

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

WENDEL PIANCA DEMUNER

PREDIÇÃO DO IMPACTO DA MADEIRA EM FÁBRICA  
KRAFT DE EUCALIPTO

JERÔNIMO MONTEIRO  
ESPÍRITO SANTO

2011

WENDEL PIANCA DEMUNER

PREDIÇÃO DO IMPACTO DA MADEIRA EM FÁBRICA  
KRAFT DE EUCALIPTO

Monografia apresentada ao  
Departamento de Engenharia  
Florestal do Centro de Ciências  
Agrárias da Universidade Federal  
do Espírito Santo, como requisito  
parcial para obtenção do título de  
Engenheiro Industrial Madeireiro.

JERÔNIMO MONTEIRO  
ESPÍRITO SANTO  
2011

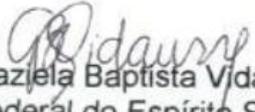
WENDEL PIANCA DEMUNER

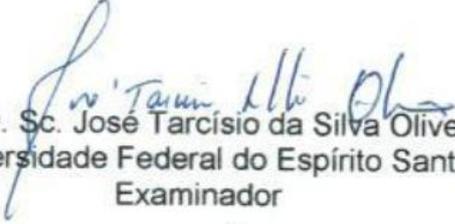
PREDIÇÃO DO IMPACTO DA MADEIRA EM FÁBRICA  
KRAFT DE EUCALIPTO

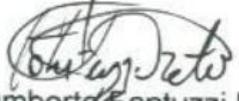
Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Industrial Madeireiro.

Aprovada em 11 de Novembro de 2011

COMISSÃO EXAMINADORA

  
Prof.<sup>a</sup> D. Sc. Graziela Baptista Vidaurre  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientadora

  
Prof. D. Sc. José Tarcísio da Silva Oliveira  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinador

  
Prof. MSc. Humberto Fantuzzi Neto  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinador

A Deus Pai todo poderoso, pelo dom da vida.

A meus pais, exemplo de vida, amor e dedicação aos filhos.

Aos amigos, que sempre estiveram presentes comigo nessa longa caminhada.

"No mercado de trabalho sua ousadia é o seu sucesso, pois vitórias fáceis, fazem soldados fracos."

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar sempre ao meu lado trilhando meu caminho.

Aos meus pais, Gilmar e Zélia, pelo carinho e amor, e por tudo o que fizeram para que eu realizasse todas as conquistas em minha vida.

A Fibria Celulose Unidade Aracruz, pela oportunidade de estágio.

Ao Centro de Tecnologia, por me ensinar e mostrar um caminho a seguir.

Ao Otávio Mambrim Filho, Jupiter Israel Muro Abad e Francisco Costa Neto pelos ensinamentos, orientação neste trabalho e amizade.

Ao Braz Demuner, por sempre me orientar a escolher um bom caminho e pela amizade.

Ao Gilmar Mateddi, pelos conselhos e amizade.

Aos analistas de laboratório e campo do Centro de Tecnologia da Fibria, pelos ensinamentos e amizade.

Aos professores da graduação Humberto Fantuzzi, Graziela Vidaurre e José Tarcísio Oliveira, por comporem a banca de TCCII.

Aos meus amigos que me incentivam a cada vez mais conquistar meus objetivos.

## RESUMO

Foram estudadas na madeira as suas características físicas e químicas; e a polpação química em número Kappa fixo de  $18 \pm 1$ . Estas propriedades e parâmetros adotados são fundamentais pois afetam o consumo específico de madeira, devido a interações entre estas variáveis, principalmente da densidade básica da madeira e rendimento depurado do cozimento. Aproximadamente 56% das áreas de corte para abastecimento da Fibria Celulose Aracruz em 2011 estão inclusas na classe de densidade I, abaixo de  $495 \text{ Kg/m}^3$ , devido á baixa média global da idade de corte, com 6,9 anos (valor fatorado). Na análise de densidade básica, a utilização de modelo estatístico de predição mostrou-se confiável quando correlacionados os resultados aos obtidos em laboratório pela análise convencional em amostragens, principalmente por idade, com alta correlação de 0,91. Quanto aos resultados de cozimento de mix de madeira em laboratório, o rendimento depurado para as 3 regiões estudadas mostraram-se semelhantes, variando na faixa de 54,2 a 54,9%, o que pode ser explicado devido a baixa variabilidade no teor de lignina, que variou entre 28,9 a 29,5% e extrativos totais, que variou entre 2,9 a 3,9%. O cálculo do consumo específico mostrou-se menos influenciado pelo rendimento depurado, sendo a densidade básica a variável de maior impacto na sua determinação. Os resultados obtidos proporcionaram um melhor direcionamento e alinhamento entre as áreas florestal e de produção de celulose, antecipando os impactos mensais e anual no abastecimento da madeira em 2011, visando um abastecimento de madeira estável quanto a sua densidade básica, podendo antecipar e corrigir possíveis desvios que podem ocorrer em alguns meses. Foram avaliados os resultados estimados entre os meses de 2011, sendo possível uma correção da sequência de corte nos meses que apresentaram maior consumo específico de madeira, garantindo assim maior estabilização de todo processo de produção de celulose.

Palavras-chave: Consumo específico de madeira, densidade básica, rendimento depurado, qualidade da madeira e modelo matemático.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>VIII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>01</b>
1.1 O problema e sua importância.....	02
1.2 Objetivos.....	03
1.2.1 Objetivo geral.....	03
1.2.2 Objetivos específicos.....	03
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>03</b>
2.1 Qualidade da madeira.....	03
2.2 Propriedades da madeira.....	04
2.2.1 Propriedades Físicas.....	04
2.2.1.1 Densidade Básica.....	04
2.2.2 Propriedades Químicas.....	05
2.2.2.1 Celulose .....	07
2.2.2.2 Hemicelulose.....	07
2.2.2.3 Lignina.....	08
2.2.2.4 Extrativos.....	09
2.3 Influência do melhoramento genético na qualidade da madeira.....	10
2.4 Modelagem matemática para predição da Densidade Básica.....	11
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>12</b>
3.1 Amostragem de madeira.....	12
3.2 Parâmetros determinados para coleta de amostras.....	13
3.3 Composição de mix de madeira para análise química e cozimentos.....	13
3.4 Projeções de densidade básica e consumo específico de madeira.....	14
<b>4 RESULTADOS DA PESQUISA .....</b>	<b>15</b>
4.1 Análise da amostragem de madeira.....	15
4.2 Análise global da área programada de corte 2011.....	16
4.3 Análise química e cozimentos de mix de madeira .....	16
4.4 Estimativa mensal de densidade básica e consumo específico de madeira para o ano de 2011.....	17
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>21</b>
<b>6 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>23</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição dos componentes principais na madeira.....	06
Tabela 2 - Classificação dos extrativos da madeira.....	10
Tabela 3 - Área programada e amostrada, com as respectivas médias de idade.....	12
Tabela 4 - Quantidade de amostras estabelecidas em função da área programada de corte 2011 para as regiões 1, 2 e 3.....	13
Tabela 5 - Distribuição percentual de amostras entre as classes de densidade I, II e III, para densidades determinadas através de método laboratorial (DBReal) e estimadas por modelo matemático (DBMod).....	15

## LISTAS DE FIGURAS

- Figura 1 - Comportamento das variáveis Rendimento Depurado, Lignina e Extrativos entre as regiões 1, 2 e 3.....17
- Figura 2 - Rendimento depurado, densidade básica e consumo específico de madeira real do ano de 2010, e valores estimados para as regiões estudadas 1, 2 e 3, com a média projetada 2011 das 3 regiões.....18
- Figura 1 - Distribuição mensal da DB estimada vs realizado na indústria em 2011.....19
- Figura 2 - Distribuição mensal do CMAD estimado vs realizado na indústria em 2011.....19

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria de celulose busca realizar o processo de produção com a máxima eficiência, menores custos de produção, melhor qualidade do produto final, mínima poluição ao meio ambiente, harmonia com a sociedade e retorno financeiro aos acionistas. Além destes, Leonardi (2010) ressalta que a competitividade do setor, que evoluiu consideravelmente a partir da década de 90, é fruto do avanço tecnológico florestal, desenvolvimento do processo, técnicas de excelência operacional e a capacitação profissional, garantindo a vantagem competitiva entre as empresas.

Dentre as diversas variáveis que afetam o processo de produção de celulose, destaca-se a qualidade da matéria-prima utilizada, principalmente pelo fato da madeira ser um material escasso e representar o maior custo na produção de celulose, na faixa de 50 a 60% do custo total. Devido a pouca possibilidade de controle da madeira pós-colheita, é prioritária a necessidade de que o abastecimento no pátio de madeira seja bem planejado, para que a vasta gama de madeira contenha características mais uniformes possíveis, influenciando diretamente na maior estabilização do processo industrial.

Os principais parâmetros para expressar a qualidade da madeira na produção de celulose é a densidade básica, teor de lignina e o teor de extrativos, que podem influenciar diretamente o rendimento depurado.

Estudos realizados por Gomide et al. (2004), retratam que o rendimento depurado é validamente aceito como parâmetro global na avaliação da qualidade da madeira, visto esta variável, depender das relações entre diversos fatores, como as características anatômicas, químicas e a demanda de álcali no cozimento. Nas décadas de 80 e 90, os clones alcançavam incríveis 50% de rendimento, hoje, devido a excepcional qualidade tecnológica também no processo de polpação, podem proporcionar patamares superiores a 53%.

A densidade básica é utilizada ao longo do tempo como índice universal para expressar a qualidade da madeira. Além de ser uma propriedade física relativamente fácil de ser determinada, expressa excelentes relações com as propriedades da polpa celulósica produzida, influenciando em sua qualidade e operações posteriores ao cozimento (OLIVETTI NETO, 2002; FOELKEL et al., 1990).

Devida importância da densidade básica, esta se torna uma propriedade muito importante comumente capaz de prever alguns comportamentos da madeira no processo de produção de celulose. Shimoyama & Barrichelo (1989) ressaltam a influência direta desta propriedade em toda cadeia produtiva, no rendimento depurado, na qualidade da celulose e nas propriedades físicas do papel.

Dentre os diversos componentes na fabricação de celulose e papel, a madeira é considerada a de custo mais elevado, havendo a real necessidade de que a madeira de abastecimento nas indústrias apresentem características desejáveis para produção de celulose.

Nos últimos anos, investimentos tecnológicos estão sendo direcionados para minimização do consumo específico de madeira, parâmetro este utilizado em empresas na avaliação da quantidade de madeira consumida ( $m^3$ ) para produção de celulose (ton) e que está intimamente relacionado com a densidade básica da madeira e rendimento em celulose no processo de depuração, variáveis estas que influenciam significativamente o seu valor final.

### **1.1 O problema e sua importância**

A variabilidade das características da madeira é um fator muito impactante em todo processo de produção de celulose. Características físicas e químicas da madeira, como a densidade básica, teores de lignina, extrativos e seu comportamento no processo de polpação, expresso pelo rendimento depurado, são fatores indicativos de qualidade da madeira. (MOKFIENSK et al., 2008).

A maior heterogeneidade da madeira acarreta diversas consequências, como a variabilidade e elevação do consumo específico de madeira, instabilidade do processo operacional e também da qualidade do produto final, elevando custos significativamente, principalmente em relação à madeira, que representa o maior custo de produção de celulose.

É de suma importância para uma indústria de celulose o controle constante da qualidade da madeira, havendo a real necessidade de alinhamento estratégico do abastecimento de madeira em função do mapeamento de suas características principais, servindo de base para balizar e orçar os custos referentes à madeira.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Caracterização físico-química de toda madeira própria de abastecimento da Fibria Unidade Aracruz, para este ano de 2011, estabelecendo com isso de forma preditiva a redução do consumo específico de madeira mensal e global e sua constância durante o ano.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Determinação da densidade básica (DB) da madeira amostrada;
- Composição de misturas de clones representativos das regionais amostradas;
- Cozimento Kraft – Rendimento Depurado (RD);
- Análise química de madeira e polpa;
- Construção e organização de banco de dados.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Qualidade da madeira**

A qualidade da madeira é bastante complexa de ser avaliada devido aos diversos fatores associados que influenciam diretamente suas características. Antunes (2009) define a qualidade da madeira como sendo uma variável expressa significativamente através da combinação entre suas características físicas, químicas, anatômicas e estruturais da árvore, que garantem características mais ou menos propícias na produção de celulose, como o rendimento do processo.

Souza et al. (1986) ressaltam a grande preocupação dos pesquisadores em relação à variabilidade desse parâmetro, que é altamente afetada pelo material genético de implantação, e também, pelos diferentes tipos de solos, idade de corte, sistema de implantação e condução da floresta, ritmo de crescimento, procedências, local de implantação e outros fatores ainda determinantes.

Alguns parâmetros se mostram bastante assertivos na projeção da qualidade da madeira. É o caso do rendimento depurado, que sofre influencia da composição química da madeira no processo de cozimento e da densidade básica, que segundo Ruy (1998) é um parâmetro muito interessante de avaliação e considerado como um dos mais importantes, visto a combinação com diversos outros fatores.

Segundo Queiroz et al. (2004), para a indústria de celulose uma avaliação adequada da densidade básica, a qual fornece indicações bastante precisas acerca da impregnação dos cavacos e rendimento do processo de cozimento e geralmente está associada às características de qualidade e de resistências físico-mecânicas da polpa.

A crescente demanda por polpas celulósicas com propriedades específicas vem estimulando pesquisas na busca de matérias primas ainda mais apropriadas. Fruto de árduos programas de melhoramento genético, as características ideais de qualidade da madeira para produção de celulose envolvem adequadas correlações entre suas propriedades físico-químicas e anatômicas, garantindo assim maiores rendimentos e menores perdas no processo de produção de celulose.

## **2.2 Propriedades da madeira**

### **2.2.1 Propriedades Físicas**

Na produção de celulose, as propriedades físicas da madeira são de extrema importância. Dentre as principais características, a densidade básica se destaca significativamente como sendo a mais importante, devido suas correlações com outras características da madeira, que influenciam diretamente no rendimento do processo produtivo e outros (BARRICHELO & BRITO, 1979).

#### **2.2.1.1 Densidade Básica**

Barrichelo & Brito (1979), afirmam que a densidade básica da madeira para produção de celulose é uma propriedade física muito importante, dadas suas relações com outras características da madeira, rendimentos de processos, velocidade de impregnação da madeira, refinação da celulose, propriedades das

celuloses e papéis, etc. Mokfienski et al. (2008), ressalta que a densidade básica da madeira de eucalipto possui relação ainda mais direta com a qualidade da polpa e características morfológicas das fibras, do que com sua composição química. Queiroz et al., (2004) conclui que a densidade básica, quando avaliada adequadamente, fornece subsídios bastante eficazes acerca da impregnação dos cavacos e rendimento do processo, estando fortemente relacionada com as características de resistências físico-mecânicas e qualidade da polpa.

Segundo Silva et al. (2001), a variação da densidade básica da madeira para produção de celulose deve ser entre 400 a 550 Kg/m<sup>3</sup>, ao contrário, pode afetar diretamente na qualidade dos cavacos, efeitos na operação de cozimento e também na qualidade da celulose resultante. Madeiras com densidade básica inferiores a 400 Kg/m<sup>3</sup> podem ser prejudiciais ao processo, como reduzir o rendimento de polpa base volume digestor, que pode resultar em redução de produtividade industrial. Já madeiras com densidade básica superiores a 550 Kg/m<sup>3</sup> tornam o processo de picagem de toras mais difícil, ocasionando desgaste superior das facas do picador, além da possibilidade de produção de cavacos com dimensões maiores que dificultam a impregnação de reagentes nestes, aumentando o teor de rejeitos no processo de polpação.

Foelkel et al., (1990) sugere cautela na comparação entre espécies diferentes com base na densidade básica, mas enfatiza o seu importante papel como índice na avaliação da qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose.

### **2.2.2 Propriedades Químicas**

A qualidade da madeira e do produto final de uma fábrica de celulose sofre muita influencia da composição química da madeira, havendo a real necessidade de sua caracterização, como o teor de lignina que impacta diretamente o processo de polpação e branqueabilidade da polpa celulósica (GOMES, 2002).

Ainda mais específico, Foelkel (1977) afirma que em relação ao processo de polpação, a composição química da madeira afeta diretamente o consumo de químicos no digestor, o rendimento depurado e o teor de sólidos gerados.

Segundo o mesmo autor, compreender a natureza química da madeira é essencial para aprofundamento de estudos relacionados a processos de produção e

branqueamento da celulose, a fim de melhorar as propriedades do produto final da pasta celulósica, o papel. Para isso é importante conhecer seus componentes químicos, que estão distribuídos conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Distribuição dos componentes principais e secundário na madeira.

Componentes	Distribuição na madeira (%)
Celulose	45 ± 2
Hemicelulose	30 ± 5
Lignina	20 ± 4
Extrativos (secundário)	3 ± 2

Fonte: Adaptado de Foelkel (1997).

Barrichelo & Brito (1979) ressaltam que os componentes químicos da madeira são usualmente divididos em dois grandes grupos: os componentes fundamentais e os componentes acidentais.

Os componentes fundamentais são representados como sendo a identidade da madeira, onde os compostos orgânicos estão presentes na estrutura da madeira em quaisquer circunstâncias, sendo eles a holocelulose e a lignina. A holocelulose nada mais é do que a fração de celulose, que é o principal componente da madeira, juntamente com as hemiceluloses, que podem ser subdivididas em hexosanas e pentosanas.

Os componentes acidentais são os compostos orgânicos e inorgânicos não essenciais para a estrutura das paredes celulares e lamela média. Geralmente são removidos da madeira através da utilização de solventes, com todas restrições adequadas para não afetar a estrutura física da madeira. Estes componentes são denominados extrativos e compostos minerais.

Qualitativamente e quantitativamente, a composição química da madeira é um fator de impacto na produção de celulose, influenciando todas as etapas no

processo de produção de celulose, desde o preparo da matéria prima para a produção de celulose até a qualidade do produto final (BARRICHELO & BRITO, 1979).

Para melhor compreensão de tais componentes, é de grande importância conhecer as características de cada um deles.

### **2.2.2.1 Celulose**

A celulose é um dos compostos químicos mais abundantes do planeta e é encontrada em todas as plantas do reino vegetal na forma de microfibrilas. As fibras com a mais pura celulose são as do algodão, de pureza aproximadamente igual a 99,8%, justificando a sua alvura.

A celulose é o principal constituinte da madeira, e em sua estrutura molecular está sempre associada à lignina e a hemicelulose em formas de fibras, que possuem características de alta resistência à tração e são insolúveis em álcalis diluídos, água, ácidos e solventes orgânicos neutros, tornando-a principal matéria prima em indústrias de celulose e papel (FOELKEL, 1977).

O mesmo autor cita que a celulose, também denominada macromolécula, é definida como sendo um polissacarídeo com estrutura altamente organizada e cristalina, de cadeia linear bastante extensa com aproximadamente 10.000 a 25.000 monossacarídeos em sua cadeia central. A celulose apresenta comportamento de grande resistência quanto ao seu rompimento quando em contato com reagentes. Sua estrutura é formada exclusivamente de unidades  $\beta$  - D - anidro - glucose ( $\beta$ -D - anidroglicopiranosose) unidas por ligações glicosídicas  $\beta$  (1-4).

### **2.2.2.2 Hemicelulose**

Os carboidratos das hemiceluloses estão presentes nos tecidos vegetais juntamente com a celulose e são definidos como sendo polímeros de baixo peso

molecular, geralmente amorfos, constituídos por uma cadeia central de unidades repetitivas com ramificações laterais geralmente curtas.. Em relação à celulose, são consideradas macromoléculas de menor extensão, conferindo cerca de 150 a 200 unidades de monossacarídeos em sua cadeia central (FOELKEL, 1977).

Segundo o mesmo autor, as hemiceluloses caracterizam-se ser juntamente a celulose, polissacarídeos da parede celular, com exceção do amido e substâncias pécticas, sendo constituídas por diversos monossacarídeos, podendo-se destacar os principais: Glucose, D-xilose, D-manose, D-galactose, L-arabinose, ácido D-glucurônico, ácido 4-O-metil-glucurônico, L-ramnose e L-frutose, além de diversos açúcares neutros metilados. Devido às inúmeras possibilidades de combinações dos monossacarídeos, as hemiceluloses são numerosas e variam significativamente em estrutura.

Foelkel (1977), afirma que na parede celular, as hemiceluloses encontram-se relacionadas juntamente à celulose e à lignina através de pontes de hidrogênio consistindo a estas substâncias ligações relativamente fracas, podendo ser isoladas do material original (ou deslignificação) por ação da água ou de soluções alcalinas como NaOH ou KOH.

### **2.2.2.3 Lignina**

A lignina é um composto indesejável na produção de celulose que pode proporcionar projeções sobre rendimento do processo de cozimento e consumo de reagentes na polpação (ANTUNES, 2009).

Foelkel (1977) afirma que a lignina é o composto mais indesejável da madeira para produção da pasta celulósica, pois provoca, além da elevação do consumo de reagentes no cozimento, o surgimento de substâncias coloridas que posteriormente escurecem o papel. Portanto é significativamente importante removê-la, através de processos de deslignificação economicamente balanceados, pois a medida que ela é decomposta, perde-se também rendimento em celulose.

A lignina pode ser observada mais detalhadamente quando são adicionados corantes em sua estrutura, ocasionando reações coloridas que facilitam sua identificação e distribuição. Os principais corantes da lignina são o floroglucinol + HCL, dando cor vermelha em presença de lignina e a safranina verde rápida, passando da cor verde para vermelha na presença de lignina (FOELKEL, 1977).

De acordo com o autor supracitado, a lignina distribui-se na parede celular e na lamela média. Na parede celular a lignina encontra-se unida às hemiceluloses, formando uma espécie de “rede” e revestindo as microfibrilas de celulose; já na lamela média atua como agente cimentante, mantendo as fibras unidas, dando resistência e rigidez à madeira.

Foelkel (1977), afirma que a lignina é um polímero tridimensional de estrutura e constituição química irregular, amorfo, predominantemente aromático e instável quimicamente. Possui alto peso molecular com unidades de fenil-propano ( $C_3-C_6$ ) unidas por ligações C-O-C e C-C.

#### **2.2.2.4 Extrativos**

Os extrativos são resultados de modificações sofridas pelos carboidratos no processo fisiológico da árvore. Parte dos extrativos desempenham atividades muito importantes no metabolismo da árvore, enquanto outros, não apresentam nenhuma função aparente, sendo indesejáveis no processo produtivo para produção de celulose, pois podem causar problemas como corrosão, incrustação, sujeira na celulose e dificultar o branqueamento da massa celulósica; no processo sulfito de madeiras com resinas, prolifera-se o aparecimento de pitch nos equipamentos e também na pasta celulósica (FOELKEL, 1977). O autor classifica os extrativos de acordo com a Tabela 3.

Tabela 2 – Classificação dos extrativos da madeira.

Classificação	Extrativos
Materiais de reserva	ácidos graxos, gorduras, óleos
Materiais de proteção	ácidos resinosos, fenóis, ceras
Hormônios vegetais	fitosterol, sitosterol

Fonte: Adaptado de Foelkel (1977).

A quantidade de extrativos presentes na madeira à base seca varia  $3 \pm 2$  %. Para extração destes componentes da madeira, existem algumas técnicas, procedimentos e metodologias sendo as mais comuns a utilização de substâncias extratoras como água fria e quente, álcool etílico, éter etílico, acetona, diclorometano, mistura de álcool e benzeno na proporção de 1:2, etc (FOELKEL, 1977).

### **2.3 Influência do melhoramento genético na qualidade da madeira para celulose**

O melhoramento genético de espécies florestais é fundamental na obtenção de florestas mais homogêneas, produtivas e com características desejáveis na produção de celulose e papel, a qual garante alto rendimento industrial da polpa celulósica e baixo custo operacional. Hoje, pode-se destacar o Urograndis como híbrido superior na produção de celulose no Brasil.

Segundo Gomide et al. (2010), em 1970 a produtividade das florestas era de aproximadamente  $15 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{ano}$ , diferença notória ao passar dos anos, já ultrapassando  $45 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{ano}$  em 2010. Além da elevada produtividade alcançada com o desenvolvimento tecnológico de materiais genéticos, outras características da madeira também foram modificadas ao longo dos anos, influenciando diretamente em melhores resultados no processo produtivo.

Alencar et al (2002), ressalta que o melhoramento genético no Brasil ainda pode ser mais eficiente na geração de novos clones superiores em termos de

rendimento e qualidade da polpa celulósica, onde a idade de corte da madeira é um fator primordial sobre o volume e a qualidade da madeira a ser obtida.

Um programa de melhoramento genético eficiente e desejável é aquele onde existem estreitas correlações entre as características tecnológicas da madeira e da polpa celulósica gerada. No entanto, para avaliação ideal da qualidade da madeira, é necessário que a mesma se encontre em idade de corte apropriada de acordo com a estratégia de melhoramento genético.

Diversas abordagens são encontradas na literatura em relação ao melhoramento genético de espécies superiores, com foco principalmente na densidade básica, pelo fato de ser uma das principais características de avaliação de qualidade da madeira além de ser relativamente fácil e simples a realização de amostragem e mensuração.

Além da densidade básica, outras características também devem ser estudadas visando maiores rendimentos no processo de produção, como características de fibras, parênquimas e vasos, bem como os teores de holocelulose, lignina, pentosanas, extrativos e cinzas.

#### **2.4 Modelagem matemática para predição da densidade básica**

Existem diversos modelos matemáticos que em função de parâmetros arquivados em banco de dados, permitem com precisão e rapidez a estimativa de resultados laboratoriais necessários.

Convencionalmente, através de métodos destrutivos, a determinação da densidade básica da madeira não é imediata, podendo levar dias para geração de resultados.

Objetivando resultados de análises antecipadamente, ao longo do tempo foram desenvolvidas modelagens matemáticas capazes de inferir com rapidez e precisão a avaliação de algumas propriedades da madeira que influenciam na qualidade da celulose, como a densidade básica, o teor de lignina, entre outros (THIERSCK et al., 2006).

Segundo o mesmo autor, são inúmeras as vantagens encadeadas referentes à utilização de modelos matemáticos, dos quais impactam diretamente as duas principais atividades da empresa florestal: O planejamento florestal, com o ajuste do

plano de suprimento de acordo com a demanda de madeira necessária e a área de pesquisa, com possibilidade de avaliação precoce de diferentes materiais genéticos. Outra grande vantagem com a utilização de modelos matemáticos, visando prever as características principais da madeira, é a ausência da necessidade do preparo de amostras e a simplicidade do procedimento, minimizando custos, tempo de amostragem e HH (homem-hora).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Amostragem de madeira

As áreas de corte para abastecimento de madeira da Fibria, unidade Aracruz, em 2011 abrangeu 3 diferentes regiões de plantios próprios, sendo consideradas para seu planejamento as 3 principais variáveis influentes nas características da madeira: idade de corte, material genético e área de plantio.

Em seguida, foi elaborado o programa de amostragem de madeira, em função das áreas de corte estabelecidas, com objetivo de representar significativamente toda madeira de abastecimento. A área amostrada é aproximadamente 15% da área total programada de corte.

Tabela 3 – Área\* programada e amostrada, com as respectivas médias de idade\* para as regiões 1, 2 e 3.

Região	Área programada de corte 2011 (ha)	Média de Idade (anos)	Área amostrada (ha)	Média de Idade (anos)
1	8082,7	6,9	1298,8	7,0
2	12154,2	6,7	2230,5	6,8
3	24435,3	7,0	2760,4	7,0
Total geral	44672,2	6,9	6289,7	7,0

\* Áreas e Idades fatoradas.

Para fiel representação, foi determinada a coleta de 384 amostras, sendo distribuídas conforme o montante de área de corte 2011 de cada região considerada, de acordo com a tabela 5.

Tabela 4 – Quantidade de amostras estabelecidas em função da área\* programada de corte 2011 para as regiões 1, 2 e 3.

Região	Área programada de corte 2011 (ha)	Área (%)	Quantidade de amostras / região
1	8082,7	18	94
2	12154,2	27	100
3	24435,3	55	190
Total geral	44672,2	100	384

\* Áreas fatoradas.

### 3.2 Parâmetros determinados para coleta de amostras

Foram coletadas 3 árvores médias em cada um dos 384 talhões amostrados, e reduzidas a toretes. Cada torete apresentou comprimento médio de 1m, cortados a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial da árvore, 7 cm de diâmetro. Em seguida 15 toretes de cada talhão, foram submetidos a picagem para formação das amostras em cavaco.

### 3.3 Composição de mix de madeira para análise química e cozimentos

A composição dos mix de madeira foi determinada através da ferramenta do Microsoft Excel denominada Planilha Dinâmica, na qual foram selecionados os materiais genéticos e áreas mais representativas do programa de corte 2011, podendo expressar os resultados laboratoriais de forma fiel e significativa, quanto a qualidade da madeira de abastecimento e seus impactos no processo industrial de produção de celulose no decorrer do ano. Foram compostos 6 mix de madeira para cada região, totalizando 18 mix.

Algumas características de cozimento são essencialmente relevantes para obtenção de resultados, como a variação do número Kappa entre  $18,0 \pm 1,0$  e o residual de álcali efetivo entre 1 e 5 g [NaOH]/l, visando sempre gerar um número médio de rendimento depurado de celulose, que é fundamental para o cálculo do consumo específico de madeira.

As amostras de madeira em mix também foram submetidas à análise química para determinação de extrativos (etanol tolueno e acetona) e lignina (solúvel e insolúvel).

### 3.4 Projeções de densidade básica e consumo específico de madeira

Com base na amostragem de madeira, as áreas foram estratificadas em três classes de densidade, sendo (I)  $< 495 \text{ kg/m}^3$ , (II)  $495 - 520 \text{ kg/m}^3$  e (III)  $> 520 \text{ kg/m}^3$ . Para classificação, foram consideradas duas abordagens: (1) projeção baseada na amostragem considerando localização da área, idade e material genético; e (2) Projeção baseada em modelo estatístico. Em seguida, as abordagens (1) e (2) foram comparadas entre si.

As análises de densidade foram feitas para as 384 amostras de cavacos, sendo 94, 100 e 190 amostras referentes as regiões 1, 2 e 3, respectivamente, representando na mesma intensidade a madeira de abastecimento da seqüência de corte 2011. Foram comparados os resultados estimados através do modelo estatístico de predição de densidade básica, denominada **DBMod**, e a densidade básica de cavacos determinada por método laboratorial tradicional, a **DBReal**.

Para determinação do consumo específico de madeira, foi utilizada a equação matemática da Fibria, na qual requer como variáveis a densidade básica da madeira e o rendimento depurado em celulose, considerando as principais perdas referentes ao processo, como perdas no pátio de madeira, na depuração e no branqueamento.

Por motivos de confidencialidade, as equações não podem ser expressas.

## 4 RESULTADOS DA PESQUISA

### 4.1 Análise da amostragem de madeira

Foram elaboradas três classes de densidade básica e distribuídos os valores encontrados tanto para DBMod quanto para DBReal (Tabela 6).

Tabela 5 - Distribuição percentual de amostras entre as classes de densidade I, II e III, para densidades determinadas através de método laboratorial (DBReal\*) e estimadas por modelo matemático (DBMod\*).

Classes	Parâmetro (Kg/m <sup>3</sup> )	% amostras	
		DBMod	DBReal
I	< 495	55	56
II	495 - 520	30	32
III	> 520	15	12
Total		100	100

\* Densidade básica fatorada.

Verifica-se de acordo com a Tabela 6, que o modelo estatístico se mostrou confiável na correlação entre os resultados, apresentando valores semelhantes aos do método laboratorial de determinação da densidade básica.

Verificou-se intensa concentração das amostras na classe de densidade I, o que pode-se concluir que aproximadamente 56% da madeira de abastecimento no ano de 2011 possui baixa densidade básica, abaixo de 495 Kg/m<sup>3</sup>. Este fato pode ser explicado devida a baixa idade de corte, com média global de 7 anos, e também pelo fato de que 55% das áreas do plano de corte estarem inclusas na região 3, região esta sendo representada com 74% das amostras inclusas na classe de densidade I, influenciando diretamente o consumo específico de madeira para 2011.

## **4.2 Análise global da área programada de corte 2011**

Com base nas amostragens, foi estimada a densidade para as demais áreas e talhões do plano de corte 2011, e comparada DBMod vs DBReal, agora considerando as variáveis principais que podem afetar as características da madeira: Clone, Área e Idade. Para cada região amostrada, foram comparadas DBMod vs DBReal (Clone), DBMod vs DBReal (Área) e por fim DBMod vs DBReal (Idade).

Pela análise de correlação, a melhor estimativa entre DBMod e DBReal, é o ajuste através de Idade, com 0,91 de correlação entre resultados, seguido do ajuste por Clone com 0,78 e por fim Área com 0,52 de correlação.

Determinada a estimativa de densidade básica para os demais talhões das áreas de corte 2011, foi realizada a distribuição mensal da densidade básica em 2011, aleatoriamente baseada em DBReal e estatisticamente em função da idade. É importante destacar que podem ocorrer variações nos valores estimados de densidade básica, pois deve-se considerar que aproximadamente 25% da madeira de abastecimento é proveniente de fomento, não havendo possibilidade de um controle rigoroso de qualidade como realizado para as madeiras provenientes de áreas próprias de plantio através de amostragens.

## **4.3 Análise química e cozimentos Kraft de mix de madeira**

As características químicas da madeira podem impactar diretamente nos resultados de rendimento depurado do processo e nos consumos específicos de madeira, conforme Figura 1.

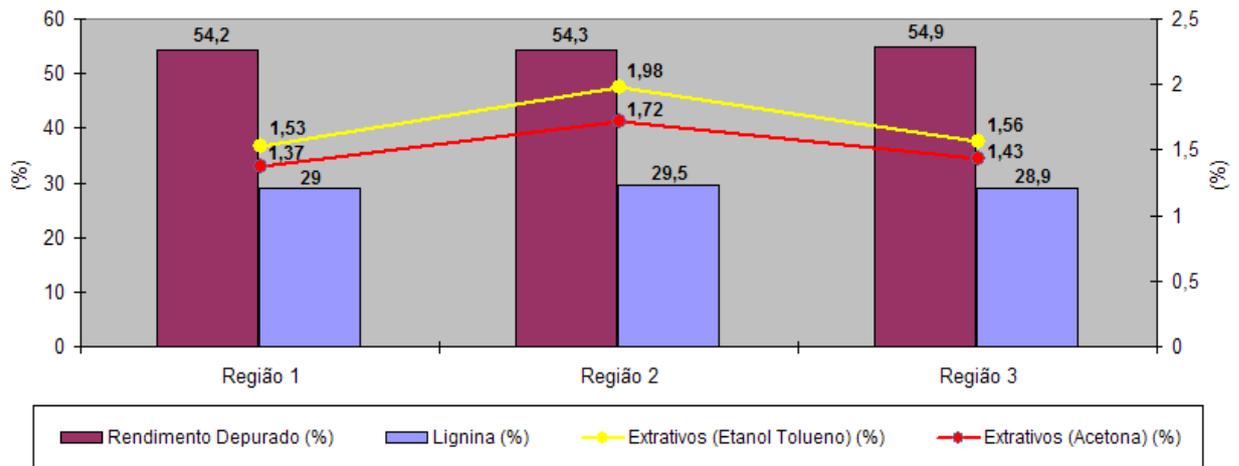


Figura 1 - Comportamento das variáveis Rendimento Depurado, Lignina e Extrativos entre as regiões 1, 2 e 3.

Conforme resultados expressos na Figura 1, as análises de lignina não apresentaram diferenças significativas entre os valores encontrados para as 3 regiões, contribuindo diretamente e também justificando a determinação de semelhantes resultados de rendimento depurado entre elas. As análises de extrativos revelam baixa influência no rendimento depurado para a madeira estudada, com destaque para a região 2, que apesar de possuir o maior percentual de extrativos, não foi a que apresentou o menor rendimento depurado, apesar da semelhança com a região 1.

#### 4.4 Estimativa mensal de densidade básica e consumo específico de madeira para o ano de 2011

De acordo com a Figura 1, o rendimento depurado estimado para as madeiras provenientes das 3 regiões apresentaram valores bem semelhantes entre si, e em média, 3% superior ao real de 2010. Visto a semelhança, é notório que a variação entre os valores estimados de consumo específico de madeira é altamente influenciada pela densidade básica, que diferem entre uma região e outra, de acordo com a Figura 2. Os resultados entre rendimento depurado projetado 2011 e real 2010 podem ser correlacionados, pois de acordo com trabalhos internos já desenvolvidos, existe similaridade entre rendimento depurado laboratorial e industrial.

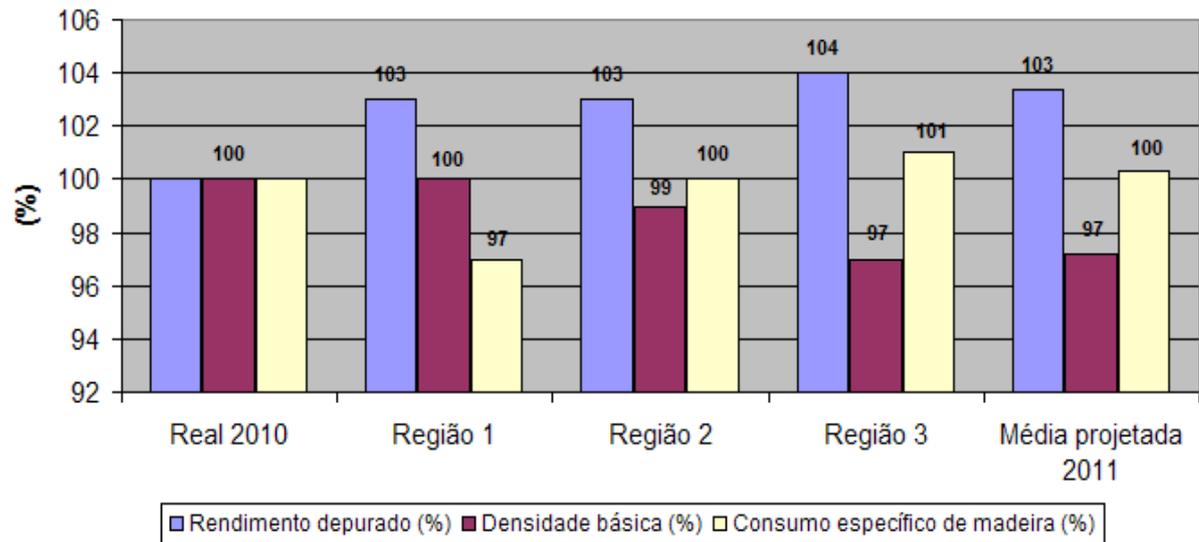


Figura 3 - Rendimento depurado, densidade básica e consumo específico de madeira real do ano de 2010, e valores estimados para as regiões estudadas 1, 2 e 3, com a média projetada 2011 das 3 regiões.

A região 1 apresentou a maior média de densidade básica, seguidas pela região 2 e 3, obtendo média global de 3% inferior ao ano de 2010. Esta “escala” decrescente de grandeza para densidade entre as regiões é claramente vista no gráfico, gerando como consequência, o gradativo aumento dos valores de consumo específico de madeira. A região 1 apresentou menor valor de consumo específico de madeira, seguida pelas regiões 2 e 3, reforçando o impacto direto da densidade básica sob esta variável. A média de consumo específico de madeira das 3 regiões para 2011 foi semelhante a de 2010, visto apresentar maior valor de rendimento depurado, e menor de densidade básica.

Conhecidas densidades das madeiras de abastecimento 2011, foram distribuídos mensalmente os valores de densidade básica conforme Figura 3, que além da análise de dados para planejamentos de operação e controle, tem como objetivo tornar viável o cálculo mensal do consumo específico de madeira.

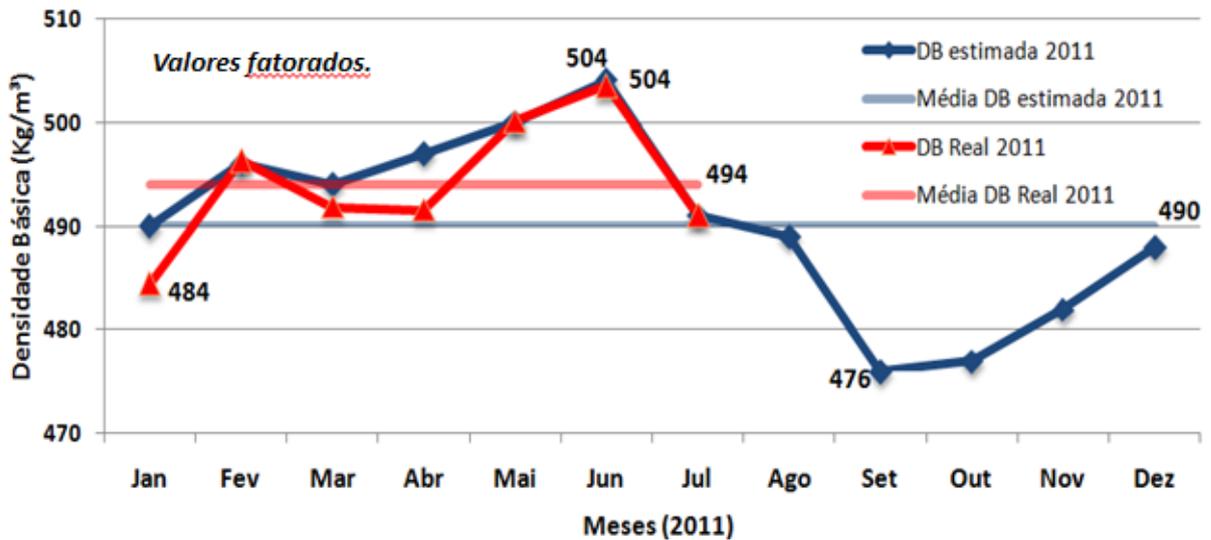


Figura 4 - Distribuição mensal da DB estimada vs realizado na indústria em 2011.

Os meses de setembro, outubro e novembro apresentaram médias inferiores de densidade básica em relação aos demais meses, ocasionando aumento direto do consumo específico de madeira para os mesmos.

Com base na distribuição mensal de densidade básica e no rendimento depurado proveniente dos cozimentos de mix de madeira, foram calculados e distribuídos mensalmente o consumo específico de madeira para o ano de 2011, conforme a Figura 5.

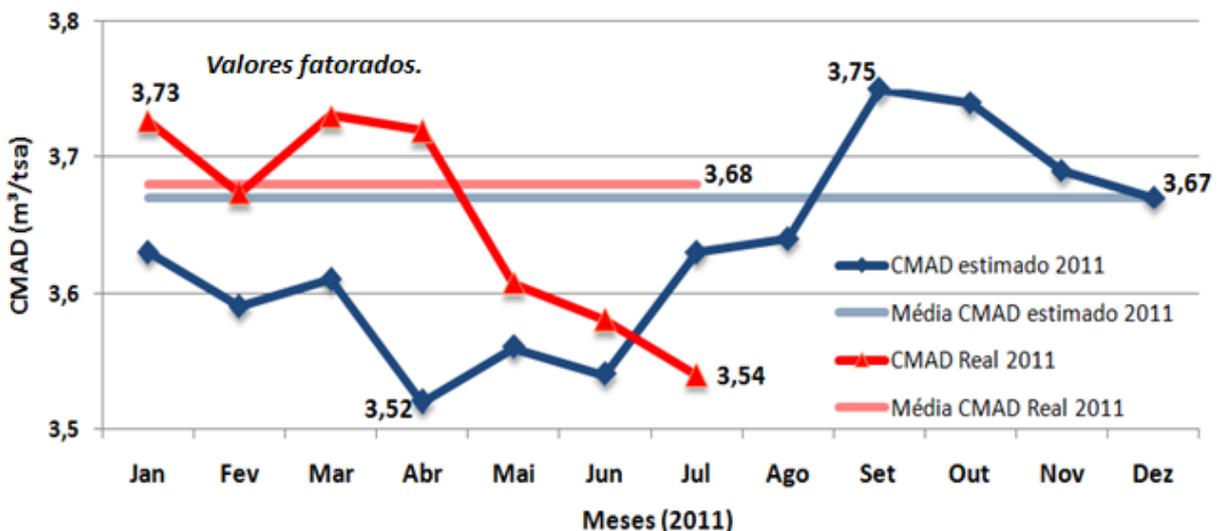


Figura 5 - Distribuição mensal do CMAD estimado vs realizado na indústria em 2011.

Por consequência da distribuição da densidade básica, os meses de setembro, outubro e dezembro apresentaram valores superiores em relação ao projetado no início e meio de 2011. Sugere-se averiguação deste fato para maior uniformidade do consumo específico de madeira em todo o ano, o que é fundamental para maior estabilidade do processo operacional e qualidade do produto final.

## 5 CONCLUSÕES

- ✓ Aproximadamente 56% das áreas da seqüência de corte para abastecimento da Fibria Celulose Aracruz em 2011 estão inclusas na classe de densidade I, abaixo de 495 Kg/m<sup>3</sup>, motivo este devido a baixa média global de idade de corte, de 6,9 anos (idade fatorada), e também pelo fato de que 55% das áreas totais serem pertencentes a região 3, que classifica 74% das amostragens na classe de densidade I;
- ✓ Pela análise global, os resultados não indicam diferença significativa entre as predições de densidade básica entre os resultados gerados pela abordagem convencional utilizando a projeção da densidade básica, baseada na amostragem e pela abordagem utilizando o modelo estatístico da Fibria para determinação da densidade básica, tanto na média geral quanto baseada em classes, principalmente por Idade, que apresentou 0,91 de correlação;
- ✓ Os resultados de cozimento de mix de madeira em laboratório indicam resultados semelhantes de rendimento depurado para as 3 regiões estudadas, não apresentando diferenças significativas entre si, o que pode ser explicado pela baixa variação dos resultados de lignina entre as regiões estudadas. O rendimento depurado não apresentou tendência de comportamento em função do aumento dos teores de extrativos;
- ✓ O cálculo do consumo específico mostrou-se menos influenciado pelo rendimento depurado, sendo a densidade básica a variável de maior impacto na sua determinação;
- ✓ O consumo específico médio de madeira entre as 3 regiões projetado para 2011 se manteve constante em relação ao real de 2010. Deve-se levar em consideração a densidade básica inferior e o rendimento depurado superior aos valores reais de 2010, influenciando a estabilidade do consumo específico de madeira;
- ✓ Recomenda-se a utilização de modelagens estatísticas para minimização de tempo e custos de amostragem para posteriores trabalhos, podendo esta

amostragem ser utilizada para monitorar as avaliações e melhorar os modelos preditivos de densidade básica, embora já confiantes;

- ✓ Os meses entre setembro à novembro apresentaram predições inferiores de densidade básica em relação aos demais meses do ano de 2011 e, conseqüentemente, maior consumo específico de madeira para os mesmos. Sugere-se a redistribuição da densidade básica para este período, objetivando maior uniformidade entre os meses do ano, garantindo maior estabilidade operacional e qualidade do produto final.

## 6 REFERÊNCIAS

- 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 E EXPOSIÇÃO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 35., 2002. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 2002.
- ANTUNES, F. S. Avaliação da qualidade da madeira das espécies *Acacia crassicarpa*, *Acacia mangium*, *Eucalyptus nitens*, *Eucalyptus globulus* e *Populus tremuloides*. 2009. 82 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia da Madeira) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.
- BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. A utilização da madeira na produção de celulose. **IPEF Circular Técnica**, Piracicaba, n. 68, 1979.
- FOELKEL, C. E. B. **Qualidade da madeira**: teoria. 5. ed. Belo Oriente: [s.n.], 1977.
- FOELKEL, C.; MORA, E.; MENOCELLI, 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: SBS, 1990, p. 719-728.
- GOMES, D. F. F. Estudo da qualidade da madeira de clones de “*Eucalyptus*” cultivados no Brasil; produção de polpa kraft de qualidade. 2002. 102 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.
- GOMIDE, J. L. et al. 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.
- GOMIDE, J. L. et al. 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**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 901-909, nov./dez. 2004.
- 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**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 339-344, mar./abr. 2010.
- 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, v. 28, n. 3, p. 443-450, maio/jun. 2004.
- LEONARDI, L. O futuro e a competitividade do setor. **O Papel**, São Paulo, ano 71, n. 9, p. 4-5, set. 2010.

MOKFIENSKI, Alfredo et al. A importância relativa da densidade da madeira e do teor de carboidratos no rendimento de polpa e na qualidade do produto. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, ano 18, n. 3, p. 401-413, jul./set. 2008.

OLIVETTI NETO, A. Qualidade de Cavacos de Eucalipto para Obtenção de Celulose Kraft. In: CONGRESO IBEROAMERICANO DE INVESTIGACIÓN EN CELULOSA Y PAPEL, 2., 2002, Campinas. **Anais...** Campinas: Unicamp, 2002. 1 CD-Rom.

QUEIROZ, S. C. S. et al. 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**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 901-909, 2004.

RUY, O. F. Variação da qualidade da madeira em clones de *Eucalyptus urophylla* S.T. BLAKE da Ilha de Loeres, Indonésia. 1998. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia da Madeira) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

SHIMOYAMA, V. R. S.; BARRICHELO, L. E. G. Densidade básica da madeira, melhoramento e manejo florestal. Série Técnica **IPEF**, Piracicaba, v. 6, n. 20, p.1-22, ago.1989.

SILVA, J. et al, Importância do eucalipto para a indústria de celulose no Brasil. **Revista de madeira**, Curitiba, p.90-92, set. 2001. Suplemento especial.

SILVA JÚNIOR, F. G.; BRAGA, E. P. Potencialidade da seleção precoce de *Eucalyptus urophylla* em função da qualidade da madeira destinada à produção de celulose. In.: CONGRESSO E EXPOSIÇÃO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 30., 1997. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 1997.

SOUZA. V. R.; CARPIM, M. A.; BARRICHELO L. E. G. Densidade básica entre procedências, classes de diâmetros e posição em árvores de *Eucalyptus grandis* e *E. saligna*. **IPEF**, Piracicaba, n. 33, p. 65-72, ago. 1986.

THIERSCH, C. R. et al. Uso de modelos matemáticos na estimativa da densidade básica da madeira em plantios de clones de *Eucalyptus* sp. **Revista Cerne**, Lavras, v. 12, n. 3, p. 264-278, jul./set. 2006.