, H. M. D. **Diagnóstico do setor de florestas Plantadas no Estado de Goiás**. Brasília- DF: Embrapa Florestas, 2015. 140p.
- REIS, C. F.; TALONE NETO, A.; BRUNCKHORST, A.; MOREIRA, J. M. M. A. P.; PEREIRA, A. V.; MORAES, A. da C. **Cenário do Setor de Florestas Plantadas no Estado de Goiás**. Colombo-PR: Embrapa Florestas, 2017. 80 p.
- RESENDE, M. D. V.; ASSIS, T. F. **Genética e melhoramento do eucalipto**. Colombo: Embrapa Florestas, 2009.

- RIBEIRO, F. D. A.; FILHO, J. Z. Variação da densidade básica da madeira em espécies / procedência de *Eucalyptus* spp. **Ipef**, n. 46, p. 76–85, 1993.
- RIBEIRO, C. V. G. **Desempenho silvicultural de clones de *Eucalyptus* spp. no Estado de Goiás**. 57p. Monografia. Escola de Agronomia da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.
- ROCHA, F. T.; FLORSHEIM, S. M. B.; COUTO, H. T. Z. Variação das dimensões dos elementos anatômicos da madeira de árvores de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden aos sete anos. **Revista Instituto Florestal**, São Paulo, v. 16, n.1, p. 43-55. Jun. 2004.
- ROCHA, S. S. **Sustentabilidade no setor brasileiro de papel e celulose: uma análise comparativa entre empresas nacionais e transnacionais**. 133 p. Dissertação (Mestrado em Economia) – Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2006.
- RODRIGUES, A. C. C. **Morfologia de vasos e fibras da madeira de poliplóide e clones de híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* visando a produção de papel**. 35p. Monografia. Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2016.
- ROWELL, R. M. (Ed.). Handbook of wood chemistry and wood composites. Boca Raton: CRC Press, 2005, 487 p.
- SAIKIA, S. N.; GOSWAMI, T.; ALI, F. Evaluation of pulp and paper making characteristics of certain fast growing plants. **Wood Science and Technology**, v. 31, p. 467–475, 1997.
- SANSÍGOLO, C. A.; RAMOS, É. da S. Quality of wood and pulp from a clone of *Eucalyptus grandis* planted at three locations. **Cerne**, v. 17, n. 1, p. 47–60, 2011.
- SANTAROSA, E.; PENTEADO JUNIOR, J. F.; GOULART, I. C. G. dos R. (Ed.). **Cultivo do eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda**. Brasília-DF: Embrapa Florestas, 2014. 140p.
- SANTOS, G. A.; RESENDE, M. D. V.; SILVA, L. D.; HIGA, A.; ASSIS, T. F. Adaptabilidade de híbridos multiespécies de *Eucalyptus* ao Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Árvore**, v. 37, n. 4, p. 759–769, 2013.

- SANTOS, R. F. dos. **Estudo de parâmetros físicos e anatômicos da madeira de *Eucalyptus* spp, aos 48 meses, provenientes de um teste clonal no município de Luziânia, GO.** 57p. Monografia. Escola de Agronomia da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.
- SANTOS, S. R. dos. **Influência da qualidade da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e do processo Kraft de polpação na qualidade da polpa branqueada.** 2005. 178f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.
- SANTOS, S. R. dos; SANSÍGOLO, C. A. Influência da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* na qualidade da polpa branqueada. **Ciência Florestal**, v. 17, n. 1, p. 53–63, 2007.
- SCHMIT, R., MORA, F., EMHART, V. I.; RUBILAR, R. Longitudinal analysis in the selection of *Eucalyptus globulus* clones under contrasting water availability conditions. **Scientia Forestalis**, v.43, n. 105, p. 217-224, 2015.
- SEGURA, T. E. S. **Avaliação das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana* e seus híbridos visando à produção de celulose kraft branqueada.** 199 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.
- SETTE JR., C. R. **Efeito da aplicação do lodo de esgoto e de fertilização mineral no crescimento e propriedades da madeira de árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex. Maiden.** 2007. 153 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Produtos) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.
- SETTE JR., C. R.; TOMAZELLO FILHO, M.; DIAS, C. T. S.; CHAGAS, M. P.; LACLAU, J. P. Efeito da aplicação de potássio e sódio nas características do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* E. Hill aos 24 meses de idade. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 3, p. 535-546, jul./set. 2009.
- SETTE JR.; C. R.; TOMAZELLO FILHO, M.; DIAS, C. T. S.; LACLAU, J. P. Crescimento em diâmetro do tronco das árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e relação com as variáveis climáticas e fertilização mineral. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 43, n. 6, p. 979-990, 2010.

- SETTE JR., C. R.; OLIVERIA, I. R. de; TOMAZELLO FILHO, M.; YAMAJI, F. M.; LACLAU, J. P. Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, vol. 36, n. 6, p. 1183-1190, 2012.
- SHARMA, S. K.; SHUKLA, S. R.; SHASHIKALA, S.; POORNIMA, V. Axial variations in anatomical properties and basic density of *Eucalypt urograndis* hybrid (*Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*) clones. **J. For. Res**, 26(3): p. 739–744. May. 2015.
- SHIMOYAMA, V. R. S. **Variações da densidade básica e características anatômicas e químicas da madeira em *Eucalyptus spp.*** 1990. 93 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Madeira) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.
- SILVA, J. C. Espécies de eucalipto. **Revista da Madeira** (Edição especial), p. 17-22, 2001. In: Eucalipto – A madeira do futuro.
- SILVA, J. C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* hill ex. maiden, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira.** 2002. 181 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.
- SILVA, J.C.; Oliveira, J.T.S.; Tomazello Filho, M.; Keinert Jr.; S.; Matos, J.L.M. Influência da idade e da posição radial na massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Floresta**, v. 34, n. 1, p. 13-22, 2004.
- SILVA, J. R. M. D., MUÑIZ, G. I. B. D., LIMA, J. T., & BONDUELLE, A. F. Influência da morfologia das fibras na usinabilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.29, n.3, p.479-487, 2005.
- SILVA, J. C.; TOMAZELLO FILHO, M.; OLIVEIRA, J. T. S.; CASTRO, V. R. de. Influência da idade e da posição radial nas dimensões das fibras e dos vasos de madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1081-1090, 2007.

- SILVA JR. F. G. & BARRICHELO. L. E. G. Conversion of the kraft process in soda-DDA (disodium salt of 1.4-dihydro-9.10-dihydroxy anthracene) for Eucalyptus. In: PROCEEDINGS OF THE 1995 PULPING CONFERENCE. Vol. 2. 757-762. Chicago. 1995.
- SILVA JR, F. G. da; MCDONOUGH, T. J. Polpação Lo- Solids® de Eucalipto: Efeito do Ritmo de Produção. Conference paper. Oct. 2001.
- SILVA JR., F.G.; McDONOUGH, T.J. Polpação Lo-solids ® de eucalipto: efeito do ritmo de produção. O Papel, São Paulo, v.63, n.1, p.69-81, 2002.
- SILVA, M. G. da. **Produtividade, idade e qualidade da madeira de *Eucalyptus* destinada à produção de polpa celulósica branqueada**. 2011. 95 p. Dissertação (Mestrado em em Tecnologia de Produtos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.
- SILVÉRIO, F. O.; BARBOSA, L. C. A.; MALTHA, C. R. A.; FIDÊNCIO, P. H.; CRUZ, M. P.; VELOSO, D. P.; MILANEZ, A. F: Effect of storage time on the composition and content of wood extractives in Eucalyptus cultivated in Brazil. **Bioresource Technology**, v. 11, p- 78-86, set. 2007.
- SMOOK, G. A. **Handbook for pulp & paper technologists**. 3 ed.Vancouver: Angus Wilde Publication, 2002. 425 p.
- SOARES, N. S.; OLIVEIRA, R. J. de; CARVALHO, K. H. A. de; SILVA, M. L. da; JACOVINE, L. A. G.; VALVERDE, S. R. A cadeia produtiva da celulose e do papel no Brasil. **Floresta**, Curitiba-PR, v. 40, n. 1, p. 1-22, jan-mar. 2010.
- SOUZA, A.P.; DELLA LUCIA, R.M.; RESENDE, G.C. Estudo da densidade básica da madeira de *Eucalyptus microcorys* F. Muell, cultivado na região de Dionísio, MG. **Revista Árvore**, v.1, p. 16-27, 1979.
- SOUZA, M. T.; LIMA, J.T.; SOARES, B.C. D.; GOULART, S. L.; LIMA, L. C. Delimitação estatística dos lenhos juvenil e adulto de *Eucalyptus* e *Corymbia*. **Scientia Forestalis**, v.45, n. 116, p. 611-618, 2017.
- STOCKAN, L.G. General properties of short fibred materials and their influence on pulping. In: UNESCO/FAO REGIONAL SYMPOSIUM ON PULP RESEARCH

- AND TECHNOLOGY IN THE MIDDLE EAST AND NORTH AFRICA, 1970, Cairo. **Proceedings** ... Cairo: FAO, 1970. p. 31-37.
- TAMOLANG, F. N.; WANGAARD, F. F. Relationships between hardwood fiber characteristics and pulpsheet properties. **Tappi Journal**, v.44, n.3, p.201-216, 1961.
- TOLFO, A. L. T.; DE PAULA, R. C.; BONINE, C. A. V.; BASSA, A.; DO VALLE, C. F. Parâmetros genéticos para caracteres de crescimento, de produção e tecnológicos da madeira em clones de *Eucalyptus* spp. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, n. 67, p. 101–110, 2005.
- TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica de *Eucalyptus saligna* e *E. grandis*. **IPEF**, Piracicaba- SP, v. 29, p- 37-45, 1985a.
- TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus gummifera*, *E. microcorys* e *E. pilularis*. **Revista IPEF**, 30:45-53. 1985b.
- TOMAZELLO FILHO, M. Estrutura anatômica da madeira de oito espécies de eucalipto no Brasil. **Revista IPEF**, 29:25-36. 1985c.
- TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica do *Eucalyptus globulus*, *E. pellita* e *E. acmenioides*. **Revista IPEF**, Piracicaba- SP, n. 36, p- 35-42, 1987.
- TOMAZELLO FILHO, M.; SCHWEINGRUBER, F.; SCHAR, E. Wood anatomical and X ray densitometric analysis of *Eucalyptus grandis* and *E. saligna*. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TREE ANATOMY AND WOOD FORMATION, 1995, Tiajin. **Proceedings** ... Tianjin: IUFRO, 1995. p. 46.
- TOMAZELLO FILHO, M. Formação e anatomia da madeira- exercícios práticos. Apostila de apoio à disciplina Formação e Anatomia da Madeira. ESALQ-USP, Piracicaba, 2002. 76 p.
- TOMAZELLO FILHO, M.; PIEDADE, S. M. S. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, *E. saligna* Sm e *E. grandis* x *urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 68, p. 87-95, ago. 2005.

- TOMAZELLO FILHO, M. Efeito da irrigação e fertilização nas propriedades do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* x *urophylla*. 2006. 135 p. Tese (Livre-Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.
- TOMAZELLO FILHO, M.; BRAZOLIN, S.; CHAGAS, M.P.; OLIVEIRA, J.T.S.; BALLARIM, A.W.; BENJAMIN, C.A. Application of X-ray technique in nondestructive evaluation of Eucalypt Wood. **Maderas: Ciência y Tecnología**, v.10, n.2, p.139-149, 2008.
- TREVISAN, R.; DENARDI, L.; HASELEIN, C. R.; GATTO, D. A. Efeito do desbaste e variação longitudinal da massa específica básica da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 393-399, set. 2012.
- TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Lavras, v. 2, n. 1, p. 94-111, 1996.
- TRUGILHO, P.F.; VITAL, B. R.; REGAZZI, A.J.; GOMIDE, J. L. Aplicação da análise de correlação canônica na identificação de índices de qualidade da madeira de eucalipto para a produção de carvão vegetal. **Revista Árvore**, Viçosa, v.21, n.2, p.259-267, 1997.
- TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; LINO, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 104-114, 2001.
- TRUGILHO, P. F.; BIANCHI, M. L.; ROSADO, S. C. da S.; LIMA, J. T. Qualidade da madeira de clones de espécies e híbridos naturais de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, n. 73, p. 55-62, março 2007.
- TRUGILHO, P.F. Densidade básica e estimativa de massa seca e lignina na madeira em espécies de *Eucalyptus*. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.33, n.5, p.1228-1239, 2009.
- TRUGILHO, P. F.; DONÁRIA, M.; ARANTES, C.; PÁDUA, F. A. De; ALMADO, R. D. P.; ELISA, A.; BALIZA, R. Estimate of fixed carbon in the wood of a hybrid clone of *Eucalyptus urophylla* and *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, v. 16, p. 33–40, 2010.

- TRUGILHO, P.F. Caracterização tecnológica da madeira de diferentes materiais genéticos de eucalipto. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA (EBRAMEM), 13p. 2012, Vitória-ES. **Anais...** Vitória: EBRAMEM, 2012.
- TRUGILHO, P. F.; GOULART, S. L.; ASSIS, C. O. de; COUTO, F. B. S.; ALVES, I. C. N.; PROTÁSIO, T. de P.; NAPOLI, A. Características de crescimento, composição química, física e estimativa de massa seca de madeira em clones e espécies de *Eucalyptus* jovens. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 45, n. 4, p. 661-666, abr, 2015.
- URBINATI, C. V. **Variação estrutural no lenho de *Terminalia ivorensis* A. Chev. - Combretaceae**. 1998. 70 p. Dissertação (Mestrado em Botânica) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.
- VALE, A. B. do; MACHADO, C. C.; PIRES, J. M. M.; VILAR, M. B.; COSTA, C. B.; NACIF, A. de P. (Ed.). **Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência**. Viçosa- MG: Embrapa Florestas, 2014, p. 17-35.
- VALENTE, C. A.; SOUZA, A. P. M. de; FURTADO, F. P.; CARVALHO, A. P. de. Improvement program for *Eucalyptus globulus* at Portucel: Technological componente. **Appita** v. 45, n. 6, p 403- 407, 1992.
- VEENIN, T.; FUJITA, M.; NOBUCHI, T.; SIRIPATANADILOK, S. Radial variation of anatomical characteristics and specific gravity in *Eucalyptus camaldulensis* clones. **IAWA Journal**, Leiden, v. 26, n. 3, p. 356-361, 2005.
- VITAL, B.R.; ALMEIDA, J. de; VALENTE, O.F.; PIRES, I.E. Características de crescimento das árvores e de qualidade da madeira de *Eucalyptus camaldulensis* para a produção de carvão vegetal. **IPEF**, Piracicaba, v. 47, p. 22-28, 1994.
- VIVIAN, M. A. **Aumento da eficiência do processo Kraft de polpação a partir de pré-tratamento de cavacos de madeira de eucalipto**. 126 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.
- XAVIER, A.; SILVA, R. L. da. Evolução da silvicultura clonal de *Eucalyptus* no Brasil. **Agronomia Costarricense**, v. 34, n. 1, p. 93–98, 2010.

- WIMMER, R. High-resolution analysis of radial growth and wood density in *Eucalyptus nitens*, grown under different irrigation regimes. **Annales Forest Sciences**, 59:519-524. 2002.
- YI-QUING, W.; KAZUO, H.; YUAN, L.; YINGCHUN, C.; MASATOSHI, S. Relationships of anatomical characteristics versus shrinkage and collapse properties in plantation-grown eucalypt wood from China. **Journal of Wood Science**, Madison, v. 52, n. 3, p. 187-194, 2006.
- ZANUNCIO, A. J. V.; COLODETTE, J. L.; GOMES, F. J. B.; CARNEIRO, A. de C. O.; VITAL, B. R. Composição química da madeira de eucalipto com diferentes níveis de desbaste. **Ciencia Florestal**, v. 23, n. 4, p. 755–760, 2013.
- ZOBEL, B. J. Inherent differences affecting wood quality in fast-grown plantations. In: IUFRO CONFERENCE, 1980. Oxford. Proceedings...Oxford: IUFRO, p. 169-188, 1980.

APÊNDICES

APÊNDICE A. Moagem e classificação da serragem

1. Transformar os discos de madeira em pequenos porções, e mantê-los à umidade ambiente;
2. Moê-los em um moinho do tipo Macro Wiley;
3. Transferir o material moído para um conjunto de peneiras de 40/60 mesh (0,4mm/malha);
4. Manter o conjunto de peneiras em agitação por 5 minutos, no agitador eletromagnético para peneiras;
5. Retirar o material que passar na peneira de 40 mesh e ficar retido na peneira de 60 mesh.
6. O material que não passar na peneira de 40 deve ser descartado.
7. Deixar equilibrar a umidade da serragem com as condições do ambiente, reduzindo as variações no conteúdo de umidade do material durante o manuseio e subsequente operação de pesagem;
8. Colocar a amostra assim preparada em um frasco de boca larga com tampa que permita uma vedação perfeita (Snap Caps ou Frasco Falcon).

APÊNDICE B. Determinação do teor de extrativos

1. Pesar o equivalente a 1g absolutamente seco (a.s.) de serragem e transferir para saquinho de papel filtro;
2. Colocar a amostra no corpo do extrator;
3. Fazer a extração com álcool:tolueno (1:2) e álcool 96° GL, durante 8 horas em cada solvente, deixando secar ao ar após cada extração;
4. Ligar o banho-maria e mantê-lo em ebulição;
5. Transferir toda a serragem do saquinho para erlenmeyer de 250mL;
6. Adicionar 100mL de água destilada e colocar o erlenmeyer no banho-maria (que já deverá estar fervendo) e cobri-lo;
7. Agitar suavemente a cada 15 minutos;
8. Após três horas filtrar através de cadinho de vidro sinterizado tarado, transferindo toda a serragem do erlenmeyer para o cadinho;
9. Lavar o cadinho com 250mL de água quente;
10. Levar o cadinho à estufa a $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ até massa constante;
11. Pesar o cadinho seco;
12. Calcular o teor de “Extrativos Totais” através da equação 9.

$$ET(\%) = (1 - ms \text{ serragem}) \times 100 \quad (9)$$

Em que:

ET(%): Extrativos totais, em %;

ms serragem: massa de serragem seca já descontando a tara do cadinho, em gramas.

APÊNDICE C. Determinação dos teores de lignina Klason

1. Pesar 300mg da serragem livre de extrativos seca e transferir para erlenmeyer de 250mL;
2. Adicionar 3mL de H₂SO₄ 72% resfriado a 10 – 12°C;
3. Manter em banho-maria a 30 ± 2°C durante 1 hora, misturando frequentemente com auxílio de bastonete;
4. Retirar do banho-maria e adicionar 84mL de água destilada quente, transformando o H₂SO₄ 72% em H₂SO₄ 3%;
5. Colocar o erlenmeyer em autoclave, devidamente vedado com papel alumínio, a 118°C (27psi) durante 60 minutos;
6. Filtrar através de cadinho sinterizado tarado, fazendo um fundo com papel de filtro, e transferir toda a lignina do erlenmeyer para o cadinho;
7. Lavar com 700mL de água quente;
8. Levar o cadinho à estufa a 103 ± 2°C até massa constante;
9. Pesar o cadinho seco;
10. Calcular o teor de lignina Klason através da equação 10.

$$LK (\%) = \left[\frac{\frac{MS}{0,3}}{1 - \frac{ET (\%)}{100}} \right] \times 100 \quad (10)$$

Em que:

LK(%): lignina Klason (insolúvel), em %;

MS: massa de lignina seca já descontando a tara do cadinho, em g;

ET(%): teor de extrativos totais, em %.

11. Transferir o filtrado obtido nos itens 18 e 19 para balão volumétrico de 1000 mL, completando o volume com água destilada;
12. Preparar prova em branco, diluindo 3mL de ácido sulfúrico 72% para 1000 mL;

13. Utilizando cubeta de quartzo e a prova em branco, ajustar o espectrofotômetro em 0 de absorbância nos comprimentos de onda 215nm e 280nm;
14. Prosseguir com a leitura dos filtrados;
15. Calcular os teores de lignina solúvel e lignina total através das equações 11 e 12.

$$LS (\%) = \left(\frac{4,53 \times L215 - L280}{300 \times \frac{0,3}{1 - \frac{ET (\%)}{100}}} \times 100 \right) \quad (11)$$

$$LT (\%) = LK (\%) + LS (\%) \quad (12)$$

Em que:

LS(%): teor de lignina solúvel, em %;

L215: leitura de absorbância no comprimento de onda de 215nm;

L280: leitura de absorbância no comprimento de onda de 280nm;

ET(%): teor de extrativos totais, em %;

LT(%): teor de lignina total, em %;

LK(%): teor de lignina Klason, em %.

APÊNDICE D. Determinação do teor de cinzas

1. Colocar os cadinhos em mufla a 600 °C. Permanência de 2 horas;
2. Retirar os cadinhos e colocar em dessecador (permanência mínima de 30 minutos). Prosseguir com a taragem dos cadinhos e pesagem de ± 1 g de serragem de madeira em balança analítica, realizando as devidas identificações;
3. Chamuscar o material (cadinho+ serragem) em fogo para incineração prévia da serragem.
4. Colocar o material para carbonização em mufla até o alcance da temperatura 600 °C, e posterior permanência pelo período de 2 horas.
5. Retirar o material da mufla e realizar a pesagem após esfriamento em estufa e dessecador.
6. Calcular os teores de cinzas através da seguinte equação:

$$Cinzas (\%) = \frac{Peso\ material - peso\ cadinho}{peso\ serragem} \times 100$$

Em que:

Peso material= peso final do cadinho+ serragem.

APÊNDICE E. Determinação do álcali ativo em licor branco e negro

1. Adicionar, em um erlenmeyer, 50 mL de água destilada, 5 mL do licor (licor branco ou licor negro) e 25 mL de Cloreto de Bário 10%;
2. Titular com ácido clorídrico 0,5 N até pH 9,34 (VOL.A);
3. Adicionar 5 mL de formaldeído 37%;
4. Titular com ácido clorídrico 0,5 N até pH 9,34 (VOL.B);
5. Calcular as concentrações de hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S) através das seguintes fórmulas:

$$NaOH \left(\frac{g}{L} \right) = (2 \times VOL.A - VOL.B) \times 8 \times N HCl \quad (13)$$

$$Na_2S \left(\frac{g}{L} \right) = (2 \times VOL.A - VOL.B) \times 8 \times N HCl \quad (14)$$

Em que:

N HCL: Normalidade do ácido clorídrico.

6. Calcular álcali ativo, álcali efetivo e sulfidez através das fórmulas:

$$\text{Álcali ativo} \left(\frac{g}{L} \right) = NaOH + Na_2S \quad (15)$$

$$\text{Álcali efetivo} \left(\frac{g}{L} \right) = NaOH + \frac{1}{2} Na_2S \quad (16)$$

$$\text{Sulfidez (\%)} = \frac{Na_2S}{\text{Álcali ativo}} \quad (16)$$

APÊNDICE F. Porcentagem de casca e fator de forma (f) dos clones de *Eucalyptus* spp.

Tabela 20. Valores médios da porcentagem de casca e do fator de forma (f) dos clones de *Eucalyptus* spp.

Clone	% Casca	Fator de forma (f)
A	12,20	0,56
B	12,03	0,47
C	15,07	0,51
D	13,44	0,55
E	15,05	0,59
F	15,80	0,52

Clone A= *E. grandis* x *E. urophylla*; clone B= híbrido espontâneo de *E. urophylla*; clone C= *E. pellita* x *E. grandis*; clone D= *E. camaldulensis* x *E. tereticornis*; clone E= *E. grandis* x (*E. urophylla* x *E. tereticornis*); clone F= *E. urophylla* x *E. grandis*.