

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANDREZA RAFAELLA CARNEIRO DA SILVA DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO TECNOLÓGICA NA SELEÇÃO DE CLONES DE *Eucalyptus*
PARA INDÚSTRIA CELULÓSICA**

RIO LARGO
2020

ANDREZA RAFAELLA CARNEIRO DA SILVA DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO TECNOLÓGICA NA SELEÇÃO DE CLONES DE *Eucalyptus*
PARA INDÚSTRIA CELULÓSICA**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Centro de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas como requisito básico para a conclusão do Curso de Engenharia Florestal.

Orientadora: Dra. Vânia Aparecida de Sá

Coorientador: Dr. Antônio Marcos Rosado.

RIO LARGO
2020

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Campus de Engenharias e Ciências Agrárias – CECA
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana

S237a Santos, Andreza Rafaella Carneiro da Silva dos.

Avaliação tecnológica na seleção de clones de *Eucalyptus* para indústria celulósica. / Andreza Rafaella Carneiro da Silva dos Santos. – 2020.

45 f.: il.

Orientadora: Vânia Aparecida de Sá
Coorientador: Antônio Marcos Rosado.

Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) -
Universidade Federal de Alagoas. Campus de Engenharias e
Ciências Agrárias. Rio Largo, 2020.

Bibliografia: f. 38 – 43.

1. Qualidade da madeira. 2. Rendimento de celulose. 3. Papel e Celulose.

CDU:630*2

FOLHA DE APROVAÇÃO

ANDREZA RAFAELLA CARNEIRO DA SILVA DOS SANTOS

Avaliação tecnológica na seleção de clones de *Eucalyptus* para indústria celulósica
Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de
Alagoas

Trabalho de conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Florestal do
Campus de Engenharias e Ciências Agrárias -
CECA, da Universidade Federal de Alagoas –
UFAL, e aprovado em 30 de julho de 2020.



Prof.^a Dr.^a Vânia Aparecida de Sá, UFAL/CECA (Orientadora)

Banca Examinadora:



Prof.^a Dr.^a Vânia Aparecida de Sá – UFAL / CECA



Prof. Dr. Eduardo Pagel Floriano – UFAL / CECA



Prof.^a Dr.^a Anna Carolina de Almeida Andrade – UFS/ CCAA

RESUMO

As indústrias celulósicas que utilizam como matéria-prima madeiras do gênero *Eucalyptus* buscam além de florestas altamente produtivas em madeira, materiais genéticos superiores em rendimento e qualidade, com aumentos na produção por área plantada e a máxima eficiência na obtenção do produto. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi selecionar os melhores clones de *Eucalyptus* para indústria celulósica em função de características tecnológicas e dendrométricas por meio de correlações e de técnicas estatísticas multivariadas. Os clones utilizados neste trabalho foram implantados na região de Vale do Rio Doce em Minas Gerais. Foram coletados 13 clones comerciais de *Eucalyptus* spp. sendo cinco árvores de cada. As características determinadas foram: densidade básica, teor de lignina e teor de extrativos. Como variáveis da polpação foram avaliados a carga de álcali efetivo e o rendimento depurado em polpa não branqueada. Os dados foram obtidos por uma empresa do ramo de celulose e papel e cedidos para posteriores análises. Inicialmente, foi calculado o consumo específico de madeira para produção de celulose, em seguida os clones foram avaliados por meio da análise de variância e testes de médias a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Foram encontradas as correlações lineares significativas para as variáveis tecnológicas e dendrométricas avaliadas através da correlação de Pearson. A partir da densidade básica, álcali efetivo e rendimento depurado efetuou-se o agrupamento dos clones por meio de análise multivariada. As propriedades da madeira apresentaram valores compatíveis com a literatura para clones de *Eucalyptus* spp. destinados à produção de celulose. A variação da carga de álcali efetivo afetou significativamente o rendimento depurado, o qual também sofreu uma correlação negativa com as variáveis lignina e extrativo. Com a análise de agrupamentos quatro grupos foram formados (grupo 1 com clone B, E, H, J e K, grupo 2 com os clones A e F e o terceiro grupo com os materiais: C, D, G, I, L e M). Os clones de *Eucalyptus grandis* (B e E), *Eucalyptus urophylla* (H) e híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* (J e K) formados no grupo 1 apresentaram-se como os melhores materiais genéticos para a produção de celulose e papel dadas as suas características tecnológicas e alto rendimento depurado.

Palavras-chave: Qualidade da madeira, Rendimento de celulose, Papel e Celulose.

ABSTRACT

The cellulosic industries that use *Eucalyptus* wood as raw material, seek in addition to highly productive wood forests, genetic materials superior in yield and quality, with increases in production per planted area and maximum efficiency in obtaining the product. Therefore, the objective of this work was to select the best *Eucalyptus* clones for the cellulosic industry according to their technological and dendrometric characteristics through correlations and multivariate statistical techniques. The clones used in this work were implanted in the Vale of Rio Doce region in Minas Gerais. Were collected 13 commercial *Eucalyptus* spp. clones and five trees each were collected. The characteristics determined were basic density, lignin content, extractive content. As pulping variable, the effective alkali and purified yield in unbleached pulp were evaluated. The data were obtained by a company in the pulp and paper industry and assigned for further analysis. Initially, the specific consumption of wood for pulp production was calculated, then the clones were evaluated by means of analysis of variance and tests of means at 5% probability by the Tukey test. Significant linear correlations were found for the technological and dendrometric variables assessed using Pearson's correlation. From the basic density, effective alkali and purified yield, the clones were grouped using multivariate analysis. The wood properties showed values compatible with the literature for *Eucalyptus* spp. clones destined for pulp production. The variation of the effective alkali load significantly affected the purified yield, which also suffered a negative correlation with the lignin and extractive variables. With the Cluster analysis, four groups were formed (group 1 with clone B, E, H, J K group 2 with clones A and F and the three group with materials: C, D, G, I, L and M). The clones of *Eucalyptus grandis* (B and E), *Eucalyptus urophylla* (H) and hybrids of *E. grandis* x *E. urophylla* (J and K) formed in group 1 presented themselves as the best genetic materials for production of cellulose and paper due to its technological characteristics and high purified yield.

Keywords: Wood quality, Yield, Paper and Cellulose.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	5
2. REVISÃO DE LITERATURA	7
2.1. Cultura do Eucalipto	7
2.2. Polpação	8
2.2.1. Álcali efetivo	9
2.2.2. Rendimento depurado	9
2.3. Propriedades da Madeira para Produção de Polpas Celulósicas	10
2.3.1. Densidade básica.....	10
2.3.2. Lignina	11
2.3.3. Extrativos	12
2.4. Produtividade em Celulose	13
3. MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1. Local de Coleta	14
3.2. Coleta do Material	15
3.3. Caracterização da Madeira	16
3.3.1. Densidade básica.....	16
3.3.2. Composição química.....	17
3.4. Polpação Kraft	17
3.4.1. Carga álcali.....	17
3.5. Caracterização da Polpa	17
3.5.1. Rendimento depurado da polpa	17
3.4. Estimativa da Produtividade de Polpa de Celulose por Hectare	18
3.5. Análise dos Dados	19
3.5.1. Análise de variância	19
3.5.2. Análises de correlação e regressão linear.....	19
3.5.3. Análise multivariada.....	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
4.1. Caracterização da Madeira	20
4.2. Produtividade em Celulose	26
4.3. Relações entre as variáveis	28
4.4. Análise de agrupamento dos materiais genéticos	36
5. CONCLUSÕES	37

1. INTRODUÇÃO

Segundo dados do IBÁ (2020), em 2018 o Brasil se tornou o segundo maior produtor mundial de celulose, atrás apenas dos Estados Unidos, mantendo-se na posição em 2019. O país exportou 14,7 milhões de toneladas em 2019, enquanto o volume consumido no mercado interno foi de 6,5 milhões de toneladas, com importação de 253 mil toneladas. No mercado de papel, o Brasil se encontra em 8º no ranking de produtores, com 10,5 mil toneladas de produção em 2019.

Um fator importante na competitividade da indústria de celulose é a seleção de árvores para formação de florestas homogêneas que possibilitem a produção de polpa celulósica com alto rendimento industrial, baixo custo e elevada qualidade tecnológica. No Brasil, os programas de melhoramento florestal das empresas de celulose e papel destacam-se no cenário mundial pelos excelentes resultados alcançados na área de melhoramento genético, principalmente com o gênero *Eucalyptus* spp.

Na indústria de papel, as polpas celulósicas de fibra curta são destinadas a produção de papéis higiênicos, guardanapos, papéis de imprimir, de escrever, entre outros, sendo esses oriundos de madeiras de folhosas, onde o gênero *Eucalyptus* se destaca como a principal fonte de matéria-prima utilizada nesse segmento industrial no Brasil (IBÁ, 2019). A situação é atribuída a fatores como rápido crescimento, alta adaptabilidade e produtividade (BRANCALION; CHAZDON, 2017).

A madeira é constituída por celulose, hemiceluloses, lignina, extrativos e componentes inorgânicos, sendo a composição química um relevante fator de qualidade da madeira (MARCELINO, 2019). Para produção de polpa celulósica os teores de celulose e hemiceluloses são variáveis positivas ao rendimento, enquanto altos teores de lignina e de extrativos são indesejáveis ao processo, visto que afetam o desempenho da polpação demandando maiores quantidades de álcali ativo, o que impacta negativamente o rendimento da conversão da madeira em polpa celulósica (SOUZA, 2017). Além disso, extrativos estão associados com incrustações em equipamentos, correlacionam-se ainda com a formação de pitch, os quais são acúmulos de substâncias (graxas, ceras, álcoois de cadeia longa) que se depositam no maquinário das fábricas, causando redução da produção, aumento no custo de manutenção e operação e de defeitos na celulose (SILVÉRIO, 2008).

Outro fator importante na indústria de celulose e papel é a avaliação da densidade básica, a qual fornece indicações bastante precisas acerca das características

relacionadas aos processos de polpação, como velocidade de impregnação do licor de cozimento, grau de deslignificação e rendimento do processo, afetando custos de produção florestal e transporte (CARDOSO, 2016).

A importância desse tipo de estudo impacta principalmente as exigências de mercado e competitividade. Isso se justifica pelo fato de o rendimento estar diretamente relacionado aos custos de produção da polpa celulósica nas indústrias, uma vez que madeiras com baixo rendimento consomem muito reagentes de polpação e branqueamento, implicando em maiores custos. Com isso, o estudo de propriedades que afetam negativamente o processo é de suma importância para se obter melhores resultados e menor despesa dentro das indústrias de celulose e papel.

Ferramentas de análise multivariada como forma de selecionar materiais genéticos para a produção de polpa de celulose têm sido utilizadas por alguns autores (CASTRO et al., 2013; MINGOTI, 2005). As análises multivariadas são um conjunto de métodos estatísticos que possibilitam a avaliação conjunta de variáveis relacionadas entre si, com diferentes significâncias. Segundo Castro et al. (2013), a análise multivariada é eficiente para ranquear os materiais quanto à qualidade da madeira, e o método de agrupamento é capaz de estratificar os clones para finalidades celulósicas.

Determinações e indicativos que podem propiciar indiretamente estimativas sobre rendimento e produtividade do processo e consumo de reagentes durante a polpação, como composição química, densidade básica da madeira juntamente com o rendimento em polpa, têm sido os principais parâmetros adotados pelos programas de melhoramento genético para seleção de clones de *Eucalyptus* spp. Visando a produção de celulose.

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a qualidade de clones comerciais do gênero *Eucalyptus* spp. para fabricação de celulose, cultivados na região do Vale do Rio Doce - MG.

Tendo como objetivos específicos:

- a) Avaliar as propriedades relacionadas à qualidade de polpas celulósicas das madeiras de *Eucalyptus* spp. em plantios clonais;
- b) Avaliar as relações entre as propriedades físico-químicas das madeiras de *Eucalyptus* spp. e suas propriedades celulósicas por meio de análises de correlações lineares;
- c) Caracterizar os clones de *Eucalyptus* spp. para a produção de celulose por meio de técnicas estatísticas multivariadas.

- d) Avaliar o impacto da variação do álcali efetivo no rendimento da polpação dos clones avaliados.
- e) Predizer o consumo específico de madeira para produção de celulose.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Cultura do Eucalipto

As espécies comerciais de *Eucalyptus* são destinadas às indústrias de celulose e papel, energia e de produtos sólidos, sendo o sucesso nesses setores correspondentes a alta produtividade dos plantios e as características químicas e físicas. Essas características são favorecidas pelo clima tropical do país e condições de solo, pois o gênero apresenta condições ótimas de adaptabilidade e produtividade nos diversos cenários edafoclimáticos brasileiros (CASTRO et al., 2016).

Além disso, Fantuzzi Neto (2012) cita que os elevados patamares de produtividade foram alcançados principalmente pela utilização de técnicas de clonagem, baseados na realização de estudos silviculturais e análises tecnológicas para estabelecimento da qualidade da madeira e, por conseguinte, seleção de clones para multiplicação e formação de florestas homogêneas, com o intuito de se obter alta produtividade florestal. Como reflexo dessas práticas o Incremento Médio Anual (IMA) do gênero *Eucalyptus* no Brasil aumentou de cerca de 15 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ em 1970 obtido na década de 70 para mais de 40 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ em 2015 (SILVA et al, 2017)

Na tabela 1 está relacionada a quantidade de consumo de madeira no Brasil para o segmento de papel e celulose. O *Eucalyptus* comanda o primeiro lugar de consumo de madeira, com 46% do total, enquanto a madeira de Pinus se encontra em 2º lugar com um consumo de 9,26 milhões de metros cúbicos de madeira.

Tabela 1. Consumo de madeira para uso industrial no Brasil em 2016.

Segmento	Milhões (m ³)		
	Eucalipto	Pinus	Outras
Papel e celulose	70,74 (46%)	9,26 (19,6%)	0,09 (1,75%)

Fonte: Adaptado por POYRY (2016).

Para atender a demanda industrial de madeira pelo processo produtivo florestal, são necessários materiais genéticos de alta qualidade e rápido crescimento, entre cinco e sete anos de rotação, sendo os plantios de eucalipto caracterizados como plantios de rápido crescimento (SIMETTI; BONDUELLE; SILVA, 2018). Assim, o gênero tem se destacado no Brasil com relação às demais espécies em função de suas características

quanto ao consumo de madeira para diversos segmentos industriais, principalmente para uso na indústria celulósica.

2.2. Polpação

A extração da celulose consiste na transformação da madeira em um material fibroso denominado polpa ou pasta celulósica. Nesse processo, a lignina – agente ligante entre as fibras da madeira – é fragmentada e os carboidratos são dissolvidos e convertidos em ácidos de baixa massa molecular (MARCELINO, 2019).

Atualmente, o método químico kraft é o mais utilizado para converter biomassas lignocelulósicas em polpa celulósica, que segundo Tran e Vakkilainen, (2015) é devido à sua capacidade de lidar com várias espécies de madeira e, ainda assim, produzir uma polpa forte e resistente, além da viabilidade econômica da recuperação química dos componentes do processo.

Nesse processo a separação ou individualização das fibras é conseguida através da ação de reagentes químicos, especificamente o hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S), que agem principalmente sobre a lignina que compõe a lamela média. Mesmo sendo seletivos, os reagentes químicos acabam degradando uma fração dos polissacarídeos (holoceluloses), reduzindo o rendimento e afetando as características da polpa celulósica (KLOCK, 2000). Em geral, o rendimento obtido para as principais espécies utilizadas é baixo, sendo de 40 a 45% para as coníferas e de 45 a 54% para as folhosas (SIXTA, 2006).

Após o cozimento, a polpa de celulose é submetida a sucessivas lavagens e, posteriormente, peneirada para remover outras possíveis impurezas insolúveis. Em seguida, a polpa pode ser submetida a um processo de branqueamento que visa melhorar sua alvura. Este processo consiste em tratá-la com peróxido de hidrogênio, dióxido de cloro, oxigênio e hidróxido de sódio em diferentes estágios (SILVÉRIO, 2008).

A qualidade da polpa celulósica também pode ser avaliada mediante a determinação das propriedades físico-químicas da madeira, uma vez que o produto é influenciado pelas características inerentes ao material utilizado.

Para uma comparação efetiva das tecnologias de polpação, tem sido adotada a fixação de parâmetros como tempo, temperatura, número Kappa, álcali efetivo, por exemplo, a fim de obter condições de processo que possam ser comparáveis, auxiliando-se assim na discussão e interpretação dos resultados.

2.2.1. Álcali efetivo

A carga álcali é utilizada para remover a lignina da lamela média e das paredes das células (KLOCK, 2010). Os valores de álcali efetivo praticados no setor industrial variam grandemente, em muitos casos essa variação é controlada para não obter valores inferiores a um limite pré-estabelecido ou devido ao incremento de produção de digestores, que devido a limitações físicas é necessário aumentar a carga de álcali para facilitar processos de impregnação e cozimento devido aos tempos de retenção inferiores aos planejados inicialmente (ABRANCHES, 2017).

O álcali efetivo pode ser um indicativo da eficiência do processo. Kleppe (1970) indica que a carga álcali utilizada no processo deve ser mantido em faixa constante, pois ela pode influenciar na performance da polpação uma vez que se correlaciona com a solvatação de carboidratos e lignina durante o processo de cozimento. Para folhosas, a carga alcalina mínima necessária para promover a separação das fibras da madeira, para rendimentos entre 50 e 55%, é da ordem de 13 a 14% (D'ALMEIDA, 1988).

Abranches (2017) observou que uma menor concentração de álcali efetivo no licor negro aumenta o conteúdo de hemiceluloses, mensurado pelas análises de pentosanas, aliado a esse aumento de hemiceluloses há um aumento do conteúdo de ácidos hexenurônicos da polpa. A maior preservação desses compostos impacta positivamente o rendimento do processo, que mostra tendência de aumento com a diminuição do álcali efetivo.

Alguns fatores como os elementos químicos da madeira, podem influenciar na polpação afetando a quantidade de carga álcali necessária para o cozimento. Bassa et al. (2007) observaram que o elevado teor de extrativos na madeira exige maior teor de álcali ativo para atingir o Kappa desejado, pois esse consome álcali e impede que haja melhor deslignificação entre as fibras.

Cardoso, (2016) também confirma que variáveis de cozimento como temperatura e álcali ativo afetam fortemente o processo de deslignificação e a qualidade do produto. Sendo necessário o estudo de correlações entre variáveis para obter um maior rendimento das polpas produzidas.

2.2.2. Rendimento depurado

A boa qualidade da celulose, associada a baixos custos de produção, está intimamente correlacionada com os bons resultados no processo de polpação, sendo evidente a necessidade de um bom conhecimento e um bom rendimento durante a etapa do cozimento.

Na produção de polpa celulósica Kraft, o rendimento em polpa é um dos principais parâmetros de avaliação da eficiência do processo, uma vez que a madeira é o principal componente do processo e está diretamente relacionado com custos de produção em consumo de madeira para a polpação (SARTO, 2020).

O rendimento em polpa tem efeito sobre a geração de sólidos, sobre o consumo específico de madeira e está relacionado com a carga alcalina aplicada na geração de sólidos. Estes fatores influem diretamente na capacidade de produção de celulose de uma unidade fabril e conseqüentemente no custo de produção da polpa celulósica (SILVA et. al., 2002).

O grau de deslignificação e o rendimento do processo se relacionam de forma inversa, ou seja, o aumento do grau de deslignificação causa diminuição de rendimento. A diminuição do grau de deslignificação no processo de polpação gera melhoria tanto no rendimento da polpa ao longo da linha de fibras quanto em algumas propriedades da celulose branqueada (SARTO, 2020).

2.3. Propriedades da Madeira para Produção de Polpas Celulósicas

2.3.1. Densidade básica

A densidade básica é definida como a quantidade de matéria seca presente em um metro cúbico sólido de madeira, considerando-se que, no lenho, há espaços vazios em maiores ou menores porcentagens (KOMAN e FEHER, 2015). Esta característica expressa a quantidade de carbono utilizada no processo de formação da madeira e apresenta uma grande variabilidade (MORAIS et al., 2017).

Por ser uma variável de fácil e rápida determinação e por relacionar-se diretamente com a qualidade do produto, a densidade básica tem sido considerada como o primeiro parâmetro para se avaliar a qualidade da madeira visando a utilização como matéria-prima para a produção de polpa celulósica (TRUGILHO et al., 2015). De acordo com Queiroz et al., (2004), a influência da densidade básica na polpa está geralmente associada às suas características de resistências físico-mecânicas.

A faixa de densidade básica direciona a escolha do material genético de acordo com a finalidade, além de apresentar certa relevância na padronização da matéria prima recebida pela indústria (SOUZA et al., 2017). A uniformidade da densidade básica da madeira deve ser levada em consideração, uma vez que madeiras mais uniformes possuem melhor comportamento tecnológico, resultando em polpas celulósicas com melhores propriedades.

A densidade básica pode influenciar na maior ou menor resistência ao corte e espessura dos cavacos, e conseqüentemente, influenciando na impregnação do licor de cozimento e no requerimento de álcali (QUEIROZ, et al., 2004), geralmente madeiras com baixa densidade são mais fáceis de picar, impregnar e cozinhar, porém, resultam em menos massa de polpa celulósica por cozimento (VIVIAN et. al., 2019).

É importante destacar que a densidade básica é uma característica de alta herdabilidade genética, resultante da combinação de vários fatores, incluindo a composição química e a morfologia das fibras da madeira. Para Trautenmüller et al. (2016) este parâmetro é influenciado pelo arranjo espacial das células e reflete a quantidade de material lenhoso por unidade de volume.

Segundo Foelkel, (2007) a densidade básica da madeira do gênero *Eucalyptus* pode variar de 300 a 800 kg/cm³ dada a relação com outras propriedades. O autor também descreve a densidade básica da madeira como um parâmetro importante para o processo de produção de polpa celulósica, tendo em vista a influência que exerce sobre a quantidade de polpa produzida por unidade de volume de madeira consumido e sobre a influência do processo de deslignificação. Sendo possível estimar com relativa precisão a quantidade de madeira necessária para abastecer uma fábrica de celulose, como também, em termos de transporte e armazenamento, estimar a massa por m³ de madeira a ser utilizado, fatores esses muito importantes dentro do processo fabril.

2.3.2. Lignina

A lignina é uma substância amorfa, localizada principalmente na lamela média e na parede celular secundária da madeira (MOGOLLÓN et. al., 2008). É constituída de unidades de fenilpropano formando polímeros altamente complexos, principalmente aromáticos, considerada como substância incrustante, e diferentes teores de grupos alcóolicos e metoxílicos, dependendo da madeira (ROWELL et al., 2005).

A estrutura básica da lignina e distribuição nas paredes celulares diferem de acordo com sua origem, condições de plantio das árvores e idade. A lignina atua como uma “cola” de ligação entre as células, conferindo rigidez à parede celular e sua porcentagem varia entre 20% a 40% na madeira e ainda pode variar de acordo com partes da planta. É o constituinte mais estável termicamente, devido a sua estrutura e aos tipos de ligações (MACEDO, 2012).

De acordo com Colodette (2001) as ligninas isoladas de madeira de fibra longa e madeira de fibra curta possuem estruturas básicas muito diferentes entre elas. As ligninas do tipo guaiacil são encontradas em coníferas, enquanto ligninas do tipo

guaiacil-siringil ocorrem em folhosas. Segundo o autor, em madeiras de folhosas, a lignina é composta de unidades siringil e guaiacil com relações variadas.

O objetivo principal da polpação kraft é remover a lignina enquanto os carboidratos permaneçam intactos. Para a polpação é desejável uma madeira com maior relação S/G possível, pois essa característica tende a facilitar o processo de deslignificação, apresentando maior reatividade em polpação kraft (GOMES et al., 2010). Em relação ao teor de lignina solúvel, estudos indicam que quanto maior o seu teor, maior tende a ser a relação siringil/guaiacil da lignina (GOMES et al., 2010).

Segundo Alves (2010), as operações de cozimento visam retirar a maior quantidade possível de lignina, sem danificar significativamente as fibras, sendo que as madeiras com altos teores de lignina normalmente exigem maiores cargas de reagentes químicos para a deslignificação. Em geral, para madeira de fibra longa, mais de 80% da lignina originalmente presente precisa ser removida para atingir o ponto de liberação das fibras. Já para madeiras densas, o mínimo necessário é de cerca de 90% da remoção de lignina (WEDIN et al., 2010; BRANNVALL, 2017).

A intensidade de deslignificação guarda uma relação inversa com o rendimento do processo. Desta forma, a diminuição da intensidade de deslignificação ao final do processo de polpação pode trazer como benefícios o aumento do rendimento, redução da carga de sólidos enviados à caldeira de recuperação e menor consumo específico da madeira (SARTO, 2020).

2.3.3. Extrativos

Outro componente presente na madeira e em menor proporção, mas considerado de grande relevância, são os extrativos. Os extrativos são formados por várias classes de compostos orgânicos de acordo com as suas características estruturais como ceras, gorduras, álcoois, resinas, entre muitos outros (OLIVEIRA, 2006). Os extrativos são frequentemente responsáveis por determinadas características de cor, cheiro, resistência natural ao apodrecimento, gosto e propriedades abrasivas da madeira.

Por não fazerem parte dos componentes estruturais da parede celular, estão localizados nas células do parênquima, nos canais secretores, na lamela média, nos espaços intercelulares e na parede celular. Portanto, podem ser extraídos da madeira por solubilização em solventes, sem causar danos às propriedades mecânicas da madeira (VALETTE et al., 2017).

A composição dos extrativos pode variar significativamente entre diferentes espécies de madeira e dentro das diferentes partes da árvore. Além disso, a quantidade e

composição dos extrativos na madeira podem mudar consideravelmente, dependendo dos procedimentos que antecedem o processo de fabricação da polpa, como a época de colheita, a forma de transporte e a estocagem da madeira (SILVÉRIO, 2008).

Os extrativos são em geral danosos ao processo de polpação, pois podem provocar incrustações em equipamentos, além de reagirem com as soluções de cozimento consumindo álcali. Além disso, em reações de saponificação de ácidos graxos, formam espumas nos sistemas prejudicando etapas de processo como a lavagem da polpa, dificultando a depuração e branqueamento da polpa celulósica. Os extrativos ainda se correlacionam com a formação de pitch, o que promove o depósito de substâncias nos equipamentos gerando manchas no papel produzido (CRUZ et al., 2006).

Segundo Almeida et. al., (2000), os extrativos exercem efeitos marcantes sobre as propriedades de absorção da polpa celulósica, pois esses compostos formam rearranjo estrutural na superfície da fibra à medida que o tempo de estocagem aumenta, podendo dessa forma influenciar a taxa de absorção de água dos papéis para fins sanitários. E em função do teor de extrativos presentes na madeira influenciar diretamente no consumo do álcali, no rendimento e na taxa de deslignificação, este pode definir o potencial de uma matéria-prima para a produção de polpa celulósica.

2.4. Produtividade em Celulose

Segundo Dobner et. al, (2018), a produtividade das florestas no Brasil alcançou os mais elevados níveis mundiais de incremento médio anual e, além do aumento na produtividade, outras características também foram modificadas, influenciando em melhores resultados no processo produtivo.

De acordo com Foelkel (2017), esses elevados patamares de produtividade foram alcançados principalmente pela utilização de técnicas de clonagem. Os estudos de clonagem de *Eucalyptus* sp. para estabelecimento de florestas com a qualidade requerida pelas empresas requerem análises e testes em uma infinidade de clones potenciais.

O setor de celulose e papel no Brasil é um dos mais atuantes segmentos industriais de base florestal. Dos 7,8 milhões de hectares de árvores plantadas no Brasil em 2018, os plantios de eucaliptos ocupam 5,7 milhões de hectares desse total, desses, 36% é destinado a produção de celulose e papel (IBÁ, 2019).

Para se manter em um nível alto de produção e competitividade no mercado, as indústrias celulósicas necessitam de conhecimento de variáveis que afetam esse comércio. O consumo específico de madeira para fabricar uma tonelada de celulose é

um dos principais indicadores de qualidade da matéria-prima florestal, pois ele tem fortes implicações com os custos de produção da celulose e com a área florestal que deve ser plantada para suprir e abastecer adequadamente uma fábrica de celulose (FOELKEL, 2017).

Esses valores dependem da qualidade da matéria-prima florestal, podendo variar em função do tipo de clone, idade da floresta, espécie florestal e até mesmo dos locais onde a floresta esteja sendo plantada (MOKFIENSKI, 2016). Por essa razão, o consumo específico de madeira vem sendo considerado pelos melhoristas florestais como um dos principais indicadores de qualidade de madeira nos programas de otimizações da qualidade da matéria-prima florestal.

Segundo Mokfienski (2016), o consumo da madeira costuma ser expresso em volume sólido de madeira necessário para se produzir uma tonelada de celulose. Por isso, ele depende basicamente de dois outros parâmetros importantes na definição de qualidade de madeira: densidade da madeira e rendimento da madeira em celulose. Quanto mais madeira sólida em um metro cúbico de madeira contiver e quanto maior for o rendimento de transformação da madeira em celulose, menores serão os volumes de madeira necessários para se produzir uma tonelada de celulose e assim, menores custos no processo fabril.

3. MATERIAL E MÉTODOS

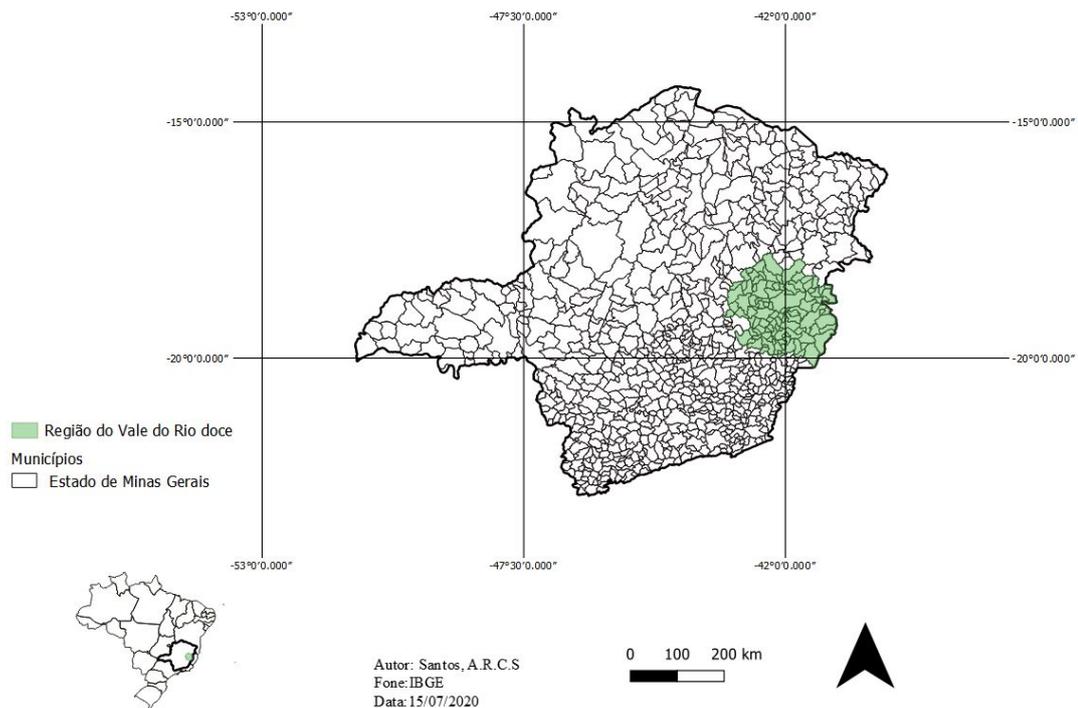
A cubagem dos indivíduos, coleta e os procedimentos de análises da madeira e das polpas foram conduzidos por equipes de uma empresa do ramo de celulose. Para este trabalho foram fornecidos os dados para processamento e análise.

3.1. Local de Coleta

Foram avaliados 13 clones comerciais do gênero *Eucalyptus* spp. entre as espécies de *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus grandis* e híbridos de *E. urophylla* x *E. grandis* na região do Vale do Rio Doce, no leste do Estado de Minas Gerais (19°23'45"S, 42°23'40"W).

A região possui solo do tipo Cambissolo de fundo de vale, com 200 m de altitude. O clima é tropical, quente e semi úmido, com temperaturas médias entre 20° e 22° C, com um índice pluviométrico que varia de 1250 a 1900 mm ao ano (figura 1).

Figura 1. Localização da região do Vale de Rio Doce/MG.



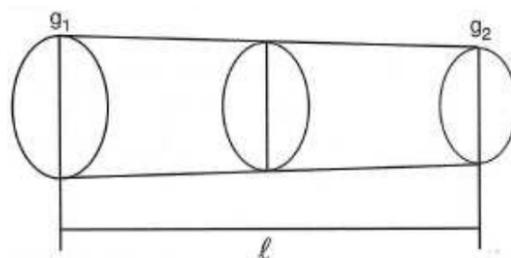
Fonte: Autor (2020).

3.2. Coleta do Material

Foi coletado material com 6 anos de idade, todos da mesma região, com índice pluviométrico, condições edafoclimáticas, relevo e altitude idênticos, a fim de minimizar os efeitos desses fatores sobre as características dos materiais. Para cada material genético foram selecionadas e coletadas 5 árvores, totalizando 65 indivíduos. As árvores coletadas foram mensuradas em diâmetro a altura de 1,30 m do solo (DAP), altura total e altura comercial, até diâmetro mínimo de 5 cm. Foram obtidos toretes de 1 metro de comprimento retirados nas posições correspondentes a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial do fuste. Além desses, foram obtidos discos de 5,0 cm de espessura, a 1,30 m do solo (disco DAP), para a determinação da densidade básica e caracterização química.

O método de determinação dos volumes das secções foi o de Smalian (equação 1), sendo calculados o volume com casca e sem casca dos indivíduos. Foram mensurados os diâmetros da base e do topo das toras e o comprimento de acordo com a figura 2.

Figura 2. Cubagem de toras de acordo com a fórmula de Smalian (Fonte: MACHADO e FIGUEIREDO FILHO, 2003).



$$v = l \cdot [(g_1 + g_2) / 2] = l \cdot m (d_1^2 + d_2^2) / 8 \quad (1)$$

Onde: v = volume da seção ou tora em m^3 ; l = comprimento da tora em metros; g_1 = área basal na base da tora em m^2 ; g_2 = área basal no topo da tora em m^2 ; d_1 = diâmetro na base da tora em metros; d_2 = diâmetro no topo da tora em metros.

A tabela 2 apresenta os materiais genéticos utilizados com seus respectivos diâmetros, altura comercial e altura total. Assim como a codificação utilizada para esse estudo com suas espécies e a procedência de cada material.

Tabela 2. Dados dendrométricos coletados dos Clones de *Eucalyptus* spp.

Material genético	Espécie	Procedência	DAP (cm)	h_c (m)	h (m)
A	<i>Eucalyptus grandis</i>	Florestas Rio Doce	17.21	19.34	26.25
B	<i>Eucalyptus grandis</i>	Florestas Rio Doce	15.24	18.1	25.63
C	<i>Eucalyptus grandis</i>	Florestas Rio Doce	16.50	20.8	26.93
D	<i>Eucalyptus grandis</i>	Rio Claro	14.62	18.12	24.52
E	<i>Eucalyptus grandis</i>	Florestas Rio Doce	14.74	18.92	25.74
F	<i>Eucalyptus urophylla</i>	Plantar	15.50	16.34	23.02
G	<i>Eucalyptus urophylla</i>	V&M	10.80	10.36	17.90
H	<i>Eucalyptus urophylla</i>	Plantar	16.30	20.04	25.24
I	<i>Eucalyptus urophylla</i>	CAF	19.70	22.94	28.74
J	<i>E. grandis x E. urophylla</i>	Cenibra	13.68	22.5	30.60
K	<i>E. grandis x E. urophylla</i>	Cenibra	16.36	19.58	25.56
L	<i>E. grandis x E. urophylla</i>	Copener	13.30	15.49	22.91
M	<i>Eucalyptus grandis</i>	Florestas Rio Doce	16.42	18.06	23.90

DAP=diâmetro à altura do peito, h_c = Altura comercial, h = altura total.

3.3. Caracterização da Madeira

3.3.1. Densidade básica

A densidade básica foi determinada pelo método hidrostático e a metodologia está descrita na norma NBR 11942, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2003).

3.3.2. Composição química

Inicialmente, as amostras foram moídas em moinho tipo Willey e, em seguida, classificadas em conjuntos de peneiras, sendo utilizado para os ensaios químicos o material que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retido na peneira de 60 mesh.

O teor de extrativos totais foi determinado em extrator tipo Soxhlet com solução de etanol/tolueno, de acordo com as especificações descritas na norma ABNT NBR 14853 (ABNT, 2010a).

O teor de lignina insolúvel (Klason) foi obtido a partir de hidrólise ácida com H_2SO_4 , seguindo as especificações descritas na norma NBR 7989 (ABNT, 2010b). O teor de lignina solúvel em ácido sulfúrico foi determinado em espectrofotômetro, conforme a metodologia proposta por Goldschimid (1971). O teor de lignina total foi determinado pelo somatório das ligninas solúvel e insolúvel.

3.4. Polpação Kraft

Os cozimentos foram realizados em digestor laboratorial dotado de 3 células. As condições operacionais foram: 400 g de amostra; temperatura máxima de 170 °C; tempo até a temperatura máxima, 90 minutos; tempo de permanência à temperatura máxima, 60 minutos.

3.4.1. Carga álcali

As cargas de álcali foram estabelecidas experimentalmente, de modo a obter polpas com número Kappa $17 \pm 0,5$, sendo que para cada material genético foi adicionado uma carga de álcali diferente a qual era necessário para deslignificação.

3.5. Caracterização da Polpa

3.5.1. Rendimento depurado da polpa

Os rendimentos em polpa, total e depurado, foram obtidos por método gravimétrico. As Equações 2 e 3 foram aplicadas para obtenção dos rendimentos total (Rt) e depurado (RD), respectivamente.

$$Rt = \frac{m}{M} \times 100 \quad (02)$$

M

em que:

Rt = rendimento total (%);

M = massa de cavacos (g) (base seca);

m = massa de polpa obtida após o término da polpação (g) (base seca).

Para obtenção do rendimento depurado, foi inicialmente calculado o teor de rejeitos (Tr), obtido pela relação percentual entre a massa seca de rejeitos e a massa seca de madeira.

$$Rd = Rb - Tr \quad (03)$$

em que:

Rd = rendimento depurado (%);

Rb = rendimento bruto (%);

Tr = teor de rejeito após depuração (%) (base seca).

3.4. Estimativa da Produtividade de Polpa de Celulose por Hectare

A maneira mais utilizada de se estimar a produtividade madeireira é por meio de redes de inventário florestal (CAMPOS; LEITE, 2006). Para efeito de estudos da produção volumétrica dos indivíduos, foi determinado o incremento médio anual (IMA), a partir do quociente entre o volume de madeira acumulado aos 6 anos e a idade do plantio (equação 4). As equações de volume utilizadas foram as propostas por Mattos (2015).

$$IMA_t = Vol_t / Idade_t \quad (4)$$

em que:

Volt = volume produzido em função da idade; Idadet = idade da floresta em anos.

A densidade básica da madeira é uma propriedade muito importante na indústria de papel e celulose, podendo ser utilizada para quantificar estoques de massa seca (BASTIN, 2015), uma vez que a produção de massa seca é calculada em função da densidade básica e do volume de madeira (equação 5).

$$MS = DB \times IMA \quad (5)$$

Em que:

DB = densidade básica

IMA= Incremento médio anual

Em seguida foi calculado o volume, em metros cúbicos sólidos, de madeira descascada necessário para a produção de 1 tonelada absolutamente seca de polpa de celulose não branqueada, em função do rendimento depurado e densidade básica dos clones de *Eucalyptus* (equação 6).

$$\text{CEM} = 1/(\text{DB} \times \text{RD}) \quad (6)$$

Onde:

CEM= Consumo específico de madeira

DB= Densidade básica

RD= Rendimento depurado

3.5. Análise dos Dados

3.5.1. Análise de variância

Foram realizadas análises de variância univariadas utilizando-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC), considerando como fator de variação o efeito de clone para as seguintes variáveis da madeira: densidade básica; teor de extrativos; teores de lignina, rendimento depurado, carga de álcali, Incremento Médio Anual, massa seca e consumo específico da madeira. Para comparação múltipla das médias, foi aplicado o teste de Tukey a 5% de significância.

3.5.2. Análises de correlação e regressão linear

Para avaliar as possíveis correlações existentes entre as variáveis utilizou-se a análise de correlação linear de Pearson adotando-se um nível de significância de 5% ($P \leq 0,05$).

Quando significativa, foi realizado a análise de regressão linear, no qual os modelos foram ajustados e avaliados pelo teste “F”, assim como o coeficiente de determinação e a significância dos coeficientes de regressão testados pelo teste “t” de Student a 5% de significância. Os gráficos de dispersão foram apresentados para as correlações significativas.

3.5.3. Análise multivariada

As análises multivariadas são um conjunto de métodos estatísticos que possibilitam a avaliação conjunta de variáveis relacionadas entre si, com diferentes significâncias. Para realizar o agrupamento dos clones semelhantes foi aplicada a análise de Cluster

pelo método da mínima variância de Ward, utilizando-se as variáveis: densidade básica, álcali efetivo e rendimento depurado, em função da distância euclidiana como medida de dissimilaridade entre os materiais genéticos. As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o pacote estatístico GENES versão 2.0 (CRUZ, 2016).

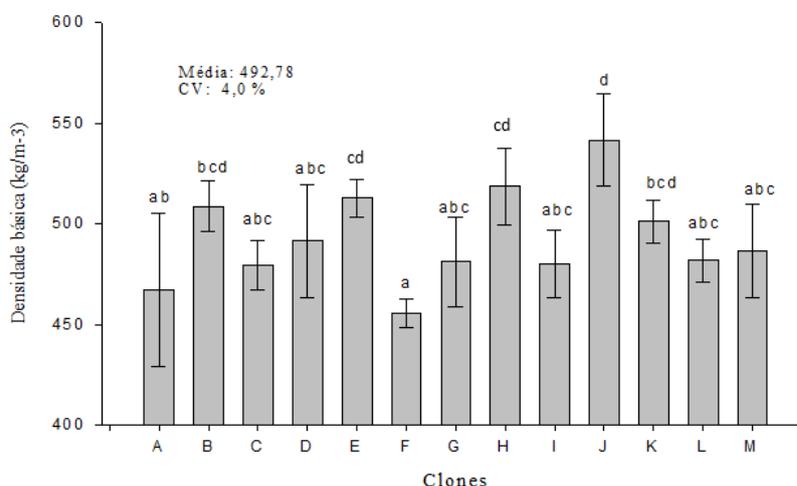
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização da Madeira

As densidades básicas dos clones comerciais de *Eucalyptus* spp. estão apresentadas na Figura 3. Os valores médios variaram de 455.52 a 541.72 kg.m⁻³ e a média geral foi de 492.78 kg.m⁻³. A análise de variância dos dados mostrou que os clones avaliados apresentaram diferenças significativas pelo Teste F ($P \leq 0,05$). Pelo teste de médias verificou-se que o clone F apresentou valores estatisticamente inferiores aos demais. Enquanto o clone J apresentou os maiores valores para a variável densidade básica. Os clones C, D, G, I, L e M diferiram dos demais mais não diferiram entre si, apresentando valores de densidade estatisticamente iguais de acordo com o teste de médias, sendo medianos para todos os clones avaliados.

Os valores encontrados nesse estudo são semelhantes aos encontrados por Abranches (2007), que estudando madeiras de clones de *Eucalyptus* para produção de celulose, encontraram valores médios de densidade básica de 487 kg.m⁻³, sendo o valor máximo 571 kg.m⁻³ e o mínimo 405 kg.m⁻³. Wehr e Barrichello (1992) mencionam que a densidade básica de madeiras do gênero *Eucalyptus* destinadas à produção de polpa de celulose deve variar entre 450 e 550 kg.m⁻³. Os valores obtidos dos clones deste estudo conferem com os dos autores mencionados, sendo considerados satisfatórios para a produção de celulose.

Figura 3. Densidade básica dos clones de *Eucalyptus* spp.



CV= Coeficiente de variação.
Fonte: Autor (2020)

Segundo Silva et al. (2015) são definidas três classes de densidade básica. Madeiras leves ($\leq 500 \text{ kg/m}^3$), madeiras médias ($510 - 720 \text{ kg/m}^3$) e madeiras pesadas ($\geq 730 \text{ kg/m}^3$). A partir dessa classificação, as madeiras dos clones utilizados neste estudo são tidas como de densidade de baixa à média.

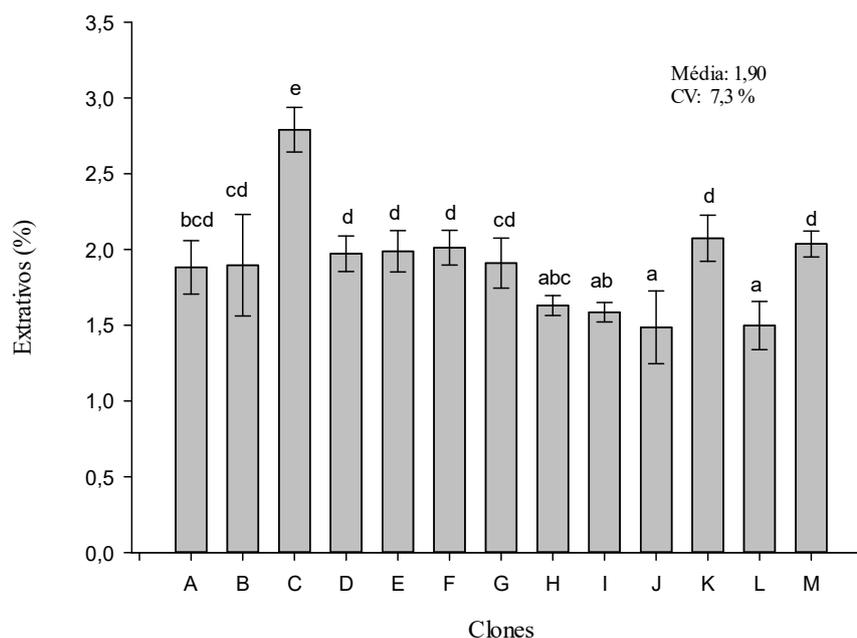
De acordo com Santos (2005), a estrutura do papel produzido de madeiras de alta densidade é mais porosa, possui alta opacidade e baixa resistência à tração, pois suas fibras possuem paredes espessas e diâmetro do lúmen pequeno e baixa área de ligação entre as fibras, conferindo baixa resistência ao papel. E em função da dificuldade de impregnação dos licores de cozimento em madeiras mais densas, as madeiras de baixa à média densidades são as mais indicadas para finalidade celulósica.

Outro relevante fator de qualidade da madeira é a sua composição química. Na figura 4 são apresentados os resultados dos teores de extrativos das madeiras de *Eucalyptus* utilizadas nesse estudo.

A análise de variância dos dados de extrativos totais mostrou que os clones avaliados apresentaram diferenças estatísticas significativas pelo Teste F ($P \leq 0,05$). Os valores de extrativos totais entre os clones estudados apresentaram variaram de 1,4 a 2,9 (%), com média de 1,9%. Esses valores foram superiores aos de clones avaliados por Gouvêa et al., (2009), no qual os materiais apresentaram teor de extrativos que variaram de 0,7% a 1,7% para produção celulósica. Porém, de acordo com os encontrados por Gomide et al. (2010) com teores de extrativos variando de 1,2 a 7,2% para 75 madeiras de clones de *Eucalyptus* spp.

A partir do teste de médias, verificou-se que o clone C apresentou os maiores valores para teor de extrativos, diferindo dos demais. Enquanto os clones J e L apresentaram os menores valores estatisticamente. Os clones D, E, F, K e M apresentaram valores iguais entre si estatisticamente, sendo teores de extrativos medianos em relação aos demais clones de *Eucalyptus* estudados.

Figura 4. Teor de extrativos dos clones de *Eucalyptus* spp.



CV= Coeficiente de variação.

Fonte: Autor (2020)

Os extrativos são, de modo geral, problemáticos devido à sua viscosidade e aderência. Vários compostos presentes nos extrativos podem se aglomerar, em etapas posteriores de processamento da pasta de celulose, formando depósitos nos maquinários das fábricas denominados pitch, sendo esse responsável por redução da produção, aumento no custo de manutenção e operação dos equipamentos e aumento de defeitos no produto final, com consequente redução na qualidade do mesmo (SILVÉRIO, 2008). Além disso, os extrativos têm relação inversa com o rendimento, podendo consumir mais reagentes de deslignificação e branqueamento, o que encarece o processo de polpação em indústrias celulósicas (VALETTE et al., 2017).

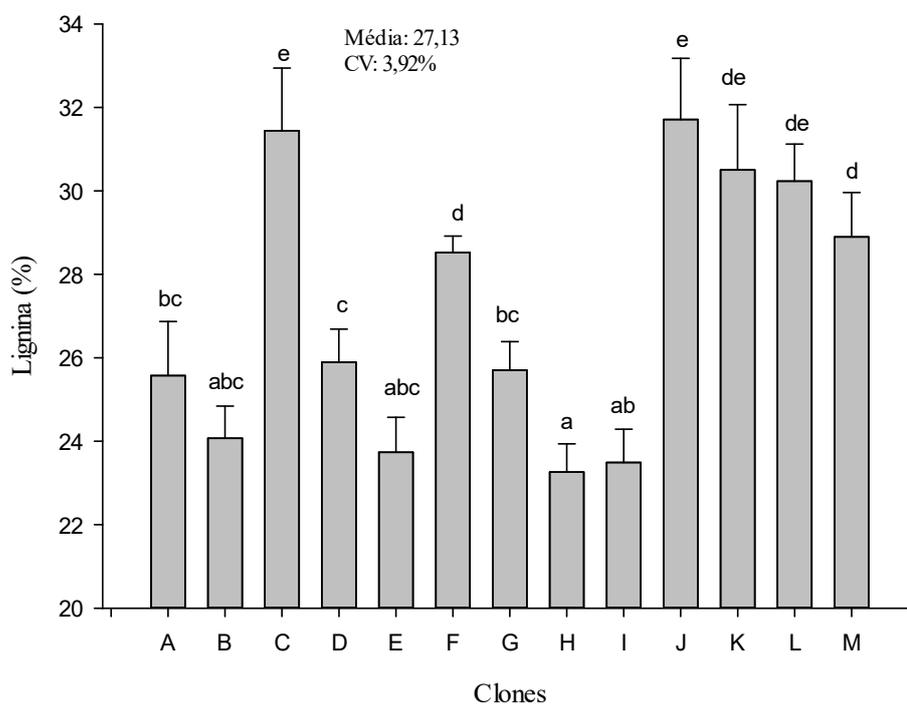
Segundo Manji et al., (2005), para contornar esses problemas provocados pelos extrativos nas polpas, as fábricas celulósicas têm desclassificado mais polpa de seus processos para produzir em conformidade com a especificação. A polpa desclassificada é perdida, ou recuperada, e, mais adiante, vendida por preço reduzido em razão de apresentar, em relação à limpeza, especificação inferior à da polpa requerida pelo mercado, afetando diretamente nos custos da empresa e reduzindo o lucro.

Em relação à concentração de lignina, os materiais apresentaram resultados satisfatórios para a produção de celulose, com variação de 23,2% a 32,7% e média de 27,1% (figura 5), valores compatíveis com os de Favaro (2015) ao avaliar a processos

de polpação de clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, que encontrou uma média 26,72% para o teor de lignina total.

A análise de variância dos dados de lignina mostrou que os clones avaliados apresentaram diferenças estatísticas significativas pelo Teste F ($P \leq 0,05$). A partir da análise de variância efetuada, verificou-se que os clones C e L apresentaram os maiores valores de lignina, enquanto o clone H apresentou apenas uma média de 23,2% de teor de lignina, apresentando o menor valor significativamente para a variável.

Figura 5. Teores de lignina para os clones de *Eucalyptus* spp.



CV: Coeficiente de variação.
Fonte: Autor (2020)

Apesar de maiores teores de lignina implicarem em menores concentrações das outras substâncias da madeira, como celulose e hemiceluloses e, conseqüentemente em menor rendimento em polpa, valores tão baixos podem provocar instabilidade e estresse à árvore, podendo ocorrer o tombamento, uma vez que a lignina está relacionada com a resistência da árvore para permanecer em pé e teores extremamente baixos comprometeriam essa característica.

A necessidade da árvore se manter em pé provoca diferenças nas propriedades anatômicas do lenho por assimetria biomecânica (BOSCHETTI et al, 2015). Além disso, alto teor de lignina na madeira pode afetar negativamente a deslignificação no processo de cozimento Kraft, pois como o objetivo da polpação é a remoção da lignina

para a liberação das fibras de madeira, um baixo teor de lignina na madeira favorece o desempenho da polpação e reduz o consumo de reagente de polpação e branqueamento (MORAIS et al., 2017). Os valores de lignina encontrados nesse estudo indicam que os clones em questão possuem características satisfatórias para facilitar o processo de fabricação de polpa celulósica.

A análise de variância realizada para a variável carga de álcali efetivo foi significativa pelo Teste F ($P \leq 0,05$). A variabilidade nos teores de carga de álcali efetivo demandadas pelos clones para polpação foi bastante ampla, variando de 15,1% até 21,7% (tabela 4). O clone M apresentou o maior valor de álcali efetivo, diferindo estatisticamente dos demais clones apresentados, enquanto o material I apresentou o menor valor para a variável. Os clones A, J não diferiram entre si, mas diferindo dos demais, os quais demandaram a mesma carga de álcali estatisticamente. Assim como os clones B e F.

Tabela 4. Cargas de álcali efetivo das polpas de *Eucalyptus* spp.

Álcali efetivo (%)		
Clones	Média dos clones	Desvio Padrão
A	17,2 abc	0,66
B	18,0 bcd	0,92
C	19,0 cd	0,44
D	17,4 bc	0,92
E	17,1 abc	0,46
F	18,0 bcd	0,59
G	18,6 cd	0,96
H	16,0 ab	0,86
I	15,1 a	1,28
J	17,2 abc	1,15
K	19,7 de	0,97
L	16,3 ab	0,72
M	21,7 e	1,10

Média geral: 17,8%; Coeficiente de variação: 5,6%; F calculado: 14,8.

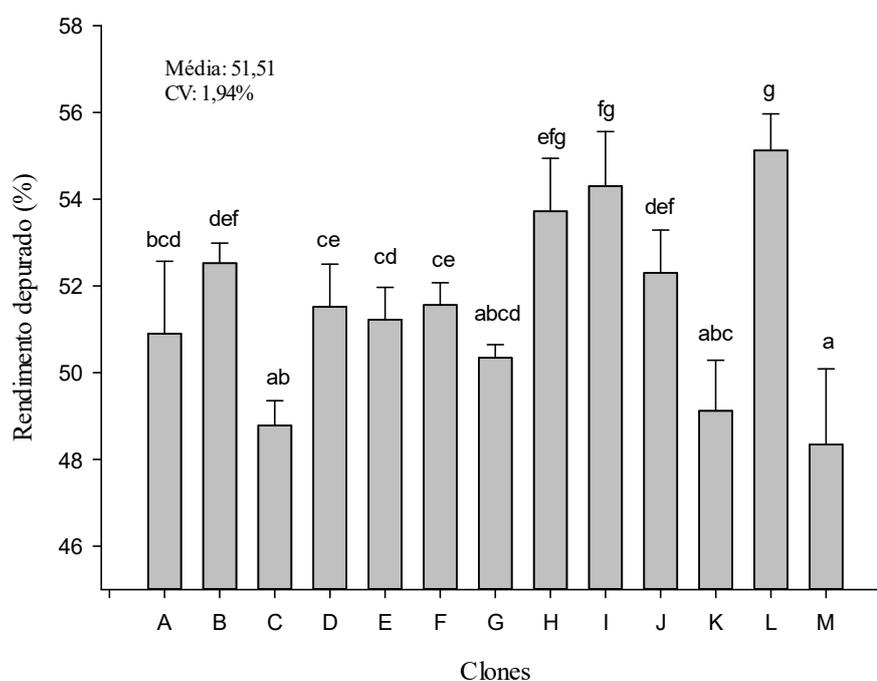
Fonte: Autor (2020).

De acordo com trabalhos publicados, um residual baixo e bem controlado de álcali garante uma maior conservação de carboidratos (celulose e hemiceluloses), resultando em benefícios ao rendimento do processo (STROMBERG, 2003). Pode-se concluir que valores altos de álcali efetivo não são desejados no processo de polpação química, uma vez que provoca degradação dos carboidratos, perdas no rendimento e consequentemente aumento no custo de produção para a deslignificação.

Os valores obtidos de rendimento depurado para os clones de *Eucalyptus* estudados estão apresentados na figura 6. A análise de variância realizada para a variável rendimento depurado foi significativa pelo Teste F ($P \leq 0,05$). Os clones apresentaram uma média de 51,5%, valores superiores aos encontrados por Rahmati et al. (2007) que investigaram a influência da sulfidez e da carga de álcali ativo nas propriedades da polpa de *Eucalyptus camaldulensis* e encontraram valores médios de rendimento da polpação equivalentes a 46,1%.

A partir do teste de médias, foi possível verificar que o material genético L apresentou os maiores valores em rendimento da polpação, enquanto o clone M apresentou os menores valores para a variável.

Figura 6. Rendimento Depurado dos clones de *Eucalyptus* spp.



CV: Coeficiente de variação
Fonte: Autor (2020)

É importante mencionar que alto teor de celulose e hemiceluloses está diretamente associado ao rendimento da polpação, constituindo uma vantagem para o material estudado no que tange a produção de polpa celulósica, com isso, com a diminuição de extrativos e lignina há maior aumento das outras características benéficas ao rendimento.

Os valores de rendimento depurado encontrados para os clones de *Eucalyptus* desse estudo considerados muito satisfatórios para as indústrias celulósicas.

4.2. Produtividade em Celulose

A análise de variância realizada para o Incremento Médio Anual e massa seca da madeira dos clones foi significativa pelo Teste F ($P \leq 0,05$). Os indivíduos avaliados apresentaram uma média de $27,77 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ para a variável. De acordo com teste de médias, o maior incremento entre os clones avaliados foi do material genético I, apresentando uma média $57,73 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, indicando que os indivíduos desse clone apresentaram alto índice de crescimento em volume aos 6 anos de idade no local estudado. Em razão deste alto valor de incremento, o mesmo clone obteve o maior valor de massa seca, no qual a média dessa variável para os clones estudados foi de $13,72 \text{ t/ha/ano}$ (tabela 5).

Em relação aos menores valores de IMA e massa seca de madeira, o material L foi o que obteve menores valores para as duas características, com $16,02 \text{ m}^3/\text{ha/ano}$ e $7,71 \text{ (t/ha/ano)}$ para IMA e massa seca, respectivamente. Isso pode ser explicado pelo fato de o clone em questão ser mal adaptado às condições climáticas do Estado de Minas Gerais e não se desenvolveram satisfatoriamente. Os clones A, C, H e K não diferiram entre si, assim como os B, D, E, F, J, L e M que diferiram dos demais, apresentando valores medianos, mas não diferiram entre si, apresentando valores significativamente semelhantes.

Tabela 5. Incremento Médio Anual e Produtividade das polpas de celulose por tonelada/hectare/ ano dos clones *Eucalyptus*.

Clones	IMA ($\text{m}^3/\text{ha/ano}$)		Massa seca (t/ha/ano)	
	Média	DP	Média	DP
A	33,91 b	6,31	15,84 b	3,79
B	25,43 ab	6,55	12,86 ab	3,38
C	33,53 b	4,62	16,31 b	2,42
D	23,57 ab	6,43	11,58 ab	3,81
E	24,89 ab	6,90	12,76 ab	3,47
F	23,82 ab	4,06	10,85 ab	1,99
G	17,62 a	3,14	8,16 a	1,72
H	32,11 b	2,94	16,65 b	1,96
I	57,73 c	25,08	27,70 c	12,50
J	24,61 ab	3,47	13,33 ab	1,60
K	30,76 b	2,78	15,41 b	1,56
L	16,02 ab	1,62	7,71 ab	0,90
M	25,51 ab	6,28	12,43 ab	3,05

DP= Desvio Padrão. Média geral do Incremento Médio Anual= $27,77 \text{ m}^3/\text{ha/ano}$; Média geral da massa seca da madeira = $13,72 \text{ t/ha/ano}$; Coeficiente de variação do Incremento médio Anual= 34,2; Coeficiente de variação da massa seca da madeira= 35,4.

Fonte: Autor (2020)

Em um estudo de Gomide et al., (2015), caracterizando os melhores clones de *Eucalyptus* cultivados no Brasil envolvendo as principais indústrias nacionais de celulose, demonstrou que esses plantios florestais no Brasil apresentam os mais elevados níveis mundiais de incremento médio anual (IMA). Os clones de *Eucalyptus* analisados neste estudo demonstram elevada produtividade, onde 20% dos clones atingiram IMA igual ou superior a 50 m³/ha/ano, e 70% dos clones apresentaram incrementos acima de 40 m³/ha/ano, estes valores são próximos da média nacional para *Eucalyptus* spp.

O consumo de madeira, em metros cúbicos sólidos, para a produção de uma tonelada de polpa de celulose ou pasta, está diretamente relacionado com a densidade básica da madeira e rendimento do processo. Conhecendo-se estes parâmetros é possível estimar, com relativa precisão, a necessidade de madeira.

A tabela 6 apresenta os valores em metros cúbicos sólidos de madeira descascada e necessária para a produção de 1 tonelada absolutamente seca de polpa de celulose não branqueada. A análise de variância realizada para o consumo específico da madeira dos clones desse estudo foi significativa pelo Teste F ($P \leq 0,05$).

Tabela 6. Metros cúbicos sólidos de madeira descascada, recém-cortada, para a produção de 1 tonelada absolutamente seca de celulose.

Clones	Consumo específico (m ³)	
	Média	Desvio Padrão
A	4,20 d	0,21
B	3,75 ab	0,08
C	4,16 d	0,08
D	3,94 bcd	0,21
E	3,80 abc	0,04
F	4,25 cd	0,09
G	4,12 d	0,17
H	3,58 a	0,06
I	3,83 abc	0,12
J	3,52 a	0,13
K	4,06 bcd	0,11
L	3,76 ab	0,05
M	4,25 d	0,21

Média geral consumo específico da madeira= 3,95 m³; Coeficiente de variação= 3,9.

Fonte: Autor (2020)

A partir do teste de médias realizado, os materiais genéticos A, C, F e M apresentaram os maiores valores para o consumo específico da madeira. Enquanto os

materiais J e H apresentaram os menores valores para a variável, diferindo significativamente dos demais clones, sendo um ponto positivo para a indústria celulósica, pois menores volumes de madeira serão requeridos para a produção de uma unidade de peso de celulose. Os demais clones apresentaram valores intermediários para a variável.

Segundo Foelkel (2017), madeiras mais densas, com menores teores de lignina e de extrativos e com alta taxa de rendimento de madeira em celulose durante a polpação Kraft oferecem melhores e mais baixos consumos específicos.

Dentre os fatores que conferem competitividade na indústria de celulose, a produtividade das florestas e a qualidade da madeira estão entre os mais importantes. Em razão disto, o aumento da produtividade florestal e a melhoria das propriedades tecnológicas da madeira, têm sido as principais demandas dos programas de melhoramento de *Eucalyptus* para a produção de celulose de fibra curta no Brasil.

4.3. Relações entre as variáveis

Na tabela 7 pode ser observado que a maioria das correlações foi estatisticamente significativa, principalmente nas características que afetam o rendimento em polpa. Todas as estimativas significativas apresentaram coeficiente de correlação superior a 0,60 (em valor absoluto), como as correlações entre álcali e rendimento (-0,80), lignina e rendimento (-0,78), lignina e álcali (0,87) e rendimento e extrativos (-0,67). A correlação da densidade com o rendimento (0,12) não foi significativa ($p > 0,05$), porém se correlacionou negativamente com o consumo específico da madeira (-0,80).

Tabela 7. Correlação entre as variáveis estudadas para os clones de *Eucalyptus* spp.

Variáveis	DB	CEM	AE	RD	LIG	EXT
DB	1,00	-0,80**	-0.10 ns	0.12 ns	-0.28 ns	-0.32 ns
CEM		1,00	0,45 ns	-0.60 **	0,10 ns	0,40 ns
AE			1,00	-0.80 **	0.87 *	0.48 ns
RD				1,00	-0.78 **	-0.67 *
LIG					1,00	0.79 **
EXT						1,00

*, **: significativo a 5% de probabilidade; ns: não significativo a 5% de probabilidade; DB = Densidade básica; CEM = Consumo específico da madeira; AE = álcali efetivo; RD = rendimento depurado, LIG = lignina; EXT = Extrativos totais.

Fonte: Autor (2020)

Na Tabela 8 estão apresentados os parâmetros da regressão linear simples ajustada para a relação entre rendimento depurado em função do teor da carga de álcali. A correlação e os parâmetros utilizados para a regressão foram significativos ($P < 0,05$), apresentando correlação negativa com coeficiente de correlação de -0,80, o que

demonstra que aumentos na carga de álcali proporcionam significativa queda no rendimento do processo. A representação gráfica da regressão e o modelo ajustado entre rendimento depurado e teor da carga de álcali estão mostrados na Figura 7.

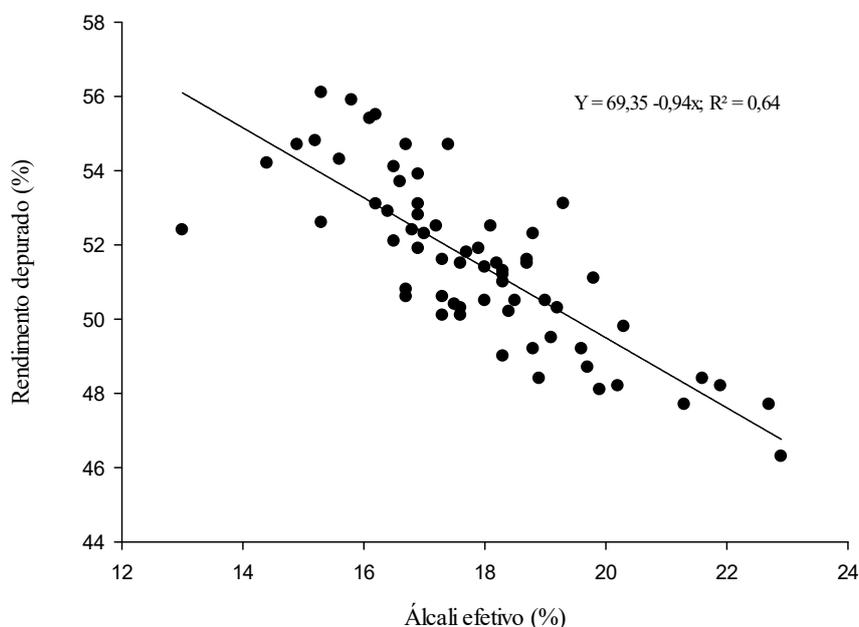
Tabela 8. Parâmetros da regressão linear simples ajustada para a relação entre rendimento depurado em função da carga de álcali efetivo.

Modelo	Coeficientes		F	R ²	R
	β_0	β_1			
RD = f(AE)	68,35*	-0,94*	113,28*	0.64	-0.80

RD: rendimento depurado; AE: álcali efetivo; F: F calculado; R²: coeficiente de determinação; R: coeficiente de correlação; ns: não significativo a 5%; *: significativo a 5%.

Fonte: Autor (2020)

Figura 7. Representação da análise de regressão entre álcali efetivo e rendimento depurado dos clones de *Eucalyptus* spp.



Fonte: Autor (2020)

Colodette et al. (2002) avaliaram o rendimento do processo de cozimento e a branqueabilidade da polpa kraft e concluíram que as polpas produzidas em baixo álcali residual apresentaram maior rendimento (1,7% - 2,1%), maior viscosidade (20% -30%) e propriedades de resistência mais altas. Assim como Pedrazzi et al., (2011), que em seus trabalhos observou que ao utilizar menores dosagens de álcali efetivo.

Abranches (2017) observou que menores valores de álcali efetivo resultaram em polpas de maior viscosidade. Esse resultado pode ser explicado devido às condições de processo utilizadas para a obtenção dos diferentes níveis de álcali efetivo.

Ek et al. (2001) descrevem que o aumento da carga alcalina do cozimento proporciona redução significativa do rendimento total do processo de polpação. Segundo os autores a queda no rendimento acontece, no caso de madeira de folhosas, devido à degradação das xilanas, as quais são sensíveis ao aumento da carga alcalina, causando impactos negativos na seletividade do cozimento.

Dessa forma, é possível confirmar que menores valores de álcali efetivo neste trabalho culminaram em uma maior preservação dos carboidratos, colaborando-se assim para um maior valor de pentosanas e conseqüentemente maior rendimento das polpas. O resultado encontrado da correlação entre as variáveis carga de álcali e rendimento depurado neste trabalho está de acordo com os mencionados.

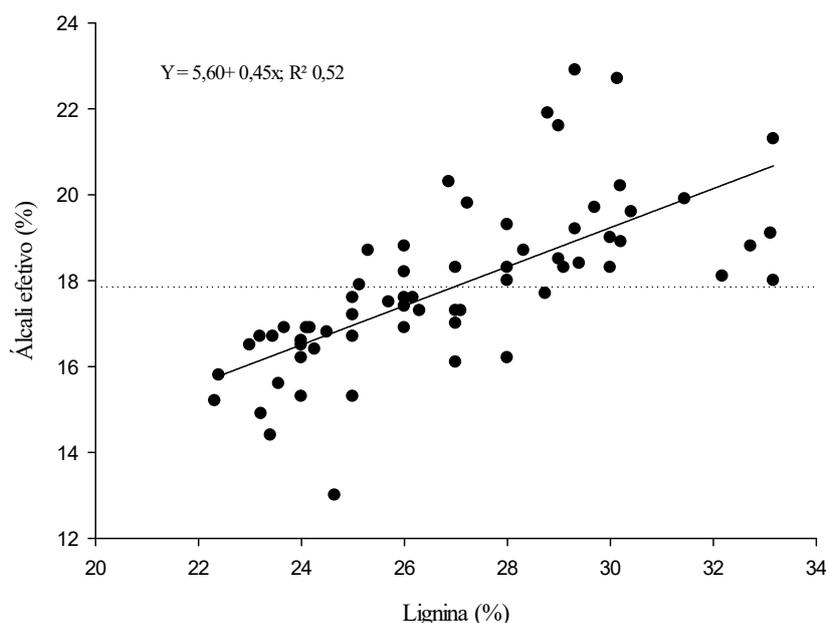
A correlação entre lignina e álcali efetivo foi alta apresentou um coeficiente de correlação de Pearson positiva de 0,87 (tabela 9), indicando que quando maior a concentração de lignina na madeira, maiores cargas de álcali efetiva serão necessárias para deslignificação do processo de polpação. Na Figura 8 estão a representação gráfica da análise de regressão e o modelo ajustado, o qual apresentou coeficiente de determinação de (R^2) de 0,52.

Tabela 9. Parâmetros da regressão linear simples ajustada para a relação entre álcali efetivo em função da do teor de lignina.

Modelo	Coeficientes		F	R ²	R
	β_0	β_1			
AE = f(LIG)	5,60*	0.45*	46,38*	0.52	0.72

AE: álcali efetivo; LIG: teor de lignina; tc: t calculado; F: F calculado; R²: coeficiente de determinação; R: coeficiente de correlação; ns: não significativo a 5%; *: significativo a 5%.
Fonte: Autor (2020)

Figura 8. Representação da relação de regressão entre as variáveis lignina e álcali efetivo.



Fonte: Autor (2020)

Uma vez que o intuito da polpação é promover a deslignificação, quanto mais lignina estiver contida na madeira, maiores serão as cargas de reagentes utilizadas para realizar a sua remoção. Isso impacta negativamente no processo industrial, uma vez que irá ter maiores custos com reagentes para uma polpação eficiente. Os resultados apresentados no presente trabalho confirmam, também, a importância da carga de álcali e da composição química no processo de polpação dos clones para o aumento da qualidade da polpa produzida.

O teor de lignina afetou também o rendimento, de forma negativa, com um coeficiente de correlação de -0,65 (tabela 10), o que indica que taxas altas de lignina no processo de polpação não são recomendadas. Evidenciando a importância da lignina como critérios de qualidade da madeira de *Eucalyptus* para produção de celulose. Na figura 9 é possível observar graficamente a relação de regressão entre as variáveis mencionadas.

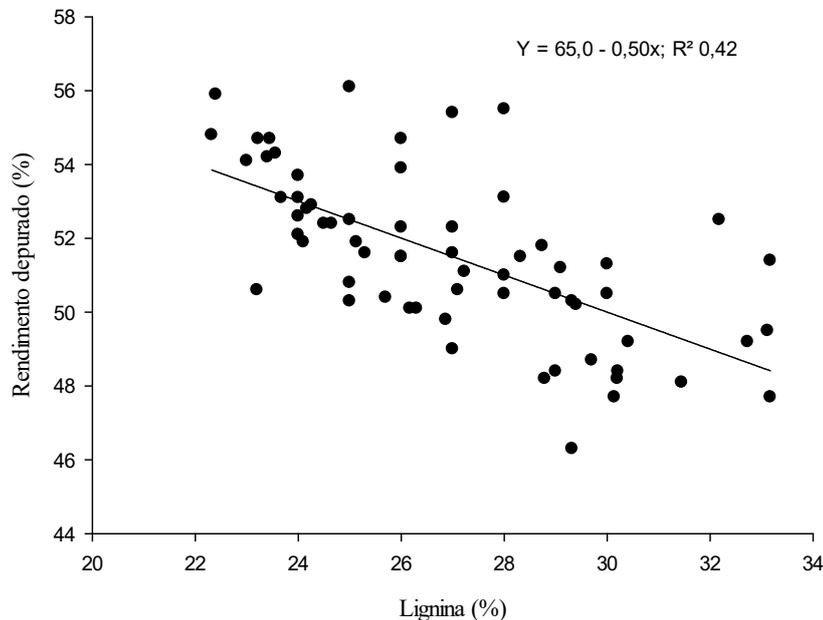
Tabela 10. Parâmetros da regressão linear simples ajustada para a relação entre rendimento depurado em função do teor de lignina.

Modelo	Coeficientes		F	R ²	R
	β_0	β_1			
RD = f(LIG)	65,03*	-0.50*	46,38*	0.42	-0.65

RD: rendimento depurado; LIG: teor de lignina; F: F calculado; R²: coeficiente de determinação; R: coeficiente de correlação; ns: não significativo a 5%; *: significativo a 5% pelo teste t.

Fonte: Autor (2020)

Figura 9. Relação linear entre rendimento depurado e teor de lignina para os clones de *Eucalyptus* spp.



Fonte: Autor (2020)

A lignina age como um material cimentante entre as fibras, dificultando a individualização dos mesmos no processo de polpação química, o que reduz o rendimento do cozimento (CELULOSE ON-LINE, 2019). Gomide et. al., (2010) em seus estudos também demonstraram que os teores de lignina da madeira afetam o rendimento do processo de polpação.

Bassa et al. (2007), observaram que o elevado teor de lignina na madeira de *Eucalyptus* provocou maior consumo de energia química e térmica para a individualização das fibras, para um Kappa proposto. Foelkel (2009) informa que o teor de lignina da madeira influencia diretamente o processo de polpação Kraft, pois afeta o consumo de álcali, a geração de sólidos secos no sistema de recuperação do licor, e o rendimento em celulose.

Outra característica da madeira que influenciou de forma negativa o rendimento foi o teor de extrativos, com coeficiente de correlação de -0,67 (tabela 11), o que é compreensível, uma vez que ocorre intensa remoção desses constituintes durante a polpação. Na Figura 10 estão representados o gráfico da regressão linear e o modelo ajustado entre as variáveis.

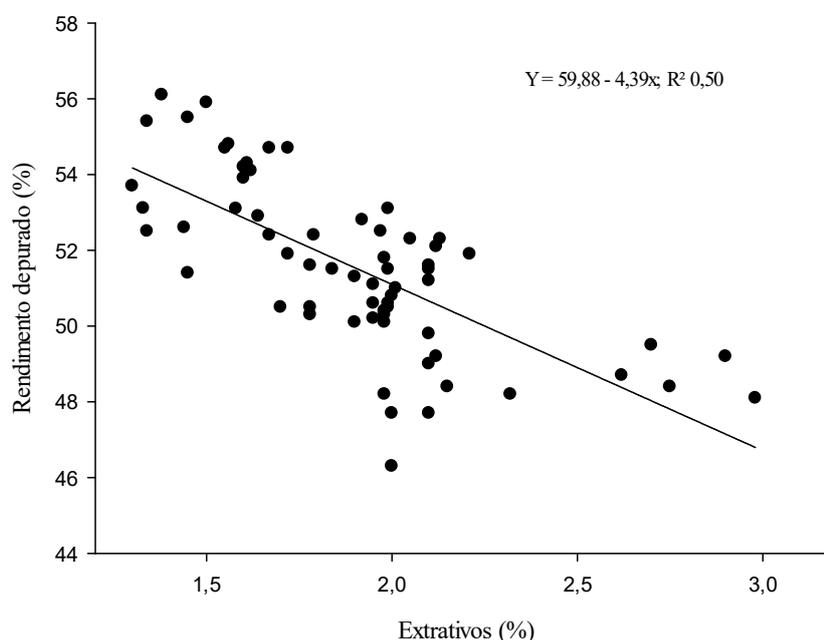
Tabela 11. Parâmetros da regressão linear simples ajustada para a relação entre rendimento depurado em função do teor de extrativos.

Modelo	Coeficientes		F	R ²	R
	β_0	β_1			
RD = f(EXT)	59,88*	-4,39*	63,17*	0.50	-0,70

RD: rendimento depurado; EXT: teor de extrativos; F: F calculado; R²: coeficiente de determinação; R: coeficiente de correlação; ns: não significativo a 5%; *: significativo a 5%.

Fonte: Autor (2020)

Figura 10. Representação da relação linear ajustada entre rendimento depurado e extrativos totais dos clones de *Eucalyptus* spp.



Fonte: Autor (2020)

A quantidade de extrativos influencia o rendimento de polpa celulósica, bem como interfere na quantidade de reagentes utilizada no processo e na qualidade da polpa e do papel. Este resultado confirma a importância dos extrativos como critérios de qualidade da madeira de *Eucalyptus* para produção de celulose.

A densidade básica apresenta forte correlação estatística com o consumo específico da madeira. O consumo específico da madeira pode ser interpretado como o volume de madeira necessário para se produzir uma tonelada de polpa celulósica, sendo de fundamental importância e, tendo em vista que a madeira representa entre 40 e 60% dos custos de produção de polpa celulósica (WRIGHT, 2006).

A correlação de -0.80 ($p < 0,05$) entre a densidade e o consumo específico (tabela 12) demonstra a importância da densidade no processo de produção de celulose, uma

vez que madeiras mais densas proporcionam menor consumo de madeira (m^3/t de celulose), o que favorece a produção de celulose no digestor e a manutenção de volume da pilha de cavacos nas fábricas. Uma correlação significativa era esperada, visto que a densidade é uma variável dependente do cálculo. Na Figura 11 estão a representação gráfica da linha de regressão e o modelo ajustado para consumo específico da madeira e densidade básica, no qual apresentou um R^2 de 0,64.

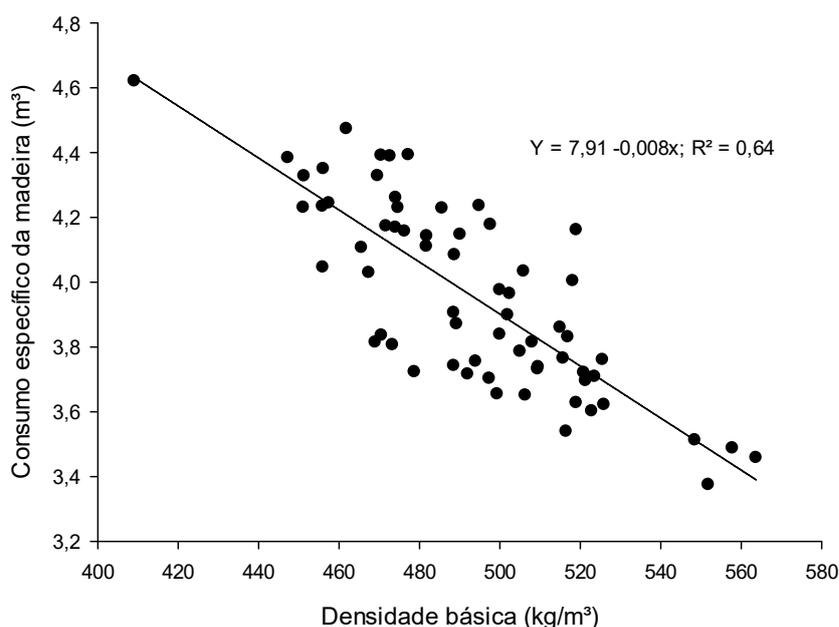
Tabela 12. Parâmetros da regressão linear simples ajustada para a relação entre consumo específico da madeira em função da densidade básica.

Modelo	Coeficientes		F	R^2	R
	β_0	β_1			
CEM = $f(DB)$	7,91*	-0.008*	113,24*	0.64	-0.80

CEM: consumo específico da madeira; DB: densidade básica; F: F calculado; R^2 : coeficiente de determinação; R: coeficiente de correlação; ns: não significativo a 5%; *: significativo a 5%.

Fonte: Autor (2020)

Figura 11. Regressão linear do consumo específico da madeira para produção de 1 tonelada de celulose com a densidade básica da madeira dos clones de *Eucalyptus*.



Fonte: Autor (2020)

O consumo específico da madeira também foi afetado negativamente pelo rendimento depurado das polpas de acordo com correlação de Pearson de -0,60 ($p < 0,05$) (tabela 12), indicando que quanto maior o rendimento depurado das polpas, menor o consumo específico da madeira para produção de 1 tonelada de celulose. Porém, o coeficiente de determinação da regressão linear não foi alta, com $R^2 = 0,50$, sendo

apresentado na figura 12 a representação gráfica e o modelo ajustado da regressão linear para as variáveis analisadas.

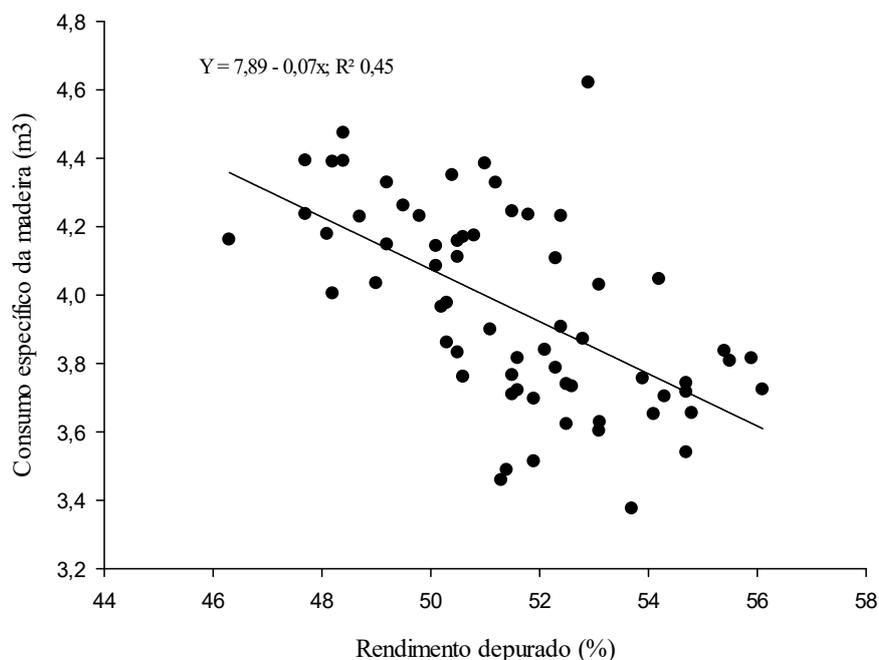
Tabela 12. Parâmetros da regressão linear simples ajustada para a relação entre Consumo específico da madeira em função do rendimento depurado.

Modelo	Coeficientes		F	R ²	R
	β_0	β_1			
CEM = f(RD)	8.42*	0.08*	11014*	0.50	-0.60

CEM: consumo específico da madeira; RD: rendimento depurado; F: F calculado; R²: coeficiente de determinação; R: coeficiente de correlação; ns: não significativo a 5%; *: significativo a 5%.

Fonte: Autor (2020)

Figura 12. Regressão linear entre o consumo específico da madeira para produção de 1 tonelada de celulose com rendimento depurado dos clones de *Eucalyptus*.



Fonte: Autor (2020)

Com o rendimento depurado o consumo específico da madeira obteve uma correlação de forma direta, uma vez que se utiliza de valores de rendimento para se estimar o consumo da madeira, e quanto maior o rendimento, menor o consumo específico da madeira.

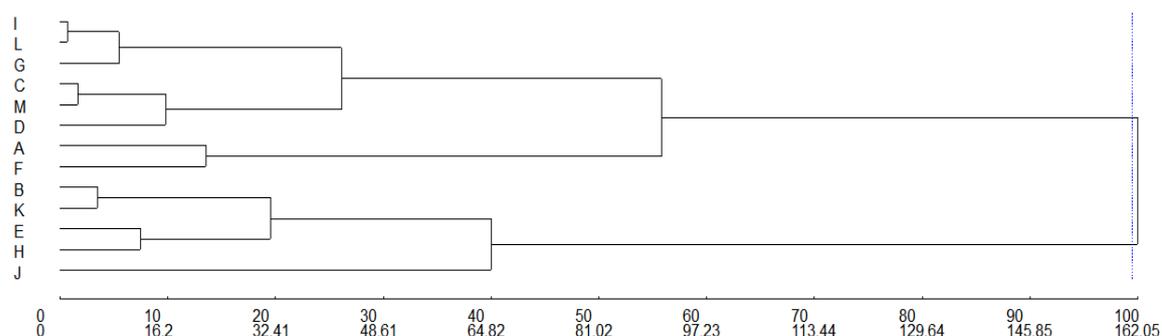
Estes resultados de correlações entre as variáveis demonstram a grande importância da qualidade da madeira num programa de melhoramento florestal para fins celulósicos,

uma vez que afetam grandemente no rendimento em polpas e produtividade das indústrias.

4.4. Análise de agrupamento dos materiais genéticos

Pela análise de agrupamento apresentada no dendrograma de similaridade (Figura 15), obtida a partir da análise de Cluster, utilizando-se a distância euclidiana como medida de dissimilaridade entre os clones, através do método da mínima variância de Ward, foram formados três grupos: o primeiro com os clones B, K, E, H e J, o segundo grupo com os clones A e F e o quarto com os materiais: I, L, G, C, M e D.

Figura 15. Agrupamento dos clones de *Eucalyptus* pelo método de Ward, utilizando-se a distância Euclidiana.



Fonte: Autor (2020)

Lobão et al. (2011) aplicou estatística multivariada para agrupar e identificar o potencial de uso de 12 espécies florestais (nativas e exóticas), a partir das propriedades anatômicas, físicas e químicas da madeira. Os autores concluíram que a análise de componentes principais foi mais eficiente que a estatística univariada (ANOVA) no agrupamento das espécies e na recomendação quanto ao uso da madeira.

As médias de cada grupo de clones formado neste estudo estão representadas na Tabela 13.

Tabela 13. Médias do agrupamento dos grupos quanto à qualidade e índices do processo de polpação para finalidade celulósica a partir da análise multivariada e do agrupamento dos clones de *Eucalyptus* spp.

Grupo	DB (Kg.m ⁻³)	AE (%)	RD (%)
1	516,00	17,2	51,8
2	461,42	17,8	51,2
3	484,53	18,0	50,4

DB= Densidade básica; AE= Álcali efetivo; RD= Rendimento depurado.

Fonte: Autor (2020)

O grupo 1 apresentou valores para densidade básica mais elevadas que os demais grupos, o que proporcionou um menor consumo específico da madeira para produção de celulose. Os grupos apresentam valores semelhantes em rendimento depurado, porém o grupo 1 obteve valores ligeiramente maiores em rendimento depurado da polpação em relação aos outros grupos, sendo explicado também pelo menor valor de carga de álcali efetivo utilizada no processo para deslignificação. O grupo 02 apresentou valores intermediários para as variáveis carga de álcali e rendimento depurado, porém apresentou os menores valores em densidade básica. Enquanto o grupo 03 apresentou os menores valores em rendimento depurado em função da maior carga de álcali efetivo utilizada no processo de polpação.

Os clones presentes no grupo 1 são os mais indicados para fins celulósicos, apresentando superioridade em relação aos demais grupos devido a seu alto índice de rendimento depurado, sendo a característica que mais se espera obter em níveis elevados no processo de polpação química, além de apresentar um menor consumo específico da madeira para produção de celulose em função da densidade superior aos demais grupos. Os materiais genéticos B e E presentes no grupo 1 são clones de *Eucalyptus grandis*, o H é de *Eucalyptus urophylla*, e os materiais J e K são híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. Os clones contidos no grupo 3 se apresentaram como os piores para a finalidade celulósica, uma vez que demandaram altas cargas de álcali efetivo e conseqüentemente obtiveram menor rendimento depurado.

Para o presente trabalho, essa técnica de análise multivariada foi eficiente ao ranquear as variáveis na madeira que ocorrem nos diferentes clones de *Eucalyptus* de forma a identificar as melhores correlações para as variáveis de resposta. A análise de agrupamentos classificou os grupos de modo que existiu homogeneidade dentro do grupo e heterogeneidade entre os grupos.

5. CONCLUSÕES

- A carga álcali afetou diretamente o rendimento depurado e foi afetada pela maior quantidade de lignina no processo. O Rendimento depurado também foi afetado pela maior concentração de lignina e extrativos.
- Pela análise de agrupamento apresentado no dendrograma de dissimilaridade foi possível obter três grupos. Os clones de *Eucalyptus grandis* (B e E), *Eucalyptus*

urophylla (H) e híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (J e K) formados no grupo 1 apresentaram-se como os melhores materiais genéticos para produção de polpa celulósica devido à sua menor necessidade de carga alcali, maiores conteúdos de rendimento em polpa e menor consumo específico de madeira para produção de celulose.

REFERÊNCIAS

- ABRAF. Anuário estatístico ABRAF ano base2005-2013/ABRAF. – Brasília: 2013. Disponível em: <www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF09-BR.pdf>. Acesso em 10 Jul. 2020.
- ABRANCHES, W.P.O. **Efeito do álcali efetivo residual na produção de polpa kraft branqueada de eucalipto**. 2017. 42 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2017.
- ALMEIDA, J.M.; GOMIDE, J.L.; SILVA, D.J. Dissolução dos constituintes da madeira de eucalipto ao longo dos processos kraft contínuo convencional e aditivado. **Revista árvore**, v. 24, n. 2, p. 215-222, 2000.
- ALVES, I. C. N. **Potencial da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage visando à produção de celulose kraft**. 2010. 62 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.
- ASSIS, T. F. Melhoramento genético de eucalipto: desafios e perspectivas. Nova Lima: **Embrapa Florestas**, 2014. 22p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11941: madeira – Determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7989: pasta celulósica e madeira: determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro, 2010. 6p.
- BASSA, A.G.M.C.; SILVA JUNIOR, F.G. da; SACON, V.M. Misturas de madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* para produção de celulose kraft através do Processo Lo-Solids. **Scientia Forestalis**, n.75, p.19-29, 2007.
- BASTIN, J. F. Wood specific gravity variations and biomass of central African tree species: the simple choice of the outer wood. **Plos One**, v. 10, n. 11, p. 142-146, 2015.
- BEECH, E.; RIVERS, M.; OLDIFIELD, S.; SMITH, P.P. Global Tree Search: the first complete global database of tree species and country distributions. **Journal of Sustainable Forestry**. 36, p. 454–489, 2017.
- BRANCALION, P.H.S., CHAZDON, R.L. Beyond hectares: four principles to guide reforestation in the context of tropical forest and landscape restoration. **Restoration Ecology**. 25, p. 491–496. 2017.

BOSCHETTI, W.T.N.; PAES, J.B.; OLIVEIRA, J.T.S.; DUDECKI, L. Características anatômicas para produção de celulose do lenho de reação de árvores inclinadas de eucalipto. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.50, n.6, p. 459-467, jun. 2015.

BRÄNNVALL, E. (2017). The limits of delignification in kraft cooking, **BioResources**, 12 (1) 2081-2107.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. Mensuração florestal: perguntas e respostas. 2. ed. Viçosa: UFV, 2006. 470 p.

CARDOSO, L.F. Efeito da temperatura na densidade e no rendimento gravimétrico de carvão de clones de eucalipto. **Ciência & Tecnologia**, Jaboticabal, v. 8, 2016.

CASTRO, C. A. O. Breve histórico do melhoramento genético do eucalipto no Brasil sob a ótica dos avanços biométricos. **Ciência Rural**, v. 46, n. 9, 2016.

CASTRO, A.F.N.M.; CASTRO, R.V.O.; CARNEIRO, A.C.O.; DE LIMA, J.E.; DOS SANTOS, R.C.; PEREIRA, B.L.C.; ALVES, I.C.N. Análise multivariada para seleção de clones de eucalipto destinados à produção de carvão vegetal. **Agropecuária brasileira**, Brasília, v. 48, n. 6, 2013.

Celulose On-Line. Introdução ao processo de obtenção de celulose. Disponível em: <<http://www.crq4.org.br/sms/files/file/dc417.pdf>>. Acesso em: 17 jun. 2020.

COLODETTE, J.L. Apostila de química da madeira do Curso de Pós-Graduação Strictu Sensu em Tecnologia de Celulose e Papel. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2001.

COLODETTE, J. L., GOMIDE, J. L., GIRAR, R., JÄÄSKELÄINEN, A. S., DIMISTRIS, S. A. (2002). Influence of pulping conditions on eucalyptus kraft pulp yield, quality, and bleachability, **Tappi Journal**, v.1 n.3, p.14-20.

CRUZ, Mariluze P. et al. Caracterização química do “pitch” em indústria de celulose e papel de Eucalyptus. **Quim Nova**, v. 29, p. 459-466, 2006.

CRUZ, C.D. Genes Software – extended and integrated with the R, Matlab and Selegen. **Acta Scientiarum**. v.38, n.4, p. 547-552, 2016.

D’ALMEIDA, M. L. O. Celulose e papel: Tecnologia de fabricação do papel. 2. ed. São Paulo: SENAI-IPT, 1988. v. 2, 964p.

DOBNER, M.; HUSS, J.; TOMAZELLO FILHO, M. Wood density of loblolly pine trees as affected by crown thinnings and harvest age in southern Brazil. **Wood Science and Technology**, v. 52, n. 2, p. 465-485, 2018.

EK, M.; GUSTAVSSON, C.; KADIRIC, J.; TEDER, A. Formation and dissolution/degradation of hexenuronic acids during kraft pulping of Eucalyptus globulus. In: BRAZILIAN SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF LIGNIN AND

- OTHER WOOD COMPONENTS. 7., Belo Horizonte, 2001. Proceedings... Belo Horizonte: UFV, 2001. p. 99-106.
- FANTUZZI NETO, H. **Qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose kraft**. 2012. Dissertação (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.
- FAVARO, J. S.C. Estudos da polpação kraft, branqueamento e refino de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. 2015. Tese (doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual Paulista- campus de Guaratinguetá, 180p.
- FOELKEL, C. A. Advances in Eucalyptus Fiber Properties & Paper Products. In INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON EUCALYPTUS PULP, 3., 2007, belo horizonte. Belo horizonte: UFV, 2007. P. 1-6.
- FOELKEL, C.E.B. O processo de impregnação dos cavacos de madeira de eucalipto pelo licor kraft de cozimento. In: FOELKEL, C.E.B. Eucalyptus online book & newsletter. São Paulo: **Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel**, 2009.
- FOELKEL, C. A. Madeira do Eucalipto para Produção de Celulose, n. 46, p. 106, 2017.
- GOLDSCHMIDT, O. Ultraviolet Spectra. In: SARKANEN, K. V.; LUDWIG, C. H, (Ed). Lignins: Occurrence, Formation, Structure and Reactions. Oxford: **Wiley-Interscience**, p. 241-266, 1971.
- GOMES, F. J. B. Aperfeiçoamento do branqueamento de polpa kraft da mistura de madeira de Pinus ssp. e Eucalyptus spp. pela sequência OQD*(PO)D e OQD*(PO)DP. Tese (Mestrado em Tecnologia de Celulose e Papel) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2010.
- GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C.; SILVA, C. M. Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de *Eucalyptus* do Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v.29, n.1, p.129-137, 2005.
- GOUVÊA, A.F.G.; TRUGILO, P.F.; COLODETTE, J.L.; LIMA, J.T.; SILVA, J.R.M.; GOMIDE, J.R. Avaliação da madeira e da polpação kraft em clones de eucaliptos. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.33, n.6, p.1175-1185, 2009.
- IBÁ- Indústria Brasileira de Árvores. Cenáriosibá. Áreas de Estatística e Comunicação Corporativa da Ibá.1º trimestre de 2020, São Paulo, 5p. 2020.
- IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>. >Acesso em: 27 jun. 2020.
- JARDIM, J.M.; GOMES, F.J.B.; COLODETTE, J.L.; BRAHIM, B.P. Avaliação da qualidade e desempenho de clones de eucalipto na produção de celulose. **Revista O Papel**, v. 78, n. 11, p. 122 - 129, 2017.
- KLEPPE, PJ (1970). Polpa Kraft. Tappi , 53 (1), 35-47.

KLOCK, U. Qualidade da madeira juvenil de *Pinus maximinoi* H. E. Morre. Curitiba. 2000. 297p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná.

KOMAN, S.; FEHER, S. Basic density of hardwoods depending on age and site. **Wood Research**, v. 60, n. 6, p. 907-912, 2015.

LOBÃO, M.S.; CASTRO, V.R. de; RANGEL, A.; SARTO, C.; TOMAZELLO FILHO, M.; SILVA JÚNIOR, F.G. da; CAMARGO NETO, L. de; BERMUDEZ, M.A.R.C. Agrupamento de espécies florestais por análises univariadas e multivariadas das características anatômica, física e química das suas madeiras. **Scientia Forestalis**, v.39, p.469-477, 2011.

MACEDO, L. A. **Influência da composição da biomassa no rendimento em condensáveis processo de torrefação**. 2012, 49 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2012.

MATTOS, E.M. **Caracterização da sazonalidade do crescimento do lenho, da copa e da eficiência do uso da luz em clones do gênero *Eucalyptus***. 2015. 130 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

MARCELINO, T.O.A.C. **Modelagem e Simulação da etapa de Caustificação do Processo Kraft de Extração de Celulose**. 2019, Dissertação (mestrado). Pós graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de campina grande. 2019.

MINGOTI, S. A. Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada. Belo Horizonte: **Editora UFMG**, 2005.

MOGOLLÓN, G.; HORTAL, J. A. G.; LEON, W. capítulo I Materias primas fibrosas. *Panorama de la Industria de Celulosa y Papel en Iberoamerica*. [S.l: sn, 2008, p 46.

MORAIS, P. H. D. et al. Influence of Clone harvesting age of *Eucalyptus Grandis* and hybrids of *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* in the wood chemical composition and in kraft pulpability. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 1, p. 237-248, 2017.

OLIVEIRA, S.; Metodologia de extração e determinação do teor de extrativos em madeiras de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 30, n. 6, 2006.

PEDRAZZI, Cristiane et al. Influência do processo de polpação e do conteúdo de xilanas da polpa na branqueabilidade. **O papel**, v. 72, n. 5, p. 37-55, 2011.

QUEIROZ, S. C. S.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C. 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.

RAHMATI, H.; NAVAE-ARDEH, S.; AMINIAN, H. Influence of sulfidity and active alkali charge on the properties from *Eucalyptus camaldulensis*. **Journal of Plant Sciences**, v. 2, n. 6, p. 600-606, 2007.

RAMIREZ, G.J.D.; QUINONEZ, L. M.; MANZO, S.V. Coeficientes de aserrío para cuatro aserraderos banda en el Sur de Jalisco. 2011. **Foresta-AN**. Nota técnica No. 5. UAAAN, Saltillo, Coah. p.12

RANDRUP, R.; *Resumos do XVII Congresso Anual da Associação Brasileira de Celulose e Papel*, São Paulo, Brasil, 1984.

ROWELL, R.; PETTERSEN, R.; HAN, J. S.; ROWELL, J. S.; TSHABALALA, M. A. Cell Wall Chemistry. In: ROWELL, R. M. (Ed.). *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. 2. ed. **Florida**: CRC Press Web, p. 35–74, 2005.

SARTO, C. **Estratégias para maximização do rendimento no processo kraft de polpação para madeira de eucalipto**. 2020, 98 f. Tese (doutorado), Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz. Piracicaba, 2020.

SILVA, C. J. DA; VALE, A. T. DO; MIGUEL, E. P. Densidade básica da madeira de espécies arbóreas de Cerradão no estado de Tocantins. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 82, p. 63–75, 2015.

SILVA, J.C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira**. 2002. 160 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais/ Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

SILVA, D. D. V.; FELIPE, M. G. A.; MANCILHA, I.M.; LUCHESE, R. H.; SILVA, S.S. Inhibitory effect of acetic acid on bioconversion of xylose in xylitol by *Candida guilliermondii* in sugarcane bagasse hydrolysate. **Braz J. Microbiol**, v. 35, p 248 – 254, 2004.

SILVA, C.A.F.; BUENO, J.M.; NEVES, M.R. A indústria de celulose e papel no Brasil. In: *Celulose e papel 2016-2017*. São Paulo: ABTCP, 2017.

SILVÉRIO, F.O. **Caracterização de extrativos de madeira de *Eucalyptus* e depósitos de pitch envolvidos na fabricação de celulose e papel**. 2008. 180f. Tese (Doutorado em Química)- Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2008.

SIMETTI, R.; BONDUELLE, G. M.; SILVA, D. A. Wood quality of five *Eucalyptus* species planted in Rio Grande do Sul, Brazil for charcoal production. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 30, n. 2, p. 175-181, 2018.

SIXTA, H. *Handbook of Pulp*. 1. ed., Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2006. 1316p.

SOUZA, F. M. L. de. **Estudo comparativo da madeira e polpação de *Eucalyptus urophylla* e do híbrido *E. urophylla* x *E. grandis* em dois modelos silviculturais**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu.

SOUZA, F. M. L. et al. Características de crescimento, densidade básica e composição química da madeira de *Eucalyptus* spp. na região de Ribas do Rio Pardo-MS. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 11, n. 4, p. 350-359, 2017.

TRAUTENMÜLLER, J. W. et al. Longitudinal variation of wood basic density of *Inga marginata* and *Chrysophyllum gonocarpum*. **Advances in Forestry Science**, v. 3, n. 3, p. 45-49, 2016.

TRUGILHO, P. F. et al. Características de crescimento, composição química, física e estimativa de massa seca de madeira em clones e espécies de *Eucalyptus* jovens. **Ciência Rural**, v. 45, n. 4, p. 661-666, 2015.

VALETTE, N.; PERROT, T.; SORMANI, R.; GELHAYE, E.; MOREL-ROUHIER, M. Antifungal activities of wood extractives. **Fungal Biology Reviews**, v. 31, n. 3, p. 113–123, 2017.

VIVIAN, M.A.; CORREA, R.; MODES, K.S.; PEDRAZZI, C.; DOBNER JUNIOR, M. Caracterização tecnológica da madeira de *Cupressus lusitânica* visando à produção de polpa celulósica. **Pesquisa florestal brasileira**, Colombo, v. 40, p. 1-9, 2002

WEDIN, H., LINDSTRÖM, M. E., RAGNAR, M. (2010). Extended impregnation in the kraft cook – An approach to improve overall yield in eucalypt pulping, **Nordic Pulp Paper Research Journal**, v.1, n.125, p. 7-14.

WU, J.; FAN, H.; LIU, W.; HUANGAN, G.; TANG, J.; ZENG, R.; HUANG, J.; LIU, Z. Should exotic *Eucalyptus* be planted in subtropical China: insights from understory plant diversity in two contrasting *Eucalyptus* chronosequences. **Environmental Management**. v.56, p.1244-1251, 2015.