

**RAPHAEL ALMEIDA NASCIMENTO**

**AVALIAÇÃO DO MEDIDOR PORTÁTIL DE TEOR DE UMIDADE PELO MÉTODO  
DIELÉTRICO EM MADEIRA ROLIÇA DE *Eucalyptus sp.***

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Vinícius Resende de Castro

**VIÇOSA – MINAS GERAIS  
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da  
Universidade Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

N244a Nascimento, Raphael Almeida, 1994-  
2022 Avaliação do medidor portátil de teor de umidade pelo método  
dielétrico em madeira roliça de *Eucalyptus* sp. / Raphael Almeida  
Nascimento. - Viçosa, MG, 2022.  
1 dissertação eletrônica (71 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Vinicius Resende de Castro.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Florestal, 2022.  
Referências bibliográficas: f. 65-71.  
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.558>  
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Eucalipto - Teor de umidade. 2. Testes não-destrutivos. 3.  
Detectores. I. Castro, Vinicius Resende de, 1986-. II. Universidade  
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de  
Pós-Graduação em Ciência Florestal. III. Título.

GFDC adapt. CDD 22. ed. 634.9812211

Bibliotecário(a) responsável: Alice Regina Pinto Pires CRB-6/2523

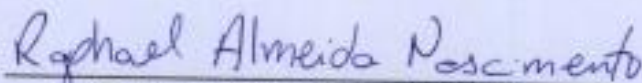
**RAPHAEL ALMEIDA NASCIMENTO**

**AVALIAÇÃO DO MEDIDOR PORTÁTIL DE TEOR DE UMIDADE PELO MÉTODO  
DIELÉTRICO EM MADEIRA ROLIÇA DE *Eucalyptus sp.***

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

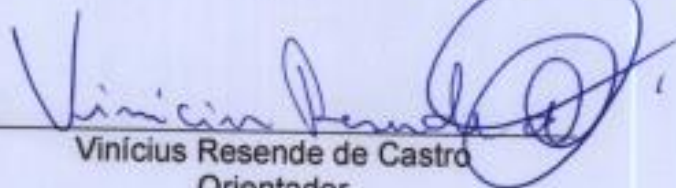
APROVADA: 24 de junho de 2022.

Assentimento:



Raphael Almeida Nascimento

Autor



Vinícius Resende de Castro

Orientador

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus em todas suas formas de existir e se apresentar.

Aos meus pais, Murilo e Tida, que estiveram ao meu lado em todos os momentos, sendo fonte de amor e apoio incondicional, e exemplos de persistência e coragem.

À minha irmã Suzana pelo exemplo e por todos os momentos vividos juntos, principalmente os anos em que estivemos juntos em Viçosa.

À Paulinha pela paciência, companheirismo e amor de sempre.

Ao professor Vinícius Resende de Castro pela orientação e pela parceria, sendo fonte de grandes ensinamentos e ao longo desses anos.

Aos professores Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, Iara Fontes Demuner e Ivaldo Pontes Jankowsky pela colaboração como membros da banca avaliadora.

À empresa Marrari Automação pela parceria nesse projeto e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo suporte financeiro.

À República Carraspana pelo acolhimento, parceria e amizade durante esses anos.

Aos amigos de Prados pelos momentos de descontração e leveza.

Aos amigos e colaboradores do LPM e LAPEM (DEF/UFV), pela parceria e grande ajuda nesses anos.

Aos demais familiares e amigos pelo carinho e incentivo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão da bolsa de estudos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

*“Se o dinheiro for a sua esperança de independência, você jamais a terá. A única segurança verdadeira consiste numa reserva de sabedoria, de experiência e de competência.”*

*(Henry Ford)*

## RESUMO

NASCIMENTO, Raphael Almeida, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, junho de 2022. **Avaliação do medidor portátil de teor de umidade pelo método dielétrico em madeira roliça de *Eucalyptus sp.*** Orientador: Vinícius Resende de Castro.

Em 2020, o consumo de madeira roliça oriunda de florestas plantadas, representou um total de 84% de todo volume utilizado no Brasil, para abastecer indústrias de polpa celulósica, carvão vegetal (uso siderúrgico), madeira tratada, além do setor agropecuário e construção civil. Dentro do segmento de energia, um dos principais parâmetros que influenciam na eficiência da utilização da madeira é o teor de umidade. Tal parâmetro interfere no rendimento gravimétrico da produção de carvão vegetal, tempo de ignição, temperatura média e taxa de aquecimento durante a pirólise. O teor de umidade possui grande influência nos processos industriais, principalmente em teores de umidades acima do ponto de saturação das fibras. Assim, determinar o teor da umidade em madeira roliça de forma rápida, precisa e não destrutiva é um desafio para o setor florestal. Uma das opções para a determinação do teor de umidade é o método dielétrico pelo princípio capacitivo. O presente trabalho tem como objetivo avaliar o método dielétrico, para determinar o teor de umidade, em amostras da madeira roliça de *Eucalyptus sp.* por meio do equipamento UMILOG-M65 (Marrari Automação®). Foi avaliado o equipamento em sua configuração original, e foram elaborados modelos de calibração (equações matemáticas) de teor de umidade x número de BITS, para o equipamento UMILOG-M65 para as diferentes situações estudadas (modelo de sonda, posição de coleta e classe de diâmetro) e equações gerais (sem considerar classe de diâmetro) utilizando árvores de *Eucalyptus sp.* Os valores obtidos com o equipamento em configuração original, e após aplicadas as equações matemáticas, foram comparados com os resultados obtidos pelo método gravimétrico (testemunha). A precisão do equipamento foi avaliada, considerando um erro limite de 5 pontos percentuais. A variação no teor de umidade, base úmida, da madeira apresentou correlação positiva com o valor de BIT's fornecido pelo equipamento, evidenciando a possibilidade de calibrar o equipamento a partir dos dados gerados pelo UMILOG-M65. A partir das equações matemáticas observou-se ganho na precisão do equipamento para todas as situações estudadas. A precisão do

equipamento em configuração original não superou 42%, sendo que após aplicadas as equações matemáticas a precisão média variou de 60 a 70% (desconsiderando as classes de diâmetro). Ao considerar a classe de diâmetro, a precisão chegou a 83% nas menores classes, após aplicadas as equações matemáticas. Foram observados melhores resultados de precisão para as Classes de diâmetro inferiores. A precisão foi superior para dados obtidos na posição de coleta “Ponta” (topo dos toretes). Os dados sugerem que é possível utilizar equações matemáticas para melhorar a precisão do equipamento para determinar o teor de umidade, base úmida, em madeira roliça de *Eucalyptus* sp.

**Palavras-chave:** Teor de umidade base úmida. Método não destrutivo. Sensor capacitivo.

## ABSTRACT

NASCIMENTO, Raphael Almeida, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, June 2022.  
**Evaluation of a portable moisture meter by the dielectric method in *Eucalyptus* sp.** Advisor: Vinícius Resende de Castro.

In 2020, the consumption of logs from planted forests represented a total of 84% of the entire volume used in, to supply a deposit of cellulosic pulp, charcoal (steel mill use), treated wood, in addition to the agricultural and construction sector. One of the main goals of energy is the content of wood utilization. Such parameter interferes in the gravimetric yield of charcoal production, average analysis time and yield during analysis. The moisture content has a great influence on industrial processes, especially in moisture contents above the fiber saturation point. Thus, determining the moisture content of logs quickly, accurately and non-destructively is a challenge for the forestry sector. One of the options for determining the moisture theory is the capacitive dielectric method. The objective of this work is to evaluate the dielectric, to determine the moisture content, in a *Eucalyptus* sp. by the UMILOG-M65 equipment (Marrari Automação®). The equipment was evaluated in its original configuration, models of math adjustment theories x number of equipment were elaborated, for UMILOG-BITS equipment (different research models of position and class of M65) diameter) and general diameter class (without considering the use class of diameter trees). The values obtained with the equipment in its original configuration, and after the calculated calculations, were obtained by the gravimetric method (control). The adjustment of the points was made, considering a limit error of 5 percentages. From the mathematical equations, a gain in equipment precision was observed for all situations studied. The precision of the equipment in its original configuration did not exceed 42%, and after applying the mathematical equations, the average precision ranged from 60 to 70% (disregarding the diameter classes). When considering the diameter class, the accuracy reached 83% in the smallest classes, after applying the mathematical equations. Better accuracy results were observed for the lower diameter Classes. Precision was higher for data obtained at the "Point" collection position (top of logs). The data suggest that it is possible to use mathematical equations to improve the equipment's precision to determine the moisture content, wet basis, in *Eucalyptus* sp.

**Keywords:** Moisture content wet basis. Non-destructive method. Capacitive sensor.

## SUMÁRIO

1. Introdução .....	11
2. Objetivos .....	13
2.1. Objetivo geral .....	13
2.2. Objetivos específicos .....	13
3. Revisão Bibliográfica.....	14
3.1. Uso da madeira roliça no setor florestal .....	14
3.2. Influência da umidade para uso energético.....	15
3.3. Relação água-madeira.....	16
3.4. Métodos de determinação de umidade .....	18
3.4.1. Método Gravimétrico.....	18
3.4.2. Método dielétrico e princípio capacitivo .....	19
3.5. Propriedades dielétricas da madeira.....	21
3.6. Relação umidade x resistividade elétrica .....	22
4. Material e Métodos.....	24
4.1. Caracterização tecnológica da madeira .....	24
4.1.1. Permeabilidade.....	24
4.1.2. Densidade básica da madeira .....	25
4.1.3. Densidade aparente.....	25
4.1.4. Densidade aparente por meio de imagens digitais de raios X.....	26
4.1.5. Relação cerne / alburno.....	26
4.1.6. Caracterização anatômica da madeira .....	27
4.2. Teor de umidade da madeira .....	29
4.2.1. Determinação da umidade pelo método gravimétrico.....	32
5. Resultados e Discussão.....	33
5.1. Determinação do teor de umidade com o UMILOG 65 .....	33
5.1.1. Equações matemáticas entre BIT's x teor de umidade .....	45
5.1.2. Comparação do desempenho antes e após aplicadas as equações .....	50
5.1.3. Correlações entre BIT's x Teor de umidade (método gravimétrico) .....	53
5.1.4. Faixa teor de umidade avaliada a partir do equipamento.....	54

5.1.5. Subestimação ou Superestimação dos dados .....	57
5.1.6. Percentual de acerto .....	59
6. Conclusões .....	62
7. Recomendações .....	63
8. Referências .....	65

## 1. Introdução

O setor florestal em 2020 apresentou um consumo acima de 216 milhões de m<sup>3</sup>/madeira de florestas plantadas (*Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp.) com destino para a indústria de base florestal, sendo que 84% desse consumo foi realizado na forma de madeira roliça, para abastecer a produção de polpa celulósica, carvão vegetal, setor agropecuário (madeira em toras ou toretes e produtos de extração vegetal), painéis e construção civil (IBÁ, 2021). As áreas ocupadas com florestas plantadas no Brasil chegaram a 9,55 milhões de hectares, sendo que 78% (7,47 milhões de hectares) correspondem a plantios de eucalipto (IBÁ, 2021).

Dentre as possibilidades de uso das florestas plantadas, a geração de energia a partir da biomassa se destaca pelas seguintes razões: redução da dependência energética e econômica de combustíveis fósseis, redução das emissões de gases de efeito estufa, e diversificação da matriz energética do país (Da Silva et al., 2021). Uma das formas mais fáceis de aumentar a eficiência da conversão da madeira em energia passa pela redução do teor de umidade, o qual tem relação inversamente proporcional com o total de energia liberada durante sua queima (Moreira et al., 2012).

O teor de umidade, base seca, da madeira recém-colhida pode variar de cerca de 30% a mais de 200%, de acordo com a espécie e posição radial/ longitudinal na árvore (Ross, 2010). Em madeiras de *Eucalyptus spp.* essa variação pode ser de 46 a 133% (Carmo, 1996). O teor de umidade da madeira na sua conversão em carvão vegetal interfere no rendimento gravimétrico, tempo de ignição, temperatura média, taxa de aquecimento e na sua qualidade (Arruda et al., 2011). A Deliberação Normativa COPAM N<sup>o</sup>227 determina que as unidades produtoras de carvão vegetal tenham o teor de umidade da madeira a ser enforada abaixo de 40% (base seca) (COPAM, 2018).

Dessa forma, é importante conhecer o teor de umidade da madeira, e para tal, o método gravimétrico é o mais utilizado (Crisótomo et al., 2016). O método gravimétrico é mais exato, porém, é um método destrutivo de custo mais elevado, que exige muito tempo para se obter o resultado, além de ser inviável para espécies que têm componentes voláteis como resinas, óleos ou gorduras (Batista et al., 2011).

É possível empregar equipamentos que determinam indiretamente o teor de umidade mensurando-se as propriedades elétricas (Crisótomo et al., 2016). Medidores elétricos com princípio resistivo e capacitivo permitem obter o teor de

umidade de forma imediata e com baixo custo, porém sua exatidão é contestada, principalmente acima do ponto de saturação das fibras (Donato et al., 2014).

O método dielétrico além de permitir a determinação rápida e não destrutiva, e utiliza baixos níveis de potência, o que não gera riscos ao operador (King, 2000). Medidores elétricos têm a vantagem em relação à velocidade de aquisição das informações e praticidade, contudo não foram desenvolvidos para determinar o teor de umidade da madeira roliça (Donato et al., 2014). Tratando-se de madeira não processada, os medidores elétricos, princípio resistivo, apresentam pouca precisão para teores de umidade superiores a 25% (base seca), além de não ser possível realizar medições com precisão abaixo de 6% de umidade. Ou seja, os melhores desempenhos dos equipamentos de mediação de umidade estão em teores de umidade, base seca, que variam de 7 a 30%, apesar de terem escala de medição para até 60% (Moreschi, 2005).

Empresas do segmento florestal têm buscado tecnologias que permitam obter o teor de umidade da madeira roliça de forma simples, rápida e precisa, investindo em equipamentos que apresentem resultados com acurácia. A utilização dos medidores elétricos portáteis, método dielétrico capacitivo, para determinação do teor de umidade em madeira roliça pode ser uma alternativa para o setor florestal, entretanto, é necessário avaliar quais fatores possuem influência na performance desses equipamentos como diâmetro da tora, posição de coleta dos dados na tora, propriedades da madeira, e o modelo de sonda de medição, dentre outros.

O presente estudo tem objetivo avaliar o desempenho do equipamento UMILOG-M65, que utiliza o método dielétrico pelo princípio capacitivo para a determinação do teor de umidade, base úmida, da madeira roliça de *Eucalyptus* sp.

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho será avaliar e validar o equipamento portátil de medição de umidade por meio do método dielétrico pelo princípio capacitivo em madeira roliça de *Eucalyptus sp.*

### **2.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar a madeira de *Eucalyptus sp.* em quatro classes de diâmetro em relação às propriedades anatômicas, relação cerne/alburno, permeabilidade, densidade básica, densidade aparente e densidade aparente por raios-X.
- Obter a precisão do equipamento portátil (M65) em relação à variação do teor de umidade, base úmida, da madeira de eucalipto.
- Desenvolver equações matemáticas para estimar o teor de umidade, base úmida, em função do local de medição, classe diamétrica da madeira e modelo de sonda do equipamento.
- Validar o método de determinação do teor de umidade pelo método dielétrico verificando precisão das equações matemáticas em relação ao método gravimétrico.

### **3. Revisão Bibliográfica**

#### **3.1. Uso da madeira roliça no setor florestal**

A utilização de madeira roliça representa uma das formas de utilização mais eficiente dos recursos florestais, pois necessitam de processamento mínimo entre o corte da árvore e a comercialização (Christóforo et al., 2012).

A madeira roliça na forma de mourão tratado passa pela etapa de descascamento, secagem e tratamento químico com produto preservante, visando o aumento da vida útil da madeira em relação ao ataque de organismos xilófagos (Zangiácomo et al., 2014). Para a indústria de preservação em autoclave, é fundamental que o teor de umidade da madeira esteja abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF), em geral entre 18 a 22% (umidade base seca - UBS), pois teores de umidade acima deste intervalo, poderão comprometer a eficácia do tratamento químico com preservantes à base de CCA ou CCB aplicados sob vácuo-pressão-vácuo em autoclave, comprometendo a qualidade do produto final em relação à penetração e retenção do preservante (ABNT, 2013; Vidal et al., 2015).

Dentre as diferentes possibilidades de uso da madeira roliça, a mesma pode ser empregada de forma temporária em escoramento de lajes e construção de andaimes, bem como de forma definitiva em estruturas para pontes, uso para postes e torres em áreas de distribuição de redes elétricas, em construções residenciais como pilares, estacas de fundações e treliças de telhado, sendo que, em todas as aplicações estruturais, a determinação do teor de umidade é fundamental no momento de uso (Longue Junior & Colodette, 2013). O ideal é o teor de umidade estar próximo da umidade de equilíbrio do ambiente a depender da região. De acordo com Silva & Oliveira (2003), o teor de umidade de equilíbrio da madeira de eucalipto pode variar de 5 a 25% UBS, com umidade relativa do ar variando de 20 a 100%, respectivamente.

Dentro dos setores consumidores de madeira, a indústria de celulose é a que mais se destaca. De acordo com o relatório do IBÁ (2021), o Brasil foi o segundo maior produtor de celulose do mundo, com 21 milhões de toneladas de celulose produzida. Indústrias do segmento destacam a etapa de secagem da madeira como de extrema importância, visto que um teor de umidade adequado afeta além dos processos de produção, os custos de transporte da madeira (Leite et al., 2010). A madeira verde (alto teor de umidade) confere maior alvura e qualidades físicas a pasta celulósica,

sendo o teor de umidade ideal acima de 40% (base úmida), e o teor de umidade inferior a 30% provocará perda na qualidade da pasta (Klock et al., 2013).

Outra importante forma de utilização da madeira roliça é a geração de energia, que pode ser realizada a partir da queima direta na forma de lenha ou na conversão em produtos de maior valor energético como o carvão vegetal (Santos et al., 2012). O Brasil é o líder mundial no setor de carvão vegetal, responsável por 12% da produção no ano de 2020, dos quais 95% foram produzidos a partir de madeira proveniente de florestas plantadas (IBA, 2021). O teor de umidade é um fator determinante para o sucesso da carbonização ou queima direta da madeira, influenciando na eficiência e no rendimento do processo.

### **3.2. Influência da umidade para uso energético**

O teor de umidade da madeira é um fator importante e que apresenta influência negativa durante as fases iniciais de aquecimento do forno quando utilizada para geração de energia (Nati et al., 2018, Lachowicz et al., 2018; Machmudah et al., 2020).

Dentre os problemas enfrentados pelas empresas produtoras de carvão vegetal, a heterogeneidade das propriedades do carvão é um problema que se destaca, ocasionado por variáveis que influenciam a produção, sendo de maiores destaques o teor de umidade e a variabilidade da classe de diâmetro da madeira enforada (Donato et al., 2020). O diâmetro e teor de umidade da madeira, bem como as variáveis relacionadas ao controle de processos (temperatura de carbonização e taxa de aquecimento), possuem influência no tempo total de carbonização, na qualidade do carvão e no fluxo de gases (Pereira et al., 2017). O teor de umidade da madeira afeta o rendimento gravimétrico, tempo de ignição, temperatura média e taxa de aquecimento no processo de produção de carvão vegetal (Arruda et al., 2011).

Após a ignição no forno de carbonização, inicia-se o processo de secagem da madeira, cujo objetivo é eliminar o conteúdo de água, o qual apresenta influência direta sobre o rendimento em massa de carvão produzido (Rodrigues & Junior, 2019). Esse processo depende da umidade inicial da madeira enforada, sendo que, quanto maior o teor de umidade inicial, maior será o tempo na fase de secagem (Rodrigues & Junior, 2019).

Ao carbonizar um híbrido de *Eucalyptus* com diferentes teores de umidade da madeira, sob as mesmas condições de carbonização, observou-se uma maior

geração de finos relacionada com os maiores teores de umidade da madeira (Silva & Ataíde, 2019). Assim, o teor de umidade da madeira possui influência significativa no rendimento e qualidade do carvão vegetal. Dessa forma, é fundamental que a madeira apresente teor de umidade abaixo de 30% (UBS), com objetivo de otimizar a qualidade energética, facilitar o manejo e reduzir os custos com transporte (Brand et al., 2013).

### 3.3. Relação água-madeira

A madeira é um material higroscópico, de origem biológica que está em constante troca de umidade com o ambiente (Gezici-Koç et al., 2017; Zhou et al., 2019; Žlahtič-Zupanc et al., 2018), variando seu teor de água conforme a umidade relativa do ambiente aumenta ou diminui (Bonnet et al., 2017; El Hachem et al., 2019; El Hachem et al., 2017). Esta característica se deve à sua composição química, composta por polímeros de celulose, hemiceluloses e lignina, sendo as hemiceluloses as substâncias mais hidrófilas (Borges & Quirino, 2004). O conteúdo de água presente pode ser representado na forma de teor de umidade em base úmida (UBU) e teor de umidade em base seca (UBS). O teor de umidade, base úmida, se refere à massa de água em gramas presente em 100 gramas do material *in natura*, e o teor de umidade, base seca, se refere à massa de água em gramas presente em 100 gramas de material seco (Iglesias & Chirife, 1976).

A água em estado líquido ou vapor pode estar presente na madeira em três condições diferentes: água livre (lúmen das células), água de adesão (ligada às paredes celulares) e água de constituição que faz parte da constituição química estrutural da madeira.

Durante o processo de secagem, a água se move de regiões com alto para baixo teor de umidade, sendo que a primeira água a ser liberada é a água livre (presente nos capilares), só tendo início na perda da água de adesão após eliminada toda a água livre da madeira (Machmudah et al., 2020). De forma geral a água livre pode ser facilmente retirada da madeira pela superfície em contato com o ambiente, uma vez que a água de adesão contém grupos hidroxila que formam fortes ligações de hidrogênio intermoleculares (Machmudah et al., 2020) se tornando necessário fornecer energia para a evaporação (Chen et al., 2015; Stenstrom, 2019). A água de constituição não pode ser eliminada durante a secagem natural, pois não é possível

sua remoção por meio de forças naturais (só é possível a retirada da água de constituição por meio de tratamento térmico, como a carbonização, ou com tratamento químico). Dessa forma, quando se diz que a madeira está completamente seca, esta é a única água contida (Pons & Knop, 2020).

Os três tipos de água podem estar em estado líquido ou gasoso e interagem entre si, visto que a concentração de água de adesão tende a entrar em equilíbrio com a concentração do vapor d'água presente na madeira (Autengruber et al., 2020).

O ponto de saturação das fibras (PSF) é o teor de umidade em que a madeira se encontra após perder toda água livre e a parede celular se manter completamente saturada de água (Autengruber et al., 2020), o que normalmente varia de 22 a 32% de umidade (base seca), a depender da espécie e composição química da madeira (Lima et al., 2008; Saporiti et al., 2009).

A taxa de secagem da madeira depende de fatores externos como a temperatura do ambiente, a umidade relativa do ar e a velocidade de circulação do ar (Zen et al., 2019), localização do pátio de secagem, inclinação e drenagem do terreno, modo de empilhamento e distância entre a madeira e o solo (Barbosa, 2020). As trocas de vapor d'água que acontecem entre a madeira e o ambiente em um dado momento tendem a se estabilizar, atingindo o equilíbrio entre a umidade presente no ar e a umidade da madeira, alcançando a umidade de equilíbrio da madeira (Souza et al. 2019). A troca de umidade entre a madeira e o ambiente acontece no limite entre o espaço intercelular e a parede celular (Arends et al., 2018).

A adsorção e a dessorção de moléculas de água na madeira abaixo do PSF promovem mudanças de dimensões e de propriedades físicas e mecânicas na madeira, o que destaca a influência do teor de umidade nas propriedades do material (Fu et al., 2019). Quando a madeira se encontra em ambiente com umidade relativa e temperatura estáveis, os processos de adsorção e dessorção se estabilizam, mantendo a sua massa constante, atingindo o teor de umidade de equilíbrio (Altgen et al., 2018).

A mudança no teor de umidade da madeira abaixo do PSF ocasiona em alterações nas dimensões que dependem da orientação do material, tais variações são denominadas de inchamento (aumento no teor de umidade) e encolhimento/retração/contração (diminuição no teor de umidade), sendo que as alterações são menores no sentido longitudinal que no tangencial e radial

(Autengruber et al., 2020). Isso acontece devido a orientação longitudinal da maior parte das células presentes na composição da madeira (fibras e traqueídeos) (Ferreira et al., 2019).

Abaixo o PSF, quando ocorre o aumento da umidade relativa, a madeira pode apresentar um inchaço perceptível a olho nu, a depender da espécie, já em escala microscópica a parede celular absorve a água do ambiente por meio das hemiceluloses, o que ocasiona o inchaço das paredes celulares no sentido longitudinal e o estiramento das paredes celulares no sentido transversal (El Hachem et al., 2020). À medida que ocorre o aumento da umidade relativa do ar, há a possibilidade de que a celulose e as hemiceluloses amorfas da parede celular se separem devido à quebra das ligações de hidrogênio, causando o enfraquecimento da estrutura (Kulasinski et al., 2015), e ocasionando na diminuição da sua fase amorfa (El Hachem et al., 2020). Acima do PSF não ocorre inchaço macroscópico, pois as paredes celulares estão saturadas pela água de adesão, e a água livre permanece nos espaços intercelulares (El Hachem et al., 2020)

### **3.4. Métodos de determinação de umidade**

#### **3.4.1. Método Gravimétrico**

O método de determinação do teor de umidade da madeira em formato cilíndrico ou madeira roliça (este último é o termo mais utilizado no Brasil), é o estabelecido na norma ABNT NBR 14.929 (ABNT, 2017), conhecido como método gravimétrico ou de estufa (Donato et al., 2015). O método gravimétrico é referência para determinação do teor de umidade da madeira, porém, é destrutivo, demanda muito tempo para se obter o valor do teor de umidade, além de ser inviável para espécies que apresentam altos teores de componentes voláteis como resinas, óleos e gorduras (Batista et al., 2011).

A determinação do teor de umidade pelo método gravimétrico é realizada por meio da diferença de massa de amostras antes e depois de serem secas em estufa de circulação de ar forçada a  $103\pm 2$  °C até atingirem a massa constante (Donato et al., 2015), sendo comumente expresso como uma porcentagem da massa total na base seca ou base úmida (Batista et al., 2011). A variação da umidade ao longo da peça, no sentido longitudinal, torna necessário que se utilize maior número de amostras por peça, a depender do comprimento da tora. Tal processo promove

elevados custos para se obter o teor de umidade da madeira, principalmente em grandes volumes.

É possível encontrar diferentes equipamentos que possibilitam a mensuração do teor de umidade de forma portátil, rápida e acessível (Crisótomo et al., 2016), porém de baixa precisão, principalmente acima do PSF. Os aparelhos medidores elétricos tipo resistivo, possuem pouca precisão quando comparados com o método gravimétrico para teores de umidade abaixo de 6% e superiores a 30% (base seca), apresentando assim, um melhor desempenho em teores de umidade que variam de 7 a 30% (base seca) (Moreschi, 2005). A madeira em teores de umidade acima do ponto de saturação das fibras possui íons livres, que influenciam na precisão desses equipamentos.

Em virtude das desvantagens apresentadas pelo método gravimétrico para determinação do teor de umidade da madeira roliça, é necessário desenvolver novos métodos que possam substituir ou complementar o mesmo, e que sejam rápidos, confiáveis e de baixo custo (Donato et al., 2015).

### **3.4.2. Método dielétrico e princípio capacitivo**

Propriedades dielétricas são expressas por parâmetros elétricos de determinados materiais condutores que podem ser polarizados por meio de um campo elétrico, em que cada material possui diferentes propriedades dielétricas (Rahiman et al., 2019).

Métodos elétricos para determinação do teor de umidade da madeira utilizam as relações entre o teor de umidade e as propriedades elétricas mensuráveis da madeira, como condutividade, constante dielétrica ou fator de perda de energia (Ross, 2010). A constante dielétrica, é a razão entre a permissividade (constante dielétrica do material) e a constante de permissividade do vácuo, que mensura a energia potencial armazenada por unidade de volume em determinado material na forma de polarização elétrica quando o material está sob ação de um campo elétrico (Glass & Zelinka, 2010). Um medidor de umidade dielétrico consiste em duas placas conectadas a uma fonte de tensão contínua com a madeira em contato entre elas, quando a corrente elétrica passa de uma placa para outra, ocorre a diminuição do campo elétrico efetivo em comparação com uma situação com ar ou vácuo entre as

placas, essa diminuição é a medida do teor de umidade na amostra (Jensen et al., 2006).

O método dielétrico baseia na influência da água sobre as propriedades dielétricas da madeira (Palma & Steiger, 2020). Os dois modelos principais de medidores dielétricos de umidade são o medidor de capacitância, que se baseia na relação entre teor de umidade e a permissividade da madeira, e o do tipo “perda de energia”, que se baseia na relação entre o teor de umidade e o fator de perda dielétrica da madeira (Palma & Steiger, 2020).

O método dielétrico possui algumas vantagens em comparação ao método gravimétrico, pois permite a determinação de forma rápida, não destrutiva, além dos baixos níveis de energia utilizados, o que torna o método seguro (King, 2000).

Os métodos dielétricos de determinação do teor de umidade se baseiam nas mudanças do campo elétrico que ocorrem na matriz do material sob uma corrente contínua, de acordo com as propriedades dielétricas do material (Jensen et al., 2006).

A diminuição de precisão acima do ponto de saturação das fibras (PSF) é atribuída à presença de água livre. A água possui resistência elétrica menor que a madeira, sua presença na forma de água livre reduz a influência da alta resistência elétrica da madeira na leitura do equipamento, diminuindo a precisão à medida que ocorre o aumento no teor de umidade da madeira (Jankowsky, 2000). Porém, trabalhos como Jensen et al. (2006) e Kandala et al. (2016), utilizando medidores de umidade capacitivos obtiveram resultados positivos na determinação do teor de umidade em cavacos, mesmo para teores de umidade acima do ponto de saturação das fibras, obtendo coeficientes de determinação acima de 0,90 para umidades até 50% (base úmida).

Kandala et al. (2016) obtiveram erro abaixo de 3% em relação ao método gravimétrico, concluindo que a calibração aprimorada do método dielétrico, aumenta a precisão das medições por equipamentos, permitindo a separação em faixas de alta e baixa umidade. Goltz (2018) ao utilizar um sensor capacitivo para determinação do teor de umidade em cavacos obteve resultados de correlação entre a umidade e o valor em BITS fornecido pelo equipamento acima de 90%, com coeficiente de determinação  $R^2$  maiores que 0,90, para teores de umidade, base úmida, de até 50%.

Em madeira roliça a secagem acontece de forma diferente da secagem em cavacos, visto que às dimensões (comprimento e diâmetro) influenciam na secagem

e na variação do teor de umidade ao longo da peça. No sentido radial ocorre uma diminuição no teor de umidade da madeira de eucalipto na direção medula-casca, com ligeiro aumento na região periférica do alburno, variando o perfil de acordo com a espécie (Oliveira et al., 2005). No sentido longitudinal, regiões mais centrais da tora apresentam menor velocidade de secagem, havendo um gradiente de umidade do centro do torete até as pontas.

Maiores variações no teor de umidade ao longo da peça nos diferentes sentidos, tornam mais difícil realizar leituras com precisão. Dessa forma, determinar o teor de umidade de madeira roliça a partir de equipamentos elétricos é um grande desafio.

### **3.5. Propriedades dielétricas da madeira**

Utilizando a madeira como um material dielétrico de um capacitor, a constante dielétrica tende a ser maior em teores de umidade elevados (acima do PSF), sendo esse efeito mais notável conforme ocorre a diminuição da frequência do campo elétrico aplicado, no caso de se utilizar corrente alternada (James, 1975). Existe uma relação linear entre o logaritmo da constante dielétrica e o teor de umidade do material, independente da frequência aplicada, embora a inclinação da linha, tenha uma tendência a aumentar com a redução na frequência (James, 1975).

É possível afirmar a existência de relação entre a constante dielétrica e o teor de umidade da madeira, sendo estimado com alto grau de confiabilidade (Crisótomo et al., 2016). Em madeira de seis espécies florestais amazônicas, durante o processo de secagem, foram observados valores de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) superiores a 0,90, correlacionando a constante dielétrica e o teor de umidade (Crisótomo et al. 2016). As propriedades elétricas da madeira são habitualmente empregadas como variáveis “*proxy*” (que serve no lugar de uma variável não observável ou incomensurável) do teor de umidade, sendo métodos baseados em tais propriedades amplamente utilizadas para monitorar o teor de umidade (Palma & Steiger, 2020).

Madeiras mais densas apresentam maior aumento da permissividade relativa para maiores teores de umidade, pois a contribuição relativa da parede celular apresenta maior influência em madeiras de baixa densidade (Palma & Steiger, 2020). Medidores de teor de umidade do tipo dielétrico devem ser ajustadas para a densidade

da madeira quando ocorrer alta variabilidade deste parâmetro, bem como fatores de correção devem ser aplicados de acordo com a espécie (Palma & Steiger, 2020).

Dentro dos diferentes sentidos de orientação da madeira é possível observar valores distintos da propriedade dielétrica, sendo necessária a realização de estudos que concluam de forma mais precisa como essa distribuição funciona (Norimoto & Yamada et al., 1971). Características anatômicas como a direção da grã e as dimensões das fibras exercem influência sobre as propriedades elétricas da madeira, sendo essas características intrínsecas a cada espécie (Panshin & De Zeeuw et al., 1980). A presença de sais solúveis em água e outras substâncias eletrolíticas podem apresentar influência sobre as propriedades dielétricas da madeira (Palma & Steiger, 2020).

A influência desses parâmetros, além do teor umidade, pode ser reduzida a partir da calibração dos medidores de umidade para determinadas espécies e diâmetros dentro de uma faixa de densidade aparente adequada (Jensen et al., 2006). É possível desenvolver correções por meio de equações matemáticas de calibração para equipamentos portáteis, visando a determinação do teor de umidade da madeira roliça, possibilitando a substituição do método gravimétrico tradicional (Donato et al., 2014).

### **3.6. Relação umidade x resistividade elétrica**

As determinações de teor de umidade com base na resistência elétrica são comuns (Forsén & Tarvainen 2000), visto que são rápidas e precisas dentro de uma faixa de medição, podendo ser realizadas por meio de dispositivos de registro de dados (Brischke et al. 2008). Estudos demonstraram correlação entre a resistividade / condutividade elétrica em árvores com o teor de umidade na madeira (Bär et al., 2019; Mares et al., 2016).

A resistividade elétrica do material é influenciada pelo número ou concentração de íons condutores (número de portadores de carga) e pela mobilidade dessas cargas existentes no material, ou seja, pela facilidade delas se moverem em um campo elétrico (Hearle, 1953). A água normalmente possui propriedades dielétricas superiores, o que promove influência nas propriedades dielétricas da madeira (Torgovnikov, 1993).

O teor de umidade e concentração de eletrólitos são os principais fatores que influenciam as propriedades elétricas da madeira (Bieker et al., 2010; Guyot et al., 2013). A variação da resistividade elétrica ao longo do caule da árvore acontece principalmente devido a uma distribuição heterogênea de umidade e eletrólitos (Bieker et al., 2010; Guyot et al., 2013). Baixa resistividade elétrica da madeira indica um maior teor de umidade, maior teor de eletrólitos e / ou menor densidade da madeira (Ganthaler, et al., 2019).

Dessa forma, sensores capazes de determinar a resistividade elétrica de um material fornecem a determinação do seu teor de umidade. Esses sensores medem uma diferença de potencial no meio que é associada a uma medida de resistividade elétrica, de forma que possa ser traduzida por um microcontrolador Arduino para uma medida adimensional em *Binary Digit* ("BIT") (Ohofugi et al., 2021).

Esse valor de BIT pode ser utilizado em equações matemáticas e convertido em teor de umidade do material.

## 4. Material e Métodos

O trabalho foi realizado no Laboratório de Painéis de Madeira (LPM) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), no campus do município de Viçosa-MG. As árvores colhidas e utilizadas foram fornecidas pelo Departamento de Engenharia Florestal (DEF) da UFV, sendo árvores de *Eucalyptus sp.* provenientes de plantios florestais do próprio DEF, localizada nas coordenadas geográficas 20°46'14.13"S e 43°52'37.91"O.

### 4.1. Caracterização tecnológica da madeira

Seis árvores de *Eucalyptus sp.*, com 6 anos de idade, foram colhidas e seccionadas em amostras com 50 centímetros de comprimento, sendo separadas em quatro classes de diâmetro, a saber: Classe 1 (5-8 cm), Classe 2 (9-12 cm), Classe 3 (13-16 cm), Classe 4 (17-20 cm).

De cada classe de diâmetro, retiraram-se quatro discos, de aproximadamente 4 cm de espessura, dois nas extremidades e dois na região central, para serem utilizados na determinação do teor de umidade pelo método gravimétrico. O restante do torete de cada classe de diâmetro foi utilizado para realizar a caracterização tecnológica do material. Foi realizada caracterização anatômica, relação cerne/alburno, permeabilidade, densidade básica, densidade aparente e densidade aparente por imagens de raios X para as quatro classes de diâmetro.

#### 4.1.1. Permeabilidade

Para determinação da permeabilidade da madeira, seguiu-se a metodologia proposta por Teixeira (2015), em que amostras cilíndricas foram retiradas por meio de uma furadeira vertical acoplada a uma serra-copo com 2 cm de diâmetro e 5 cm de comprimento.

Três discos por classe de diâmetro foram utilizados, em que duas amostras por disco foram coletadas, sendo uma no cerne (A1) e uma no alburno (A2) (Figura 1), totalizando 12 repetições para cada classe diamétrica. Os corpos de prova cilíndricos foram impermeabilizados com parafina líquida, para evitar que a passagem de ar pudesse comprometer as medições. As extremidades dos corpos de provas foram isoladas com fita adesiva para evitar o contato com a parafina, mantendo livre a área do fluxo (ar atmosférico).

O equipamento para o ensaio da permeabilidade ao ar atmosférico possuía quatro fluxômetros conectados em série nas seguintes escalas e sequência: 0,04 a 0,5 LPM (Litros por minuto); 0,2 a 2,5 LPM; 0,4 a 5,0 LPM e 2,0 a 25,0 LPM, conectados por mangueiras de PVC a uma bomba de vácuo. Em uma das extremidades da mangueira está conectada a bomba, e na outra extremidade foram fixadas as amostras. O vácuo utilizado na bomba foi de -3 pol.Hg. Para a determinação da permeabilidade gasosa da madeira, utilizou a equação 1, seguindo a lei de Darcy: Equação 1:

$$kg = \frac{Q \cdot L \cdot Pi}{A \cdot \Delta P \cdot Pm}$$

Onde:

$Kg$  = permeabilidade ao gás ( $\text{cm}^3/\text{cm} \cdot \text{atm} \cdot \text{s}$ );

$Q$  = volume do fluxo de gás que percorre a amostra ( $\text{cm}^3/\text{s}$ );

$L$  = comprimento da amostra (cm);

$Pi$  = pressão de entrada, a do ambiente (atm.);

$A$  = área da seção transversal ( $\text{cm}^2$ );

$\Delta P$  = diferença de pressão (atm.);

$Pm$  = média da pressão no corpo-de-prova (atm.).

#### **4.1.2. Densidade básica da madeira**

Quatro amostras em formato de cunha para cada classe de diâmetro com espessura de 4 cm, foram imersas em água até sua saturação completa. Para a determinação da densidade básica, foi mensurado o volume deslocado da amostra saturada em água, e a massa seca da amostra (103 °C, até manter constante). Para a obtenção da densidade básica da madeira foi seguido os procedimentos descritos na norma ABNT (NBR 11941, 2003).

#### **4.1.3. Densidade aparente**

Para determinação da densidade aparente da madeira seguiu-se os procedimentos descritos na norma ABNT (NBR 7190, 1997), com adaptações. Amostras cilíndricas foram retiradas empregando-se uma furadeira vertical acoplada a uma serra-copo com 2 cm de diâmetro e 5 cm de comprimento. Duas amostras de três discos foram retiradas, sendo uma amostra no cerne (A1) e uma amostra no

alburno (A2). As mensurações da massa e do volume das amostras foram realizadas por meio do uso de balança de precisão com capela e de paquímetro digital. Todas as medições foram realizadas após a climatização das amostras à  $\pm 20$  °C,  $\pm 60\%$  umidade relativa até massa constante.

#### 4.1.4. Densidade aparente por meio de imagens digitais de raios X

**Seleção e preparo de amostras:** discos com espessura de 3 cm nas quatro classes de diâmetro foram cortados em seções diametrais (20x10 mm, largura x espessura), e em seguida, amostras finas, transversalmente, com espessura de 2,0mm, foram retirados em uma serra circular e acondicionados em câmara de climatização ( $\pm 20$ °C, 24h,  $\pm 60\%$  umidade relativa) (Castro et al. 2020).

**Descrição do equipamento e princípio de funcionamento:** O equipamento de raios X digital Faxitron modelo LX-60, foi calibrado para leitura automática (30kv, 19 segundos). As amostras de madeira e a escala de calibração de acetato de celulose foram inseridas no compartimento blindado e as imagens digitais foram salvas em formato DICOM (FAXITRON, 2009).

**Montagem do perfil radial de densidade aparente:** As imagens digitais em escala de cinza e da escala de calibração foram analisadas no *software ImageJ*. Determinou-se os valores radiais de densidade aparente do lenho (a cada 50 $\mu$ m), para formar os perfis diametrais de densidade aparente.

#### 4.1.5. Relação cerne / alburno

Para a determinação da relação cerne/alburno (C/A) foi utilizada a metodologia descrita por Evangelista (2007), sendo realizado oito repetições para cada classe de diâmetro. Inicialmente, identificou-se em cada disco, a região do cerne periférico, região limite entre cerne e alburno, com o auxílio de uma lupa com aumento (10x), observando-se a alteração na cor e ocorrência de poros obstruídos por tilos no cerne. De uma extremidade à outra de cada disco, foram traçadas duas retas perpendiculares, passando pelo centro da medula. As medições do diâmetro total e do diâmetro do cerne foram feitas com uma régua de 0,1 cm de precisão. A relação cerne/alburno (C/A) foi calculada pela equação 5.

Equação 5:

$$C/A = \frac{Dc^2}{D^2 - Dc^2}$$

Onde:

$D_c$  = Diâmetro do cerne (cm);

$D$  = Diâmetro do disco sem casca (cm).

#### 4.1.6. Caracterização anatômica da madeira

Para a análise das dimensões das fibras, foram retiradas amostras, e maceradas, segundo o método Franklin (Johansen, 1940). Foram coletadas 30 imagens de fibras por lâmina para a mensuração do comprimento (ampliação de 5 vezes), largura e diâmetro do lúmen (ampliação de 20 vezes), sendo utilizadas duas amostras por classe de diâmetro. A espessura da parede foi obtida pela razão da metade da diferença pela entre a largura e o diâmetro do lume. Para mensuração das fibras foi utilizado o *software Image Pro Plus*, previamente calibrado para cada aumento e obtido os valores de dimensões das fibras para cada classe de diâmetro.

Das amostras das diferentes classes de diâmetro foram cortados corpos de prova orientados com dimensões de 20x10 mm de largura e espessura, respectivamente; imersos em água, para amolecimento e posterior fixação em micrótomo de deslize e corte das seções transversais, com espessura de 15 a 20  $\mu\text{m}$ .

Os cortes foram clarificados em água sanitária (hipoclorito de sódio) a 60%, lavados em água destilada. Para coloração foi utilizado azul de Astra em solução aquosa a 1%, e ácido acético glacial. Após realizada a coloração as seções passaram por desidratação em álcool absoluto (30, 50, 70 e 95% por duas vezes). Posteriormente as seções passaram por uma solução de acetato de butila, e foram colocadas em lâmina de vidro. Foi adicionado uma gota e meio de Entellan e colocado uma lamínula sobre elas.

Das lâminas preparadas, foram coletadas imagens do plano transversal (6 imagens por amostra) para a mensuração do diâmetro e frequência dos vasos/ $\text{mm}^2$ , por meio do *software Image Pro Plus*. A frequência dos vasos (número de vasos/ $\text{mm}^2$ ) foi obtida contando-se o número de vasos em cada imagem por amostra e convertidos em vasos/mm.

Tabela 1 - Resultados de caracterização tecnológica do material de *Eucalyptus sp.* estudado.

Propriedades	Classe 1 (5-8 cm)		Classe 2 (9-12 cm)		Classe 3 (13-16 cm)		Classe 4 (17-20 cm)	
	Cerne	Alburno	Cerne	Alburno	Cerne	Alburno	Cerne	Alburno
Comprimento de Fibras (mm)	0,944 ±0,158 ab <sup>1</sup>	0,774 ±0,168 a	0,854 ±0,162 a	1,018 ±0,223 b	0,830 ±0,126 a	1,086 ±0,157 b	1,087 ±0,132 ab	0,862 ±0,158 a
Espessura de Parede (µm)	4,065 ±1,069 a	4,137 ±0,834 ab	3,983 ±1,003 a	4,039 ±1,184 ab	3,90 ±0,645 a	4,616 ±1,116 b	4,012 ±1,101 a	3,831 ±0,834 a
Largura de fibra (µm)	17,527 ±3,62 b <sup>1</sup>	15,22 ±2,62 a	14,97 ±2,69 a	15,552 ±3,88 a	15,998 ±2,7 ab	17,10 ±3,07 a	18,041 ±3,37 b	16,479 ±3,62 b
Diâmetro do lume (µm)	9,404 ±2,87 b	6,957 ±2,85 a	6,839 ±1,71 a	8,081 ±2,05 ab	8,204 ±2,59 ab	8,018 ±1,94 ab	9,195 ±2,13 b	8,621 ±2,87 b
Diâmetro de vaso (µm)	122,83 ±17,51 c <sup>1</sup>	105,06 ±19,85 ab	98,49 ±7,91 a	138,86 ±22,59 c	110,91 ±15,21 b	105,07 ±12,13 a	136,44 ±14,87 d	123,56 ±17,51 c
Frequência de vasos (poros/mm <sup>2</sup> )	14,24 ±3 b	18,1 ±4,2 b	13,16 ±4,2 b	12,94 ±2,6 bc	13,08 ±1,2 b	20,52 ±2,2 c	8,18 ±0,7 a	7,58 ±4,2 b
Relação Cerne/Alburno	0,103 ±0,030 a <sup>1</sup>		0,653 ±0,133 b		1,307 ±0,173 c		1,636 ±0,295 d	
Permeabilidade (cm <sup>3</sup> /cm.atm.s)	-	302,47 ±95,12 a <sup>1</sup>	30,84 ±46,33 a	328,02 ±30,33 a	56,83 ±59,53 a	236,23 ±65,76 a	0,61 ±1,06 a	249,83 ±95,12 a
Densidade Básica (g/cm <sup>3</sup> )	0,555 <sup>1</sup> ±0,024 a <sup>1</sup>		0,557 ±0,015 a		0,562 ±0,036 a		0,567 ±0,012 a	
Densidade aparente g/cm <sup>3</sup> (raios-X)	0,723 ±0,107 a <sup>1</sup>		0,719 ±0,129 a		0,714 ±0,110 a		0,714 ±0,107 a	
Densidade aparente g/cm <sup>3</sup> ( NBR 7190)	0,720 ±0,01 a	0,710 ±0,03 a	0,746 ±0,01 a	0,813 ±0,05 b	0,716 ±0,07 a	0,823 ±0,02 b	0,710 ±0,03 a	0,786 ±0,05 b

<sup>1</sup> - Médias seguidas da mesma letra, por linha, não diferem (Tukey p> 0,05).

## 4.2. Teor de umidade da madeira

Para determinação do teor de umidade das madeiras, pelo método dielétrico, utilizou-se o equipamento portátil UMILOG-M65. A determinação pelo método gravimétrico foi realizada de acordo com a norma ABNT NBR 14.929 (2017), sendo este método como testemunha.

Seis árvores de *Eucalyptus sp.* com 6 anos de idade foram coletadas e seccionadas em toretes de 50 cm, e posteriormente, foram separados em quatro classes de diâmetro, sendo: Classe 1 (5 a 8 cm), Classe 2 (9 a 12 cm), Classe 3 (13 a 16 cm) e Classe 4 (17 a 20 cm). Cinquenta por cento (50%) dos toretes foi seco de forma natural e, o restante seco em estufa de ventilação forçada, de modo a obter maior número de amostras em diferentes teores de umidade em menor tempo.

A partir de cada torete foram obtidos os dados de teor de umidade, na base úmida, por meio do equipamento M65 e pelo método gravimétrico. O equipamento M65 é um sensor capacitivo, possui uma sonda (12 mm de diâmetro e 300 mm de comprimento) que por meio de contato determina o teor de umidade, base úmida, da madeira após 9 segundos de leitura. O contato da sonda com o interior da madeira é obtido a partir de um furo de 14 mm de diâmetro e 5 cm de profundidade, realizado com furadeira e broca helicoidal.

Após realizada a leitura pela sonda, o equipamento mostrou o teor de umidade da madeira em base úmida, e o valor de BIT's. Esse último é o valor de leitura que o equipamento utiliza para converter em teor de umidade, a partir de uma "Receita" que é previamente programada e inserida no equipamento. Para inserção de uma nova receita é necessário inserir valores conhecidos de BIT's associados a teores de umidade base úmida pelo método gravimétrico. Todas as informações estavam disponíveis no painel de leitura do equipamento (Figura 1). Para o presente trabalho foi utilizado a "Receita 01", original do equipamento.



Figura 1- Medidor Portátil de Umidade MUG-M65 utilizado no experimento

Dos toretes de 50 cm de comprimento, foram aferidas quatro medições do teor de umidade a partir do equipamento UMILOG-M65, nas posições Ponta 1A, Ponta 1B, Centro 1A e Centro 1B (Figura 2). Em seguida foram seccionados quatro discos (com 2 cm de espessura) de cada torete, sendo dois discos nas extremidades do torete (Disco ponta 1A e Disco ponta 1B), e dois discos centrais (Disco centro 1A e Disco centro 1B) (Figura 2).

Os discos foram retirados próximos aos pontos onde foi realizado a leitura de teor de umidade por meio do equipamento M65. Esses foram utilizados para determinação do teor de umidade pelo método gravimétrico.

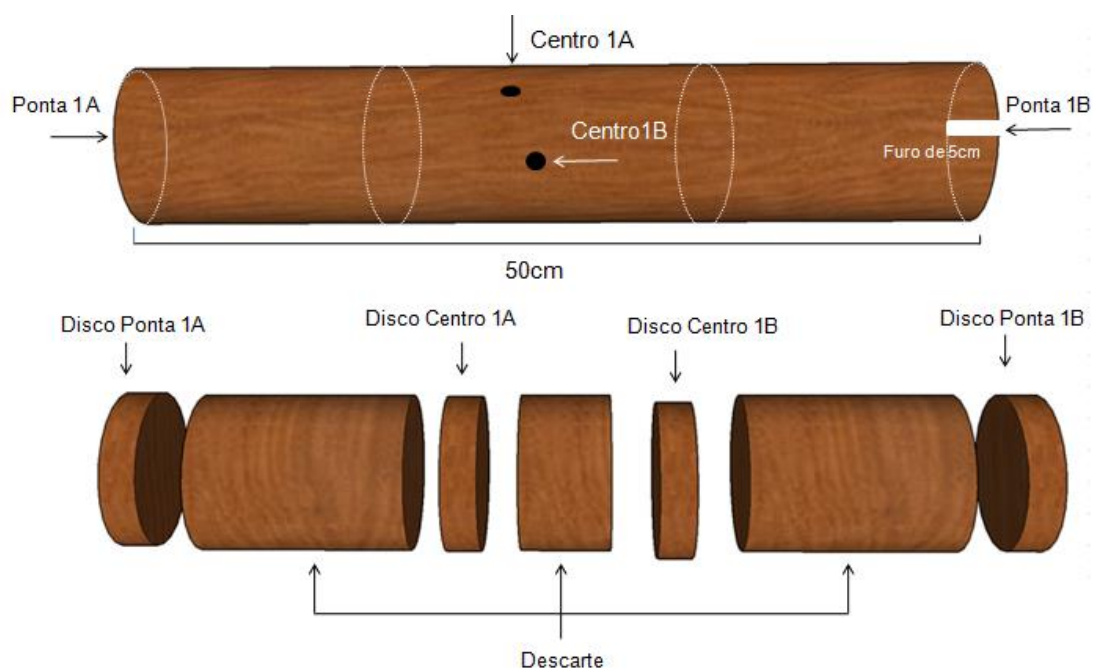


Figura 2 - Posições para coleta de dados de teor de umidade por meio do equipamento dielétrico e retiradas de discos para o método gravimétrico.

Depois de realizada o furo, para diminuir a temperatura no local provocado pelo atrito entre a broca helicoidal e madeira, esperou-se um tempo de 5-10 minutos para inserção da sonda e início das leituras. A sonda foi inserida por 9 segundos no furo, mantendo-a em movimentos rotacionados, a fim de garantir uma melhor superfície de contato com o interior do torete. Após esse tempo, realizou-se a leitura do teor de umidade, base úmida, e número de BIT's, disponibilizados no painel do equipamento.

Foram avaliadas 3 sondas com diferentes sensibilidades em relação à perturbação do campo elétrico, obtendo-se assim, diferentes leituras para o número de BIT's e teor de umidade. Todas as sondas foram fornecidas pelo mesmo fabricante (Figura 3).



Figura 3 - Sondas utilizadas para medição do teor de umidade a partir do aparelho UMILOG-M65.

Equações de calibração foram elaboradas para cada um dos cenários estudados levando em consideração a classe de diâmetro, modelo de sonda e posição de coleta dos dados. Equações gerais também foram elaboradas também para cada modelo de sonda e posição de coleta, desconsiderando a classe de diâmetro. Tais equações tiveram objetivo de avaliar a precisão do equipamento de forma geral para madeiras de 5 a 20 cm de diâmetro.

Para construção das equações matemáticas, foram relacionados valores de BIT's fornecidos pelo equipamento com os valores de teor de umidade obtidos pelo

método gravimétrico (base úmida). Foram realizados tratamentos nos dados, como remoção de pontos fora curva (*outliers*) e ajustes das equações, além de serem testados diferentes equações matemáticas como equação linear, exponencial, logarítmica e polinomial de segundo grau. Após a escolha das melhores equações matemáticas em relação aos maiores coeficientes de determinação e maior precisão, foi possível determinar o teor de umidade base úmida da madeira ( $y$ ), substituindo na função o valor de BIT's ( $x$ ), fornecido pelo equipamento. Todas as equações foram geradas a partir do software Excel (Microsoft Office, 2013).

Os valores obtidos pelo equipamento antes e após a correção a partir das equações matemáticas foram comparados com o valor obtido pelo método gravimétrico, sendo assumido como acerto os valores com coeficiente de variação de até cinco pontos percentuais ( $\pm 5\%$ ) do valor de teor de umidade, base úmida, determinado pelo método gravimétrico.

Devido a configuração original do equipamento fornecer o teor de umidade da madeira em base úmida, e a maior variação na determinação do teor de umidade quando se utiliza base seca. Para este trabalho foram elaboradas apenas equações que convertem o valor de BIT's em teor de umidade, base úmida. A conversão do valor de BIT's em teor de umidade, base seca, proporcionou acúmulo de erros durante a transformação, não promovendo desempenho satisfatório.

Durante as análises estatísticas e comparativas sobre o desempenho do equipamento para determinação do teor de umidade foram utilizados os softwares Excel (Microsoft Office, 2013), TRACKER (Marrari Automação ®) e Power BI (Microsoft Power BI Desktop).

#### **4.2.1. Determinação da umidade pelo método gravimétrico**

O teor de umidade, base úmida, da madeira foi obtido a partir dos procedimentos descritos na norma ABNT NBR 14.929 (ABNT, 2017).

Os resultados obtidos a partir do método gravimétrico foram utilizados como parâmetro para comparação, realização das análises estatísticas do presente trabalho e elaboração das equações matemáticas.

## 5. Resultados e Discussão

### 5.1. Determinação do teor de umidade com o UMILOG 65

Nas Tabelas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9, estão apresentados os valores de teor de umidade, base úmida, obtidos a partir dos três métodos estudados: Equipamento em configuração original (M65), método gravimétrico, após aplicadas as equações de correção.

Tabela 2 - Valores de teor de umidade base úmida observados para a "classe 1", posição "centro", obtidos utilizando os três métodos estudados.

Classe 1 - Centro						
UMILOG-M65			Gravimétrico	Equações aplicadas		
Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	UBU	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3
48,3	36,6	53,8	<b>53,7</b>	55,9	56,0	54,3
50,0	35,7	55,1	<b>53,1</b>	57,6	53,0	55,7
40,4	29,4	47,6	<b>45,0</b>	46,3	33,8	47,2
30,1	30,7	34,3	<b>44,6</b>	30,0	37,6	31,6
42,0	31,9	42,6	<b>44,3</b>	48,4	40,9	41,2
30,3	30,7	35,3	<b>43,9</b>	30,2	37,5	31,9
40,9	31,2	43,8	<b>43,4</b>	46,9	39,0	42,8
41,2	33,6	40,4	<b>43,0</b>	47,4	46,3	38,5
44,3	31,7	45,9	<b>43,0</b>	51,3	40,4	45,3
32,4	30,4	44,4	<b>42,9</b>	34,1	36,7	43,4
41,5	33,2	46,8	<b>41,8</b>	47,8	40,6	46,3
43,6	33,0	45,4	<b>41,1</b>	50,5	44,2	44,6
29,3	27,1	35,5	<b>34,8</b>	28,5	27,9	32,3
29,8	27,6	36,0	<b>34,0</b>	29,4	29,2	32,8
30,3	28,5	34,0	<b>33,9</b>	30,3	31,6	30,3
29,4	27,8	36,8	<b>33,6</b>	28,7	29,7	34,0
28,6	27,5	31,1	<b>33,3</b>	27,2	28,9	26,3
29,1	26,5	31,5	<b>33,0</b>	28,1	26,3	26,8
28,7	27,0	34,0	<b>32,7</b>	27,4	27,6	30,3
29,3	27,1	34,6	<b>32,0</b>	28,6	27,9	31,1
30,0	27,5	35,4	<b>31,8</b>	29,7	28,9	32,0
28,6	25,9	34,0	<b>31,4</b>	27,3	24,6	30,2
29,3	27,3	32,0	<b>31,2</b>	28,5	28,4	27,6
29,1	26,4	31,1	<b>31,0</b>	28,0	26,0	26,3
29,4	27,5	33,7	<b>30,8</b>	28,6	29,0	29,9
31,9	28,7	40,6	<b>30,6</b>	33,2	31,9	38,8
30,9	29,4	37,8	<b>30,5</b>	31,4	33,8	35,2
27,5	26,0	29,7	<b>29,3</b>	25,3	24,9	24,4
28,1	26,0	29,2	<b>29,2</b>	26,5	25,1	23,6
26,3	24,7	31,2	<b>28,5</b>	23,0	21,8	26,5
29,6	26,1	30,0	<b>28,0</b>	29,2	25,3	24,8
28,2	27,8	34,0	<b>26,7</b>	26,6	29,6	30,2

28,9	27,1	31,2	<b>24,9</b>	27,8	27,9	26,4
28,1	27,0	32,1	<b>24,8</b>	26,4	27,5	27,7
30,5	27,2	34,9	<b>22,6</b>	30,7	28,1	31,4
28,3	26,7	34,0	<b>21,8</b>	26,8	26,8	30,2
29,7	27,0	32,9	<b>21,7</b>	29,2	27,6	28,8
30,4	25,7	35,8	<b>20,5</b>	30,5	24,4	32,6
29,4	26,4	33,7	<b>20,1</b>	28,7	26,1	29,9
29,5	26,5	33,6	<b>19,9</b>	28,9	26,3	29,7
23,7	22,1	23,7	<b>18,8</b>	17,8	15,7	16,0
28,4	26,1	32,0	<b>18,5</b>	27,1	25,3	27,5
28,6	25,7	31,8	<b>18,4</b>	27,3	24,3	27,3
25,5	24,2	28,0	<b>16,9</b>	21,4	20,5	22,2
22,3	22,2	24,0	<b>16,4</b>	14,8	16,1	16,4
25,4	23,9	28,7	<b>16,4</b>	21,3	20,0	22,9
24,2	23,1	26,5	<b>15,8</b>	18,9	18,0	20,0
23,5	23,2	26,2	<b>15,6</b>	17,3	18,4	19,6
20,1	19,3	23,1	<b>15,3</b>	3,0	13,4	15,1
22,2	22,1	24,1	<b>15,1</b>	14,7	15,8	16,6
20,4	19,0	23,2	<b>15,1</b>	12,6	13,2	15,3
22,7	21,8	24,9	<b>14,7</b>	15,7	15,1	17,7
11,8	10,0	13,9	<b>11,5</b>	7,7	8,5	9,8
11,7	10,5	14,2	<b>11,3</b>	7,7	8,8	9,9
6,8	7,4	9,4	<b>8,3</b>	4,7	7,3	8,0
7,2	7,5	9,9	<b>8,0</b>	4,2	7,4	8,2
10,9	4,5	14,7	<b>7,7</b>	7,1	5,9	10,1
9,8	4,4	14,0	<b>7,5</b>	6,5	5,9	9,8
10,1	11,3	18,4	<b>7,4</b>	6,7	9,2	11,6
10,5	5,3	15,3	<b>7,1</b>	6,9	6,3	10,4
12,1	16,8	22,4	<b>7,0</b>	7,9	12,1	14,1
14,5	21,1	23,3	<b>6,7</b>	9,2	14,4	15,5

Tabela 3 - Valores de teor de umidade base úmida observados para a "classe 1", posição "ponta", obtidos utilizando os três métodos estudados.

Classe 1 - Ponta						
UMILOG-M65			Gravimétrico	Equações aplicadas		
Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	UBU	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3
34,5	32,4	42,8	<b>54,0</b>	49,2	60,5	50,0
31,6	29,9	38,5	<b>52,5</b>	38,8	45,3	39,6
32,1	28,2	36,7	<b>44,6</b>	40,5	37,5	35,8
38,3	29,7	40,3	<b>44,5</b>	64,8	44,7	43,9
30,3	26,1	36,3	<b>43,9</b>	34,6	27,8	34,9
30,4	29,1	35,2	<b>43,4</b>	34,8	41,4	32,8
32,1	28,9	40,1	<b>42,9</b>	40,5	40,5	43,5
31,9	30,2	37,2	<b>42,7</b>	39,7	47,3	36,9
34,7	28,5	38,6	<b>42,3</b>	49,8	38,3	39,8

34,3	28,3	38,8	<b>41,7</b>	48,5	37,5	40,3
33,2	29,2	39,3	<b>41,6</b>	44,5	41,7	41,4
31,5	29,4	36,8	<b>40,9</b>	38,4	43,1	35,8
28,3	26,9	33,3	<b>33,9</b>	28,9	31,0	29,1
28,6	26,5	33,7	<b>32,9</b>	29,6	29,5	29,9
28,6	26,4	35,0	<b>32,2</b>	29,6	29,1	32,3
28,2	27,1	32,9	<b>30,9</b>	28,6	32,0	28,4
29,6	27,2	34,0	<b>30,6</b>	32,3	32,7	30,4
31,9	28,6	37,1	<b>30,4</b>	39,8	38,9	36,6
28,9	27,2	34,5	<b>29,3</b>	30,5	32,7	31,3
29,4	27,2	34,2	<b>29,2</b>	32,0	32,4	30,8
28,8	26,6	35,0	<b>28,5</b>	30,0	30,0	32,4
30,6	28,3	34,7	<b>27,5</b>	35,7	37,9	31,7
26,4	25,1	29,3	<b>25,9</b>	23,8	24,2	22,6
26,6	25,2	30,1	<b>25,3</b>	24,4	24,5	23,8
25,3	24,8	30,4	<b>25,0</b>	21,3	16,2	24,3
27,5	27,3	30,6	<b>24,6</b>	26,8	33,0	24,5
25,3	24,8	28,4	<b>23,7</b>	21,3	23,2	21,3
25,9	25,7	28,4	<b>22,9</b>	22,6	26,2	21,3
25,1	24,1	28,2	<b>22,8</b>	20,6	20,9	21,1
25,1	25,0	28,5	<b>21,7</b>	20,7	23,9	21,5
25,0	25,0	27,7	<b>21,6</b>	20,5	23,6	20,4
24,8	24,9	28,3	<b>21,5</b>	20,0	23,4	21,2
25,8	24,7	28,4	<b>17,6</b>	22,2	22,6	21,4
24,2	23,8	26,2	<b>17,0</b>	18,8	19,7	18,5
27,2	25,4	30,7	<b>17,0</b>	26,0	25,3	24,8
25,6	23,9	28,0	<b>16,3</b>	21,8	20,1	20,7
25,2	24,1	27,9	<b>16,3</b>	21,0	20,6	20,7
27,1	25,6	30,3	<b>16,0</b>	25,6	26,2	24,1
24,4	23,5	26,8	<b>15,9</b>	19,2	18,8	19,2
21,7	13,9	23,2	<b>15,3</b>	13,8	10,3	15,1
23,6	23,6	25,8	<b>14,9</b>	17,5	19,2	18,0
24,6	22,9	26,3	<b>14,9</b>	19,5	17,1	18,6
13,1	16,7	17,4	<b>14,8</b>	10,2	11,4	12,7
14,4	16,8	19,5	<b>14,6</b>	10,6	11,4	13,1
22,8	22,2	25,2	<b>14,5</b>	15,9	15,7	17,2
14,3	17,3	19,0	<b>14,5</b>	10,6	11,7	13,0
18,0	18,2	22,1	<b>14,4</b>	12,0	12,1	14,1
16,2	16,9	18,8	<b>14,3</b>	11,3	11,5	12,9
14,5	10,6	20,4	<b>14,1</b>	10,7	9,3	13,3
12,0	15,3	17,6	<b>14,0</b>	9,8	10,8	12,7
10,7	11,1	14,6	<b>10,0</b>	9,4	9,5	12,1
11,1	9,9	16,0	<b>9,8</b>	9,5	9,2	12,4
18,9	16,1	20,8	<b>8,7</b>	12,4	11,2	13,7
10,1	2,8	6,9	<b>8,2</b>	9,2	8,2	10,9
14,4	13,4	17,8	<b>8,1</b>	10,6	10,2	12,7
4,5	2,9	6,7	<b>8,1</b>	7,5	8,2	10,8

14,3	4,1	15,2	<b>8,1</b>	10,6	8,2	12,2
9,7	3,5	14,9	<b>8,0</b>	9,1	8,2	12,2
9,8	5,0	15,5	<b>7,8</b>	9,1	8,3	12,3
12,4	9,8	14,5	<b>7,7</b>	9,9	9,1	12,1
14,8	11,7	18,5	<b>5,9</b>	10,8	9,6	12,9
11,7	5,9	17,4	<b>5,8</b>	9,7	8,4	12,7

Tabela 4 - Valores de teor de umidade base úmida observados para a "classe 2", posição "centro", obtidos utilizando os três métodos estudados.

Classe 2 - Centro						
UMILOG-M65			Gravimétrico	Equações aplicadas		
Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	UBU	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3
45,5	36,7	49,0	<b>54,3</b>	48,5	55,4	50,2
36,4	37,1	51,3	<b>52,7</b>	39,5	56,5	53,0
34,4	31,8	43,8	<b>45,3</b>	36,6	41,0	43,2
33,0	31,0	42,7	<b>44,9</b>	34,5	38,6	41,8
36,8	30,2	42,3	<b>43,8</b>	40,0	36,2	41,1
39,5	29,9	43,5	<b>42,9</b>	43,4	35,6	42,8
41,5	31,4	45,5	<b>42,3</b>	45,4	39,8	45,5
39,8	29,8	41,6	<b>42,1</b>	43,7	35,4	40,1
35,0	29,2	40,1	<b>41,5</b>	37,5	33,8	38,0
36,9	29,4	40,7	<b>41,4</b>	40,2	34,2	38,8
33,4	29,6	40,7	<b>41,3</b>	35,0	34,8	38,8
34,1	29,6	42,3	<b>41,2</b>	36,1	34,7	41,1
31,1	27,2	35,0	<b>37,0</b>	34,8	28,5	30,4
28,8	27,6	32,9	<b>36,9</b>	26,8	29,4	27,1
30,3	29,0	35,7	<b>35,9</b>	29,6	33,1	31,6
35,2	31,1	41,1	<b>35,7</b>	37,8	38,9	39,4
30,1	29,3	37,3	<b>35,7</b>	29,2	34,0	33,9
31,3	23,1	35,5	<b>35,6</b>	31,6	17,7	31,2
35,0	31,6	37,7	<b>35,3</b>	37,6	40,4	34,4
30,1	28,2	33,2	<b>34,6</b>	29,2	31,3	27,6
30,2	28,1	29,0	<b>34,5</b>	29,4	30,8	21,1
30,8	27,6	34,2	<b>34,2</b>	30,7	29,4	29,2
30,0	27,4	33,0	<b>34,1</b>	29,2	29,0	27,4
29,1	28,3	32,5	<b>33,7</b>	27,4	31,4	26,5
28,4	27,2	32,4	<b>32,9</b>	26,0	28,5	26,4
28,1	26,0	32,0	<b>32,7</b>	25,6	25,5	25,8
29,5	26,9	31,5	<b>31,7</b>	28,2	27,8	24,9
30,4	29,9	35,8	<b>31,0</b>	29,9	35,6	31,7
28,4	27,1	32,2	<b>30,6</b>	26,1	28,3	26,1
30,0	26,8	32,5	<b>30,4</b>	29,0	27,5	26,6
31,9	28,4	37,0	<b>30,2</b>	32,5	31,7	33,4
29,2	26,9	31,9	<b>30,1</b>	27,6	27,8	25,7
27,8	25,6	31,4	<b>28,3</b>	25,0	24,3	24,8
29,2	26,7	32,5	<b>28,1</b>	27,5	27,1	26,6

31,7	29,2	35,8	<b>27,7</b>	32,2	33,7	31,6
31,7	28,7	35,2	<b>27,1</b>	32,2	32,2	30,7
31,3	28,2	35,8	<b>26,9</b>	31,6	31,2	31,6
30,5	26,7	35,4	<b>26,0</b>	30,0	27,2	31,0
32,2	27,9	36,7	<b>25,6</b>	33,0	30,3	33,0
30,1	27,3	34,8	<b>25,1</b>	29,3	28,9	30,0
30,1	27,4	36,0	<b>24,7</b>	29,3	29,1	31,9
31,0	27,5	36,0	<b>21,9</b>	31,0	29,4	32,0
27,5	27,1	30,9	<b>21,4</b>	24,4	28,3	24,1
27,6	25,7	26,1	<b>20,1</b>	24,6	24,4	16,4
29,2	25,1	32,5	<b>20,1</b>	27,6	23,0	26,5
27,5	25,4	30,9	<b>19,4</b>	24,2	23,9	24,1
24,4	23,3	27,4	<b>17,4</b>	17,4	18,2	18,5
26,2	24,5	29,6	<b>16,8</b>	21,4	21,4	21,9
24,7	22,2	27,8	<b>16,7</b>	18,2	15,7	19,3
25,7	24,8	29,7	<b>16,5</b>	20,5	22,1	22,0
24,8	23,6	27,9	<b>15,5</b>	18,2	19,3	19,4
24,2	20,4	27,6	<b>15,4</b>	16,9	13,3	18,8
22,4	15,1	24,5	<b>13,0</b>	12,5	10,0	13,7
22,5	19,7	23,3	<b>13,0</b>	12,8	12,9	11,6
21,6	18,5	23,5	<b>12,7</b>	10,5	12,1	11,9
22,0	19,4	24,1	<b>10,7</b>	11,6	12,7	13,1
16,6	8,7	21,0	<b>10,4</b>	7,1	6,2	8,3
14,4	7,1	18,5	<b>10,0</b>	5,5	5,2	7,2
25,0	21,6	29,4	<b>9,7</b>	19,0	14,3	21,6
23,7	26,4	24,9	<b>9,7</b>	15,7	26,5	14,4
17,2	9,5	22,0	<b>9,6</b>	7,5	6,6	9,3
21,0	10,9	23,4	<b>9,4</b>	10,0	7,4	11,8
21,8	12,2	23,0	<b>9,3</b>	11,0	8,2	11,2
17,7	15,1	22,0	<b>9,1</b>	7,8	10,1	9,4

Tabela 5 - Valores de teor de umidade base úmida observados para a "classe 2", posição "ponta", obtidos utilizando os três métodos estudados.

Classe 2 - Ponta						
UMILOG-M65			Gravimétrico	Equações aplicadas		
Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	UBU	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3
33,6	32,3	31,9	<b>63,5</b>	46,7	48,3	39,8
32,7	29,5	39,6	<b>53,3</b>	41,8	35,0	35,7
30,8	28,5	36,9	<b>45,4</b>	33,5	31,1	31,2
33,0	31,9	39,1	<b>45,3</b>	43,4	46,4	34,7
31,4	27,3	36,8	<b>44,3</b>	36,0	26,7	30,9
30,6	26,0	34,5	<b>43,8</b>	32,2	22,2	27,3
31,5	31,5	44,3	<b>43,0</b>	36,3	44,1	44,2
31,5	28,2	40,0	<b>42,6</b>	36,3	30,2	36,3
32,0	29,5	39,8	<b>40,9</b>	38,7	35,0	36,1
31,6	30,9	42,2	<b>40,1</b>	36,7	41,3	40,3

31,9	26,3	37,2	<b>39,8</b>	38,1	23,4	31,6
35,1	30,5	43,1	<b>39,5</b>	55,1	39,4	42,0
29,8	27,2	35,3	<b>35,8</b>	29,3	26,3	28,7
30,4	27,0	34,7	<b>35,4</b>	31,6	25,7	27,6
33,5	31,4	40,1	<b>34,0</b>	46,2	43,7	36,6
35,2	31,2	38,9	<b>33,9</b>	55,4	42,9	34,4
31,2	26,7	34,5	<b>33,5</b>	35,0	24,5	27,4
29,0	26,6	32,4	<b>33,4</b>	26,4	24,4	24,2
31,6	29,0	35,7	<b>33,2</b>	36,5	33,0	29,2
31,1	18,2	34,5	<b>32,6</b>	34,6	29,9	27,4
30,0	27,0	33,6	<b>32,5</b>	30,0	25,8	26,0
30,1	26,8	35,2	<b>32,4</b>	30,5	24,8	28,4
30,5	28,1	34,6	<b>29,9</b>	32,0	29,9	27,6
28,4	25,9	30,3	<b>28,8</b>	24,9	22,0	21,4
30,5	29,6	33,7	<b>28,7</b>	32,0	35,4	26,1
27,8	26,3	32,4	<b>28,5</b>	22,7	23,1	24,2
27,7	25,7	29,2	<b>25,6</b>	22,7	21,4	19,9
26,4	27,1	32,1	<b>25,3</b>	19,2	26,0	23,8
27,4	25,6	31,0	<b>25,0</b>	21,8	21,1	22,2
26,0	25,8	31,1	<b>24,3</b>	18,2	21,8	22,4
28,9	25,6	29,1	<b>23,7</b>	26,1	21,1	19,7
25,9	26,1	31,1	<b>23,5</b>	17,9	22,2	22,3
30,1	26,9	33,4	<b>21,4</b>	30,3	25,4	25,6
28,0	25,7	31,2	<b>20,5</b>	23,4	21,4	22,5
29,3	26,2	32,3	<b>19,9</b>	27,4	22,8	24,1
28,4	26,4	32,9	<b>19,9</b>	24,6	23,5	25,0
27,8	26,0	31,6	<b>19,8</b>	22,8	22,3	23,1
27,7	26,3	32,6	<b>19,3</b>	22,7	23,1	24,5
30,1	27,1	35,7	<b>19,2</b>	30,6	26,2	29,1
28,7	26,5	31,8	<b>18,9</b>	25,3	23,8	23,3
25,4	24,3	29,1	<b>17,7</b>	16,9	17,2	19,7
25,8	25,5	29,8	<b>17,0</b>	17,6	20,7	20,7
24,4	23,8	27,5	<b>16,8</b>	15,0	16,0	17,8
22,3	22,4	23,9	<b>15,5</b>	12,5	12,9	13,6
22,7	22,1	24,7	<b>15,0</b>	12,9	12,3	14,5
21,8	21,9	23,5	<b>14,9</b>	12,2	12,1	13,1
22,3	21,4	24,4	<b>14,7</b>	12,5	11,5	14,1
19,7	19,6	22,8	<b>14,7</b>	11,9	10,5	12,4
27,5	27,3	32,4	<b>14,4</b>	21,7	26,8	24,2
18,8	19,6	22,1	<b>14,3</b>	11,9	10,5	11,7
10,0	10,9	13,1	<b>10,7</b>	12,6	7,8	9,0
11,0	10,8	16,1	<b>10,4</b>	12,4	7,8	9,7
22,9	22,9	23,9	<b>9,0</b>	13,1	13,9	13,6
22,8	20,2	23,1	<b>9,0</b>	13,0	10,7	12,7
9,2	8,4	11,5	<b>8,9</b>	12,8	7,3	8,6
13,0	12,0	16,9	<b>8,7</b>	12,1	8,1	9,9
10,9	8,7	14,6	<b>8,7</b>	12,5	7,4	9,3

10,3	4,9	14,3	<b>8,6</b>	12,6	6,9	9,3
8,3	8,4	10,3	<b>8,5</b>	13,0	7,3	8,4
11,2	7,4	13,8	<b>8,5</b>	12,4	7,2	9,1
10,6	5,3	15,1	<b>8,4</b>	12,5	7,0	9,5
14,0	6,0	17,0	<b>8,3</b>	12,0	7,0	9,9
17,3	17,2	22,4	<b>6,9</b>	11,9	9,6	12,0
13,8	14,2	20,0	<b>6,7</b>	12,0	8,6	10,7

Tabela 6 - Valores de teor de umidade base úmida observados para a "classe 3", posição "centro", obtidos utilizando os três métodos estudados.

<b>Classe 3 - Centro</b>						
<b>UMILOG-M65</b>			<b>Gravimétrico</b>	<b>Equações aplicadas</b>		
Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	<b>UBU</b>	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3
35,4	37,0	50,5	<b>57,0</b>	40,2	49,6	55,4
35,0	36,0	53,0	<b>52,4</b>	39,6	47,9	58,5
46,3	34,3	53,2	<b>49,3</b>	48,8	45,3	58,7
34,5	35,1	43,6	<b>49,0</b>	38,8	46,5	45,9
46,0	36,0	46,2	<b>48,8</b>	48,7	47,9	49,7
44,9	35,1	49,4	<b>48,1</b>	48,5	46,6	54,1
36,5	29,9	41,8	<b>45,8</b>	41,8	37,0	43,0
32,3	31,7	42,3	<b>45,4</b>	35,1	40,6	43,9
48,4	25,9	52,7	<b>45,1</b>	48,7	47,9	58,1
50,2	34,4	54,1	<b>44,4</b>	48,3	45,3	59,7
45,6	35,5	53,6	<b>44,1</b>	48,7	47,2	59,2
49,1	34,6	50,3	<b>44,0</b>	48,6	45,6	55,2
27,7	28,9	34,1	<b>43,2</b>	25,6	34,8	29,4
28,4	27,2	32,4	<b>42,9</b>	27,2	30,8	26,2
31,7	31,5	39,4	<b>41,2</b>	34,0	40,3	39,1
31,1	30,0	40,2	<b>40,9</b>	32,8	35,7	40,4
33,4	32,5	37,1	<b>40,2</b>	37,1	42,1	35,1
34,7	33,3	39,9	<b>40,1</b>	39,2	43,5	39,9
31,8	30,2	36,2	<b>38,5</b>	34,1	37,6	33,5
27,9	27,1	33,6	<b>38,2</b>	26,1	30,6	28,4
31,9	29,3	36,7	<b>38,1</b>	34,4	35,7	34,4
27,3	26,9	33,4	<b>38,0</b>	24,7	30,0	28,1
27,4	27,7	31,8	<b>37,7</b>	24,9	31,9	24,9
30,4	28,4	35,4	<b>36,4</b>	31,5	33,7	32,0
30,4	27,9	35,7	<b>36,3</b>	31,4	32,6	32,5
28,9	27,5	34,4	<b>36,2</b>	28,3	31,7	30,0
27,6	27,1	32,4	<b>35,5</b>	25,3	30,7	26,1
29,8	27,2	36,1	<b>34,1</b>	30,2	30,7	33,2
29,2	27,8	33,6	<b>33,9</b>	28,9	32,3	28,4
29,1	25,7	32,0	<b>33,9</b>	28,7	26,8	25,5
28,4	27,8	33,6	<b>33,3</b>	27,3	32,2	28,5
30,7	26,9	33,4	<b>33,1</b>	32,1	30,0	28,2
29,1	28,1	34,6	<b>33,0</b>	28,6	33,1	30,4

27,6	27,3	31,1	<b>32,9</b>	25,3	31,1	23,5
29,0	28,2	33,3	<b>31,3</b>	28,4	33,3	27,9
27,6	27,3	32,5	<b>30,9</b>	25,3	31,0	26,4
29,3	28,2	32,5	<b>30,3</b>	29,1	33,4	26,5
29,6	28,3	33,2	<b>29,9</b>	29,7	33,6	27,7
30,0	29,1	40,4	<b>29,6</b>	30,7	35,2	40,8
26,2	27,0	31,3	<b>28,8</b>	22,0	30,2	24,0
27,8	25,8	28,9	<b>28,6</b>	25,8	26,9	18,8
29,6	29,2	36,8	<b>27,9</b>	29,7	35,5	34,5
29,8	27,0	34,6	<b>26,5</b>	30,2	30,3	30,4
29,5	27,6	33,6	<b>25,8</b>	29,4	31,8	28,6
29,9	24,9	34,1	<b>25,3</b>	30,2	24,0	29,5
29,5	24,6	33,7	<b>24,5</b>	29,6	23,2	28,7
28,3	26,5	33,1	<b>23,7</b>	27,0	29,0	27,5
28,0	24,5	32,2	<b>23,6</b>	26,3	22,9	25,8
34,1	30,9	36,5	<b>23,1</b>	38,2	39,0	33,9
28,6	23,4	31,8	<b>23,0</b>	27,5	18,9	25,1
28,6	26,7	33,4	<b>23,0</b>	27,6	29,5	28,1
32,8	30,5	36,2	<b>21,3</b>	36,0	38,2	33,4
26,1	26,6	28,0	<b>17,9</b>	21,7	29,3	17,3
25,5	26,0	30,2	<b>17,5</b>	20,1	27,7	21,8
29,8	27,6	34,8	<b>17,4</b>	30,1	31,8	30,8
29,9	25,7	34,4	<b>17,3</b>	30,3	26,7	30,1
29,3	25,5	32,0	<b>16,3</b>	29,1	26,1	25,3
24,1	23,7	27,3	<b>12,9</b>	16,3	20,3	15,7
27,8	27,7	33,2	<b>12,8</b>	25,9	32,2	27,8
28,7	26,7	32,6	<b>12,6</b>	27,8	29,5	26,7
22,7	22,7	24,7	<b>12,6</b>	12,1	16,3	10,0
15,7	14,8	20,5	<b>10,9</b>	3,6	1,8	1,7
28,8	28,9	32,1	<b>10,6</b>	28,1	34,8	25,6
16,6	14,9	21,9	<b>10,2</b>	4,4	2,0	3,3

Tabela 7 - Valores de teor de umidade base úmida observados para a "classe 3", posição "ponta", obtidos utilizando os três métodos estudados.

UMILOG-M65			Classe 3 - Ponta			
			Gravimétrico	Equações aplicadas		
Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	UBU	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3
34,8	34,6	39,2	<b>54,3</b>	54,6	69,1	49,8
34,6	32,1	39,0	<b>51,2</b>	53,7	54,5	48,7
33,1	31,1	39,0	<b>49,4</b>	45,1	47,8	48,6
34,4	31,3	41,0	<b>49,3</b>	52,6	50,4	57,4
32,4	30,3	39,0	<b>49,1</b>	41,3	45,4	48,8
30,8	31,8	39,5	<b>49,0</b>	34,0	52,6	45,1
30,4	28,4	38,9	<b>46,0</b>	32,5	37,0	48,5
30,9	28,3	35,4	<b>45,8</b>	34,5	36,8	35,1

33,7	30,6	39,5	<b>44,7</b>	48,4	46,8	50,7
33,8	29,9	38,6	<b>44,6</b>	48,6	43,2	46,9
31,2	30,5	37,3	<b>44,3</b>	36,1	46,1	42,3
31,7	29,2	36,3	<b>42,7</b>	38,4	39,9	38,2
29,9	29,3	34,1	<b>41,3</b>	30,5	40,6	31,0
29,1	27,0	33,2	<b>41,0</b>	27,2	31,5	28,4
34,2	33,1	38,6	<b>37,9</b>	51,0	60,1	47,0
29,5	29,1	34,1	<b>37,9</b>	28,9	39,8	30,9
31,1	27,5	34,6	<b>37,5</b>	35,5	33,5	32,6
29,1	27,5	33,1	<b>37,3</b>	27,0	33,3	28,1
33,6	33,2	37,2	<b>37,2</b>	48,0	60,9	41,7
28,1	26,9	32,0	<b>35,7</b>	24,2	31,0	24,9
29,6	26,5	33,1	<b>35,7</b>	29,2	29,6	28,1
29,0	28,4	33,5	<b>34,4</b>	26,8	36,7	29,2
28,9	26,4	31,4	<b>33,6</b>	26,6	29,1	23,4
30,3	27,6	34,1	<b>33,4</b>	32,2	33,8	30,8
29,8	27,1	33,9	<b>29,4</b>	29,9	31,6	30,3
29,2	29,6	37,7	<b>27,7</b>	27,6	42,0	43,6
28,0	26,4	32,5	<b>27,5</b>	23,9	29,1	26,4
28,8	26,2	33,1	<b>26,4</b>	26,2	28,4	28,1
29,0	26,6	32,3	<b>26,1</b>	26,7	30,1	25,9
29,8	27,2	33,3	<b>25,8</b>	30,0	32,1	28,4
29,8	28,8	34,4	<b>25,4</b>	30,1	38,4	32,1
29,5	27,3	33,0	<b>24,4</b>	28,9	32,6	27,6
27,6	23,7	31,3	<b>24,0</b>	22,3	20,8	23,0
28,7	29,4	33,8	<b>23,2</b>	25,8	40,7	30,2
28,1	27,1	32,3	<b>23,0</b>	24,0	31,6	25,8
27,3	26,2	31,1	<b>22,1</b>	21,2	28,5	22,7
28,0	27,5	33,1	<b>21,8</b>	23,7	33,6	28,0
27,3	25,6	32,6	<b>21,6</b>	21,3	26,4	26,7
27,6	26,9	32,1	<b>21,5</b>	22,3	31,0	25,2
28,3	27,0	32,4	<b>20,9</b>	24,6	31,4	26,1
27,5	26,6	31,1	<b>20,8</b>	22,0	29,9	22,6
26,2	23,1	30,1	<b>19,6</b>	18,1	19,2	20,1
27,3	25,8	30,7	<b>19,5</b>	21,2	27,2	21,4
27,9	23,2	31,8	<b>19,3</b>	23,2	19,3	24,3
27,1	23,0	30,9	<b>18,9</b>	20,8	18,7	22,1
24,9	22,4	28,5	<b>18,9</b>	15,0	17,5	16,8
24,8	22,1	27,7	<b>18,9</b>	14,8	16,7	14,6
25,5	23,1	29,1	<b>18,9</b>	16,2	19,0	17,8
27,4	29,3	31,1	<b>18,2</b>	21,7	31,7	22,6
26,4	26,2	30,8	<b>16,8</b>	18,6	28,6	21,9
26,2	24,0	28,5	<b>12,0</b>	18,2	21,5	16,8
12,1	12,5	17,4	<b>11,4</b>	8,1	11,7	7,4
24,3	21,7	26,6	<b>11,3</b>	13,7	16,0	13,5
14,1	13,6	19,4	<b>11,3</b>	8,2	12,1	7,7
27,5	26,1	30,7	<b>11,1</b>	22,2	28,0	21,5

23,7	20,1	25,4	<b>10,9</b>	12,4	14,8	11,7
25,0	24,4	27,2	<b>10,8</b>	15,2	22,6	14,6
17,8	16,3	22,1	<b>10,0</b>	8,6	13,1	8,3
12,3	13,6	17,2	<b>9,7</b>	8,1	12,1	7,4
23,6	20,4	25,4	<b>9,4</b>	12,3	14,9	11,7
8,1	2,1	11,3	<b>9,0</b>	8,2	9,6	7,1
9,7	2,9	12,9	<b>8,9</b>	8,1	9,7	7,2
21,7	21,7	24,2	<b>7,2</b>	9,6	16,0	10,2
15,6	16,3	20,6	<b>6,8</b>	8,3	13,1	7,8

Tabela 8 - Valores de teor de umidade base úmida observados para a "classe 4", posição "centro", obtidos utilizando os três métodos estudados.

Classe 4 - Centro						
UMILOG-M65			Gravimétrico	Equações aplicadas		
Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	UBU	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3
48,4	37,3	53,8	<b>61,0</b>	57,4	58,4	50,0
48,4	36,0	52,9	<b>60,4</b>	57,4	54,6	50,0
35,4	31,4	40,0	<b>52,9</b>	43,6	42,4	43,0
34,3	31,4	41,0	<b>51,5</b>	41,8	42,3	44,1
45,6	35,2	51,2	<b>47,9</b>	55,6	52,4	49,8
45,4	33,6	50,8	<b>47,3</b>	55,4	48,1	49,8
42,4	34,0	50,1	<b>47,3</b>	52,7	48,9	49,6
45,7	33,7	48,6	<b>47,2</b>	55,6	48,2	49,1
38,4	29,8	44,0	<b>46,7</b>	48,0	38,4	46,6
38,0	33,9	43,9	<b>46,2</b>	47,4	48,8	46,5
44,7	33,2	51,2	<b>46,2</b>	54,8	47,0	49,8
46,7	34,5	38,1	<b>46,2</b>	56,3	50,4	40,8
43,7	33,0	48,0	<b>46,0</b>	54,0	46,4	48,9
34,5	33,5	41,4	<b>45,1</b>	42,1	47,8	44,4
33,0	29,3	38,3	<b>43,1</b>	39,6	37,2	41,1
35,2	30,3	38,9	<b>43,1</b>	43,3	39,5	41,7
34,7	30,7	39,9	<b>42,5</b>	42,5	40,5	42,9
33,3	30,4	35,8	<b>42,5</b>	40,1	39,9	37,8
33,0	30,1	36,7	<b>42,5</b>	39,6	39,0	38,9
30,8	28,9	38,7	<b>42,4</b>	35,4	36,2	41,4
33,3	29,3	40,0	<b>42,2</b>	40,1	37,1	42,9
31,6	31,0	36,8	<b>41,8</b>	37,1	41,2	39,1
33,0	32,4	39,3	<b>40,0</b>	39,5	44,8	42,2
31,4	31,8	38,1	<b>39,9</b>	36,6	43,3	40,8
29,5	27,5	34,2	<b>39,0</b>	32,8	33,2	35,4
29,3	28,1	33,8	<b>38,8</b>	32,5	34,5	34,7
28,9	27,6	34,1	<b>38,7</b>	31,5	33,6	35,2
28,3	25,9	32,7	<b>38,1</b>	30,5	29,8	33,0
28,8	27,4	34,6	<b>38,1</b>	31,4	33,0	36,0
29,1	28,2	33,2	<b>37,3</b>	32,0	34,9	33,8
29,2	27,4	34,0	<b>37,1</b>	32,3	33,1	35,2
28,9	27,3	32,4	<b>35,3</b>	31,5	32,8	32,6
32,1	30,3	40,1	<b>33,9</b>	38,0	39,5	43,1
31,9	32,5	41,1	<b>33,2</b>	37,6	45,0	44,1
29,2	26,0	33,6	<b>32,1</b>	32,2	30,1	34,4
30,2	28,0	33,4	<b>31,9</b>	34,2	34,4	34,2
28,4	26,1	32,2	<b>31,6</b>	30,8	30,4	32,1
29,9	24,3	31,1	<b>30,8</b>	33,6	26,7	30,3
28,2	25,4	31,2	<b>29,8</b>	30,2	29,0	30,4
29,2	26,6	31,6	<b>29,0</b>	32,2	31,4	31,1
29,3	27,0	32,5	<b>28,3</b>	32,4	32,2	32,6
28,5	26,9	32,9	<b>27,7</b>	30,9	31,8	33,3
32,6	30,8	38,2	<b>25,9</b>	38,8	40,9	41,0

28,6	28,9	36,0	<b>25,1</b>	30,9	36,3	38,0
30,4	32,3	37,3	<b>25,0</b>	34,7	44,5	39,8
30,9	31,4	38,7	<b>22,0</b>	35,5	42,3	41,6
28,4	28,1	32,8	<b>21,8</b>	30,7	34,6	33,1
29,4	26,2	35,1	<b>20,8</b>	32,7	30,5	36,8
28,8	27,6	33,6	<b>20,3</b>	31,4	33,5	34,5
27,0	27,1	36,9	<b>20,1</b>	27,7	32,2	39,3
29,7	30,2	32,6	<b>18,8</b>	33,3	39,4	32,9
30,6	25,7	36,2	<b>18,0</b>	35,2	29,4	38,3
28,9	27,0	32,2	<b>15,8</b>	31,6	32,3	32,1
22,7	10,1	25,4	<b>14,5</b>	17,1	16,8	18,8
20,8	12,4	24,1	<b>13,5</b>	13,5	17,8	15,8
28,9	24,0	32,8	<b>13,3</b>	31,6	26,2	33,2

Tabela 9 - Valores de teor de umidade base úmida observados para a "classe 4", posição "ponta", obtidos utilizando os três métodos estudados.

UMILOG-M65			Classe 4 - Ponta			
			Gravimétrico	Equações aplicadas		
Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3	UBU	Sonda 1	Sonda 2	Sonda 3
34,4	33,6	45,5	<b>61,1</b>	47,1	58,7	63,3
32,6	32,3	44,0	<b>60,5</b>	38,5	51,1	57,8
33,8	32,9	37,0	<b>51,3</b>	43,9	54,7	36,3
31,9	27,1	35,9	<b>49,1</b>	36,0	28,1	33,5
33,4	31,0	39,9	<b>48,8</b>	42,2	44,5	44,4
33,7	31,9	39,1	<b>47,6</b>	43,6	48,6	42,0
33,6	31,8	40,4	<b>47,4</b>	43,1	48,3	45,9
32,6	30,7	38,3	<b>47,3</b>	38,7	43,0	39,8
32,5	29,9	37,3	<b>47,0</b>	38,1	39,2	36,9
32,9	31,7	34,2	<b>46,7</b>	39,8	48,4	29,4
32,8	29,7	38,4	<b>46,6</b>	39,2	38,3	40,1
33,2	31,2	39,8	<b>46,5</b>	41,2	45,5	44,2
31,6	29,5	38,9	<b>46,2</b>	34,5	37,3	41,5
32,8	30,0	39,9	<b>46,2</b>	39,7	39,7	44,3
33,0	30,4	38,7	<b>45,8</b>	40,2	41,4	41,0
31,7	28,2	36,8	<b>41,5</b>	34,9	32,4	35,8
32,6	28,4	36,4	<b>41,3</b>	38,7	33,2	34,7
30,7	27,2	34,8	<b>41,2</b>	31,5	28,4	30,8
31,9	27,4	34,8	<b>40,7</b>	36,0	29,1	30,8
31,9	28,2	36,0	<b>40,5</b>	35,5	32,4	33,9
31,9	29,1	35,2	<b>40,4</b>	36,0	35,6	31,8
32,4	27,8	36,1	<b>40,3</b>	37,8	30,8	34,0
33,0	32,7	36,1	<b>38,2</b>	40,5	53,6	33,9
35,1	34,2	39,9	<b>36,9</b>	50,6	61,8	44,4
33,4	28,1	36,9	<b>34,6</b>	42,1	31,9	36,1
30,6	27,9	34,8	<b>31,1</b>	30,9	28,3	30,9
30,0	28,0	36,1	<b>30,6</b>	29,1	31,4	34,1

31,3	28,7	35,5	<b>30,4</b>	33,4	34,0	32,5
31,1	28,0	36,3	<b>30,4</b>	32,7	31,5	34,4
30,5	29,1	36,2	<b>29,9</b>	30,6	35,6	34,4
31,2	27,4	34,5	<b>28,3</b>	29,4	29,2	30,2
30,4	26,4	36,2	<b>27,3</b>	30,4	25,8	34,3
31,2	30,6	38,9	<b>27,1</b>	33,3	42,6	41,6
32,1	30,9	38,9	<b>25,9</b>	36,5	44,2	41,6
29,6	28,6	35,5	<b>23,4</b>	27,8	33,8	32,6
26,7	26,1	31,7	<b>23,1</b>	21,2	24,7	24,1
26,8	26,6	30,9	<b>23,0</b>	21,3	26,3	22,6
29,3	26,7	32,6	<b>22,7</b>	26,7	26,8	26,0
30,5	29,5	36,2	<b>22,7</b>	30,8	37,4	34,3
30,3	27,7	31,5	<b>22,0</b>	30,0	30,5	23,7
27,6	24,1	31,8	<b>20,5</b>	23,0	18,7	24,4
32,6	30,8	38,1	<b>19,7</b>	38,5	43,3	39,2
24,0	23,3	26,0	<b>15,4</b>	17,6	16,6	16,2
22,6	22,4	24,8	<b>15,0</b>	17,0	14,3	13,4
25,0	24,8	27,9	<b>13,6</b>	18,5	20,6	17,6
24,2	19,2	25,8	<b>12,9</b>	17,8	11,6	14,7
28,9	28,4	32,1	<b>12,7</b>	25,8	33,0	25,0
23,2	23,7	25,7	<b>12,1</b>	17,2	17,2	14,5
23,0	19,8	24,9	<b>11,0</b>	17,1	11,9	13,6
26,7	26,2	29,5	<b>10,6</b>	21,1	25,1	20,1
26,4	23,7	29,1	<b>10,5</b>	20,5	17,4	19,4
23,8	20,8	25,8	<b>10,3</b>	17,5	12,3	14,7
11,0	12,1	16,3	<b>9,9</b>	19,4	9,1	9,5
25,5	22,9	28,2	<b>9,5</b>	19,2	15,6	18,1
25,9	26,6	28,7	<b>9,4</b>	19,8	26,4	18,8
10,6	10,2	14,6	<b>9,0</b>	19,5	8,6	9,2

### 5.1.1. Equações matemáticas entre BIT's x teor de umidade

Na Tabela 10 estão apresentadas as equações obtidas durante o trabalho, em que “x” é o número de BIT's e “y” é o teor de umidade, em base úmida, estimado (UBU). Dentre as equações geradas, o maior valor de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi 0,9137 (Sonda 1, Classe 1, Centro), e o menor foi 0,5481 (Sonda 2, Classe 4, Centro). Do total das equações geradas 76,6% dos valores de  $R^2$  foram superiores a 0,7, sendo que apenas 6,6% ficaram abaixo de 0,6.

Tabela 10 - Equações geradas a partir de todos os dados obtidos nas três fases de coleta, sendo uma para cada sonda, classe de diâmetro e posição de coleta

<b>Equações de calibração para conversão de BIT's em teor de umidade base úmida</b>					
<b>Sonda</b>	<b>Classe Diamétrica</b>	<b>Posição</b>	<b>Equação matemática</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	
Sonda 1	1	Centro	$y = -1E-08x^2 + 0,0017x - 2,789$	$R^2 = 0,9137$	
		Ponta	$y = 4E-08x^2 + 0,0004x + 5,5227$	$R^2 = 0,8827$	
	2	Centro	$y = -2E-08x^2 + 0,0022x - 9,6076$	$R^2 = 0,8324$	
		Ponta	$y = 5E-08x^2 + 2E-05x + 6,6986$	$R^2 = 0,7798$	
	3	Centro	$y = -3E-08x^2 + 0,0028x - 16,511$	$R^2 = 0,6235$	
		Ponta	$y = 8E-08x^2 - 0,0007x + 9,3738$	$R^2 = 0,7994$	
	4	Centro	$y = -2E-08x^2 + 0,0023x - 7,0568$	$R^2 = 0,6604$	
		Ponta	$y = 1E-07x^2 - 0,0022x + 29,078$	$R^2 = 0,7735$	
	Geral	Centro	$y = -2E-08x^2 + 0,0021x - 5,3365$	$R^2 = 0,7156$	
		Ponta	$y = 6E-08x^2 - 0,0001x + 5,9866$	$R^2 = 0,789$	
	Sonda 2	1	Centro	$y = 2E-08x^2 + 0,0011x + 1,5907$	$R^2 = 0,8944$
			Ponta	$y = 1E-07x^2 - 0,0005x + 8,7548$	$R^2 = 0,8761$
2		Centro	$y = 1E-08x^2 + 0,0015x - 2,0053$	$R^2 = 0,8568$	
		Ponta	$y = 8E-08x^2 - 0,0004x + 7,2802$	$R^2 = 0,7945$	
3		Centro	$y = 30,89\ln(x) - 272,73$	$R^2 = 0,583$	
		Ponta	$y = 8E-08x^2 - 0,0002x + 9,5029$	$R^2 = 0,7744$	
4		Centro	$y = 2E-08x^2 + 0,0008x + 11,552$	$R^2 = 0,5481$	
		Ponta	$y = 8E-08x^2 - 0,0003x + 7,6347$	$R^2 = 0,6527$	
Geral		Centro	$y = 8E-09x^2 + 0,0015x + 1,215$	$R^2 = 0,7393$	
		Ponta	$y = 5E-08x^2 + 0,0004x + 4,6146$	$R^2 = 0,7367$	
Sonda 3		1	Centro	$y = -3E-09x^2 + 0,0011x + 2,0667$	$R^2 = 0,8801$
			Ponta	$y = 2E-08x^2 + 0,0002x + 9,5191$	$R^2 = 0,9117$
	2	Centro	$y = -4E-09x^2 + 0,0013x - 4,0594$	$R^2 = 0,8628$	
		Ponta	$y = 1E-08x^2 + 0,0005x + 5,073$	$R^2 = 0,8094$	
	3	Centro	$y = -1E-08x^2 + 0,0019x - 15,682$	$R^2 = 0,6651$	
		Ponta	$y = 5E-08x^2 - 0,0006x + 8,94$	$R^2 = 0,853$	
	4	Centro	$y = -2E-08x^2 + 0,0022x - 15,518$	$R^2 = 0,641$	
		Ponta	$y = 3E-08x^2 - 8E-05x + 8,1769$	$R^2 = 0,8175$	
	Geral	Centro	$y = -7E-09x^2 + 0,0014x - 2,9683$	$R^2 = 0,7359$	
		Ponta	$y = 3E-08x^2 + 3E-05x + 7,6649$	$R^2 = 0,7966$	

O valor de  $R^2$  varia de 0 a 1, sendo que valores próximos de 1 indicam maior proximidade do perfil com o modelo de regressão ideal (Cota et al., 2021). Dessa forma, valores de  $R^2$  próximos de 1 representam maior adequação da curva aos dados

e provavelmente a um melhor desempenho das equações matemáticas para estimar o teor de umidade, a partir no número de BIT's obtido. Os valores mais baixos de  $R^2$  foram observados para as classes de diâmetro 3 e 4 (0,583 e 0,5481, respectivamente), sendo que para as classes de diâmetro 1 e 2, o menor valor foi 0,7798 (Sonda 1, Classe 2, Ponta). Maiores classes de diâmetro proporcionam maior dificuldade de calibração a partir da elaboração das equações matemáticas, devido aos valores de  $R^2$  mais baixos, e conseqüentemente menor precisão. Tal fato está associado à maior variação no teor de umidade ao longo do sentido radial do torete.

De modo geral ocorre uma diminuição no teor de umidade da madeira de eucalipto na direção medula-casca, com ligeiro aumento na região periférica do alburno, variando o perfil de acordo com a espécie (Oliveira et al., 2005). Os autores verificaram esse comportamento estudando sete espécies de *Eucalyptus spp.* com 16 anos, sendo a variação do teor de umidade no sentido radial significativa em todas as espécies, exceto *E. citriodora*, com nível de significância de 1%. Oliveira et al. (2005) observaram teores de umidade mais elevados na região basal do tronco da árvore (maiores diâmetros), com redução no sentido longitudinal até a metade da altura da planta, e novo acréscimo a partir do terço superior até o topo para cinco espécies de *Eucalyptus spp.*

Em 60% dos cenários avaliados nesse estudo, para mesmo tipo de sonda e classe de diâmetro a posição "Ponta" apresentou valor de  $R^2$  superior à posição "Centro". Sendo que a maior diferença observada entre os valores foi para a Sonda 2, Classe 3, em que o valor de  $R^2$  na posição "Ponta" foi superior 0,2254 em relação à posição "Centro". Apesar dessa diferença, os valores não se mostraram distantes de maneira geral, sendo a posição "Ponta" pouco superior à posição "Centro".

A velocidade de secagem da madeira sofre influência da umidade relativa do ambiente, sendo maior nas regiões em que a umidade relativa do ambiente é menor (Gonzalez Cruz et al., 2020). Tal fato provoca maiores gradientes de umidade entre a região mais exposta da madeira (superfície) e o interior da peça (Gonzalez Cruz et al., 2020). Dessa forma, dados coletados na ponta sofrem menos influência do gradiente de umidade longitudinal e radial por serem coletados na região mais exposta da peça e no sentido paralelo às fibras.

As equações matemáticas construídas possuem relação com o tipo de sonda, classe de diâmetro e posição na tora para determinação do teor de umidade de forma

simultânea. Dessa forma, cada valor de BIT's ao ser substituído no "X" da equação deve estar de acordo com tal situação. Para cada sonda foi construída também uma equação geral que não leva em consideração a classe de diâmetro do torete, sendo então determinada apenas pela posição de coleta. Tal equação teve objetivo de avaliar o desempenho do equipamento desconsiderando a classe de diâmetro da tora. A distribuição dos dados de teor de umidade, base úmida, e número de BIT's, está apresentada nas Figuras 4, 5 e 6.

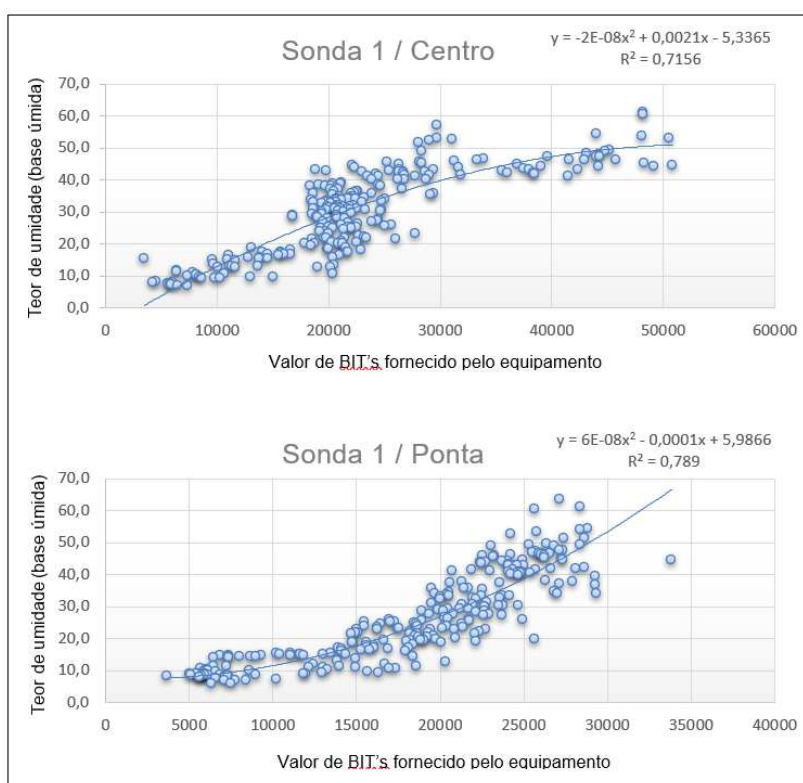


Figura 4 - Dispersão dos dados de teor de umidade (base úmida) x valor de BIT's para a Sonda 1.

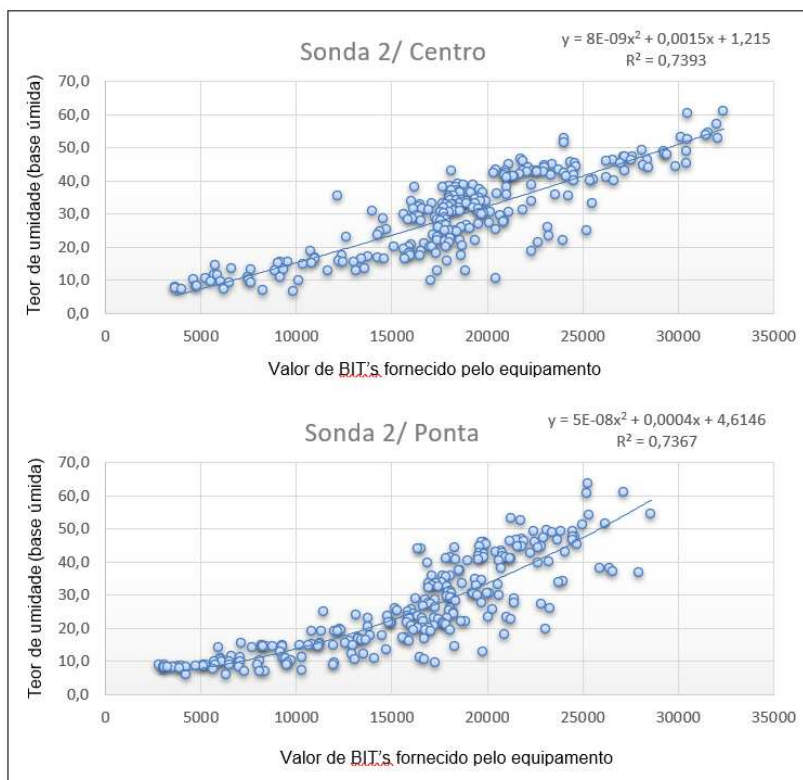


Figura 5- Dispersão dos dados de teor de umidade (base úmida) x valor de BIT's para a Sonda 2.

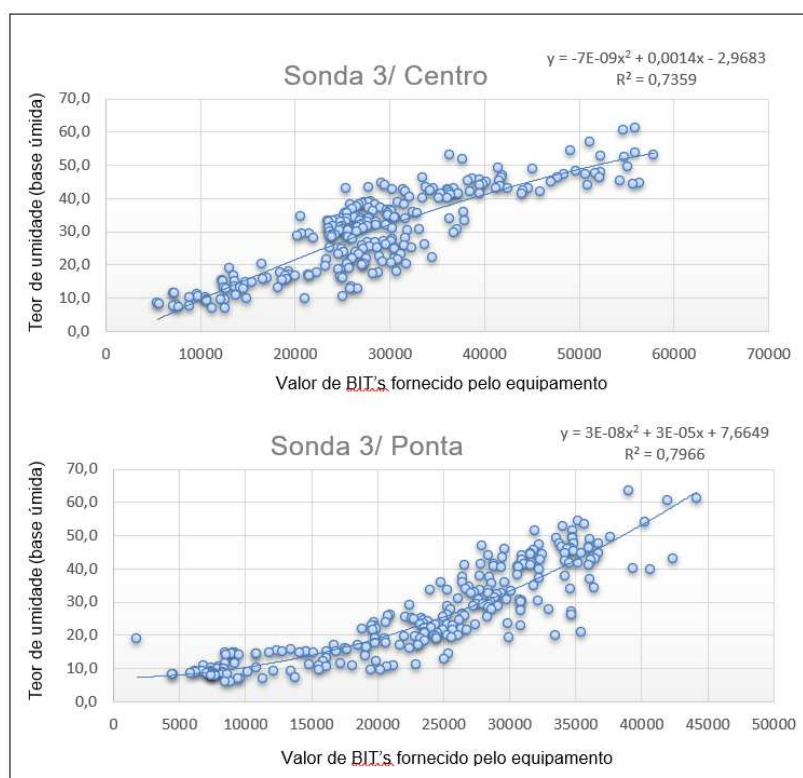


Figura 6 - Dispersão dos dados de teor de umidade (base úmida) x valor de BIT's para a Sonda 3.

Os valores de  $R^2$  para as equações gerais estão entre 0,7 e 0,8 para todas as sondas e posições de coleta. Os valores de  $R^2$  das equações gerais se mantêm na

média quando levado em consideração os valores máximos e mínimos obtidos a partir das equações elaboradas para cada classe de diâmetro.

Goltz (2018) utilizando sensor capacitivo para determinação do teor de umidade, em cavacos, obteve resultados de coeficientes de determinação  $R^2$  entre o teor de umidade real e o valor em BITS, fornecido pelo equipamento, superiores a 0,90, para teores de umidade, em base úmida, de até 50%. Kandala et al. (2016) também obtiveram resultados de  $R^2$  superiores a 0,9 para equações calibradas a partir de um sensor capacitivo para estimar o teor de umidade, em cavacos, e base úmida, de até 50%. Apesar de ambos os equipamentos utilizarem o método dielétrico para determinação do teor de umidade, um fator importante que difere o atual estudo dos trabalhos mencionados é a dimensão (diâmetro) da madeira. A dimensão do cavaco confere maior homogeneidade do teor de umidade da amostra e maior exposição da mesma à sonda, quando comparados com o gradiente de umidade e exposição da madeira roliça.

### 5.1.2. Comparação do desempenho antes e após aplicadas as equações

O percentual de acerto considerando um erro máximo de  $\pm 5$  pontos percentuais do equipamento UMILOG-M65, em sua configuração original (M65), e após a correção dos valores de teor de umidade, base úmida, por meio das equações (Eq. Aplicadas), em relação ao método gravimétrico, é apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Percentual de acerto dentro da faixa de 5% de erro, para cada sonda, classe de diâmetro e posição – M65 (Equipamento UMILOG) / Eq. Aplicadas (equações aplicadas sobre os dados utilizados para gerá-las).

Percentual de acerto				
Sonda	Classe Diamétrica	Posição	M65	Eq. Aplicadas
Sonda 1	1	Centro	62,90%	70,97%
		Ponta	53,23%	82,26%
	2	Centro	43,75%	73,44%
		Ponta	46,88%	65,63%
	3	Centro	40,63%	56,25%
		Ponta	28,13%	73,44%
	4	Centro	32,14%	50,00%
		Ponta	25,00%	44,64%
	Geral	Centro	45%	60%
		Ponta	37%	65%
Sonda 2	1	Centro	43,55%	75,81%

		Ponta	51,61%	83,87%
	2	Centro	39,06%	71,88%
		Ponta	37,50%	67,19%
	3	Centro	29,69%	57,81%
		Ponta	35,94%	57,81%
	4	Centro	19,64%	60,71%
		Ponta	28,57%	51,79%
	Geral	Centro	33%	60%
		Ponta	39%	57%
Sonda 3	1	Centro	51,61%	70,97%
		Ponta	37,10%	83,87%
	2	Centro	46,88%	75,00%
		Ponta	35,94%	68,75%
	3	Centro	48,44%	53,13%
		Ponta	21,88%	70,31%
	4	Centro	55,36%	62,50%
		Ponta	16,07%	53,57%
	Geral	Centro	50%	57%
		Ponta	27%	63%

Após aplicadas as equações, o maior percentual de acerto foi de 83,87% (Sonda 2, Classe 1, Ponta; e Sonda 3, Classe 1, Ponta). Já o menor percentual de acerto foi de 44,64% (Sonda1, Classe 4, Ponta), porém, o uso das equações, melhorou a estimativa do teor de umidade, base úmida, em 19,64% em relação à configuração original do equipamento.

O maior percentual de acerto foi registrado para as equações com os maiores valores de  $R^2$  (0,9117 e 0,8761), sendo ambos posicionados na posição da ponta, exceto para a equação gerada para a sonda 1, classe 1, posição “centro” ( $R^2$  0,9137). Diferente também do observado para as equações, a posição centro obteve melhor desempenho em 60% das situações considerando mesma sonda e classe de diâmetro, tendo equações com mesmo desempenho (Sonda 2 e Classe 3).

O percentual médio de acerto do equipamento em sua configuração original (M65) e após as equações aplicadas (Eq. Aplicadas) desconsiderando a posição de coleta dos dados é apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 - Percentual de acerto dentro da faixa de  $\pm 5\%$  de erro, para cada sonda e classe de diâmetro – M65 (Equipamento UMILOG) / Eq. Aplicadas.

Classe	Sonda 1		Sonda 2		Sonda 3	
	M65	Eq. Aplicadas	M65	Eq. Aplicadas	M65	Eq. Aplicadas
1	58,06%	76,61%	47,58%	79,84%	44,35%	77,42%
2	45,31%	69,53%	38,28%	69,53%	41,41%	71,88%
3	34,38%	64,84%	32,81%	57,81%	35,16%	61,72%
4	28,57%	47,32%	24,11%	56,25%	35,71%	58,04%
<b>Geral</b>	41%	62%	36%	58%	39%	60%

Para os três tipos de sondas, verifica-se a tendência de diminuição no percentual de acerto à medida que ocorre o aumento na classe diamétrica, tanto em sua configuração original, quanto após aplicadas às equações de correção. Essa tendência está associada às classes de diâmetro inferior possuírem menor teor e gradiente de umidade, em comparação as de diâmetro superior, e dessa forma toras de menor diâmetro atingem o teor de umidade mais próximo do PSF mais rápido, sendo essa a melhor faixa de leitura para esses equipamentos (Donato et al., 2015).

Para medidores capacitivos a melhor correlação com o teor de umidade, obtido pelo método gravimétrico, para toras de menor diâmetro se deve ao efeito da profundidade do campo elétrico, que mesmo não sendo linear apresenta queda logarítmica na região externa em direção ao interior da tora (Donato et al., 2015). Tal desempenho também pode estar relacionado à relação cerne/alburno para as diferentes classes diamétricas. A profundidade para coleta (5 cm) dos dados em classes de diâmetro superiores pode não ter contemplado à região do cerne e a umidade existente no mesmo, principalmente abaixo do PSF onde o maior volume de água estava presente nessa região.

Oliveira et al. (2005) observaram diferença nos teores de umidade na região do cerne e do alburno em árvores de *Eucalyptus spp.* de 16 anos recém cortadas, utilizando o método gravimétrico. Das sete espécies estudadas apenas *E. paniculata* e *Corymbia citriodora* apresentaram distribuição mais uniforme da umidade ao longo do raio. Todas as demais espécies apresentaram diferença significativa no teor de umidade na região do cerne para a região do alburno. Dessa forma, deve-se promover uma superfície de contato da sonda do equipamento com o cerne e o alburno de forma proporcional, para garantir assim uma amostragem livre de tendências.

Para todas as três sondas, o maior percentual de acerto observado, após aplicadas as equações e desconsiderando a posição de coleta, foi de 79,84% (Sonda 2, Classe1), e o menor 47,32% (Sonda 1, Classe 4). Já para o equipamento em sua configuração original, foi de 58,06% e 24,11% (Sonda 1, Classe 1) e (Sonda 2, Classe 4), respectivamente, evidenciando o melhor desempenho do equipamento em classes de diâmetro inferiores para ambas as configurações.

A equação geral apresentou valores de percentual de acerto abaixo dos valores médios de acerto para as quatro classes de diâmetro, sendo seu maior e menor valor 62% e 58%, respectivamente.

O percentual de acerto médio do equipamento em sua configuração original (M65) e após as equações aplicadas (Eq. Aplicadas), desconsiderando as classes de diâmetro, é apresentada na Tabela 13. Para as sondas 1 e 3, após aplicadas as equações matemáticas, a posição de coleta na ponta se mostrou mais eficiente. Em todas as situações é possível observar o melhor desempenho após aplicadas as equações de correção, sendo o menor percentual de acerto das equações aplicadas para a Sonda 1, Centro (62,08%) superior em relação ao valor máximo de acerto do equipamento em sua configuração original, Sonda 3, Centro (50,46%).

Tabela 13 - Percentual de acerto dentro da faixa de 5% de erro, para cada sonda e posição – M65 (Equipamento UMILOG) / Eq. Aplicadas

Posição	Sonda 1		Sonda 2		Sonda 3	
	M65	Eq. Aplicadas	M65	Eq. Aplicadas	M65	Eq. Aplicadas
<b>Centro</b>	44,83%	62,08%	33,05%	65,27%	50,46%	63,62%
<b>Ponta</b>	38,12%	66,20%	38,45%	63,43%	27,64%	67,90%

Todos os valores de percentual de acerto, após aplicadas as equações, ficaram entre 62 e 68%. Porém, visto que o equipamento em sua configuração original não apresentou desempenho superior a 51%, é possível afirmar que a elaboração de equações de calibração proporcionam ganhos significativos para a faixa de acerto do equipamento.

### 5.1.3. Correlações entre BIT's x Teor de umidade (método gravimétrico)

Os valores de coeficiente de correlação de Pearson estabelecidos entre o valor de BIT's fornecido pelo equipamento no momento da leitura e o teor de umidade base úmida, obtido pelo método gravimétrico, desconsiderando as classes de diâmetro, são

apresentados na Tabela 14. Para todas as três sondas, nas diferentes posições de coleta de dados, houve correlação positiva. O valor do coeficiente de correlação foi superior a 0,8 para todas as situações, sendo o maior valor 0,866 (Sonda 3, Ponta) e o menor valor 0,817 (Sonda 1, Centro).

Tabela 14 - Correlação entre valor de BIT's fornecido pelo equipamento UMILOG-M5 e teor de umidade, base úmida, obtida pelo método gravimétrico.

	<b>Sonda 1</b>	<b>Sonda 2</b>	<b>Sonda 3</b>
<b>Centro</b>	0,817	0,859	0,851
<b>Ponta</b>	0,863	0,836	0,866

Os valores de correlação de Pearson observados para a posição Ponta foram superiores para as sondas 1 e 3, e inferior para a sonda 2. O mesmo comportamento pode ser observado no percentual de acerto para a equação geral. O percentual de acerto foi superior na posição Ponta para as sondas 1 e 3, e inferior para a sonda 2.

Os valores de correlação observados demonstram que o equipamento corresponde em sua leitura de valor de BIT's à variação no teor de umidade da madeira. À medida que o teor de umidade diminui, o valor de BIT's, fornecido pelo equipamento diminui, com maior valor observado de 55963 (Sonda 3, Centro) para teor de umidade base úmida de 60,97%, e menor valor observado de 4234 (Sonda 2, Ponta) para teor de umidade base úmida, 5,75%.

#### **5.1.4. Faixa teor de umidade avaliada a partir do equipamento**

Todos os dados de teor de umidade foram colocados em ordem decrescente, independente da classe de diâmetro, e aplicou a equação geral para cada sonda e posição de coleta da árvore. Após aplicadas as equações, foram selecionadas ao longo da coluna, algumas células, sendo essas onde o erro estava dentro da faixa de  $\pm 5$  pontos percentuais. Na Figura 7, uma coluna representa os resultados obtidos com o equipamento em configuração original (destacadas em amarelo), e a outra coluna, representa os resultados obtidos após aplicada a equação de correção, por meio das equações gerais (destacadas em azul).

Observa-se que após aplicada equação de correção foi possível determinar o teor de umidade, base úmida, ao longo de toda a faixa de variação de umidade. Vale lembrar que o presente trabalho foi realizado considerando o teor de umidade da madeira roliça desde o primeiro dia após o corte, com teor de umidade, base úmida,

acima de 60%, até teores de umidade, base úmida, inferiores a 10%, obtidos pelo método gravimétrico (testemunha). A determinação do teor de umidade com o equipamento UMILOG-M65 em sua configuração original se limitou a faixas superiores ou inferiores, não apresentando precisão ao longo de toda faixa de variação de umidade da tora (Figura 7). Esse comportamento foi observado para todas as três ponteiros nas duas posições de coleta.

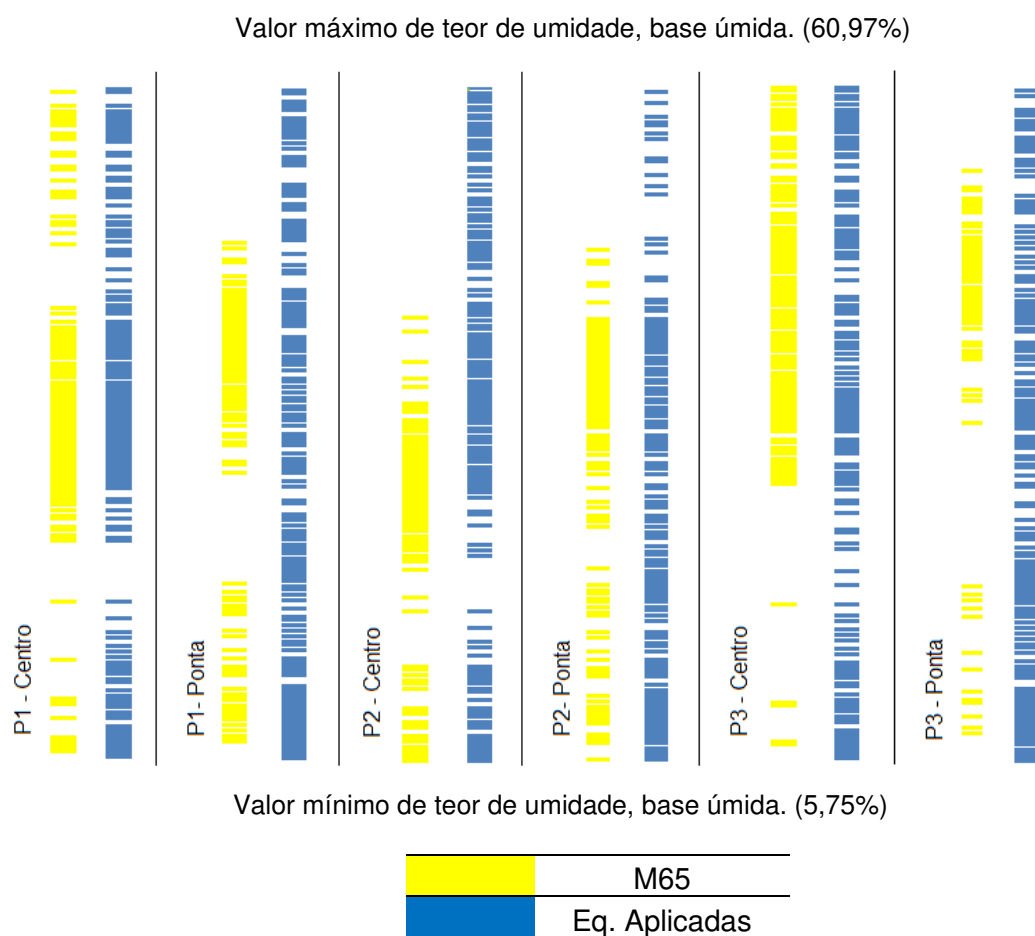


Figura 7 – Demarcação dos acertos dentro do erro de  $\pm 5\%$  para o equipamento M65 (coloração amarela) e após aplicadas equações de correção (coloração azul) ao longo da faixa de umidade. Os acertos dentro da faixa de cinco pontos percentuais para mais ou para menos comparados ao valor de UBU real foram destacados.

A partir dos resultados de correlação de Pearson foi possível afirmar que o equipamento UMILOG-M65 apresenta sensibilidade à variação no teor de umidade presente na madeira, porém o formato de calibração comercial não se mostrou eficiente para toda faixa de umidade da madeira. O modelo de calibração original é

realizado a partir de cinco valores de BIT's associados a cinco valores de teor de umidade, base úmida, formando assim cinco segmentos de reta para representar a variação do teor de umidade da madeira. Tal metodologia torna o equipamento com a receita original 01, limitado à uma pequena faixa de umidade, não sendo possível estimar os diferentes teores de umidade, base úmida, com confiabilidade e precisão.

É possível observar que os valores obtidos pelo equipamento em sua configuração original não acompanham a variação do teor de umidade, base úmida, da madeira, se limitando apenas a uma faixa com limite superior e inferior muito próximos (15 a 35%) (Figura 8). Diferentemente quando observamos a variação no teor de umidade, base úmida, comparada aos dados após a aplicação da equação de correção. Os gráficos a seguir representam os valores de teor de umidade, base úmida, encontrados a partir do equipamento, tendência da área em branco (Valor Corrigido), e os valores de teor de umidade, base úmida, obtidos pelo método gravimétrico, pelas barras em vermelho. Como exemplo, temos os gráficos com dados obtidos através da Sonda 1 (P1) na posição "Ponta", tanto do equipamento M65 com configuração original comparados aos valores de teor de umidade, base úmida, obtidos pelo método gravimétrico (Figura 8), quanto dos dados após a correção com as equações aplicadas comparados aos valores de teor de umidade, base úmida, obtidos pelo método gravimétrico (Figura 9).

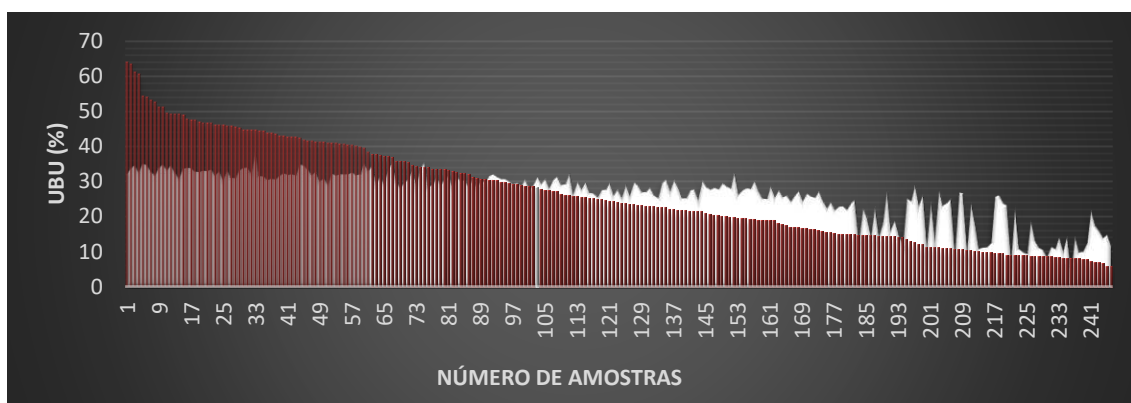


Figura 8 - Curva de secagem da madeira para todas 249 amostras com valores de teor de umidade, base úmida, obtidos pelo método gravimétrico (barras vermelhas), e dados obtidos pelo equipamento em configuração original (M65) (área branca), para Sonda 1, posição "Ponta"

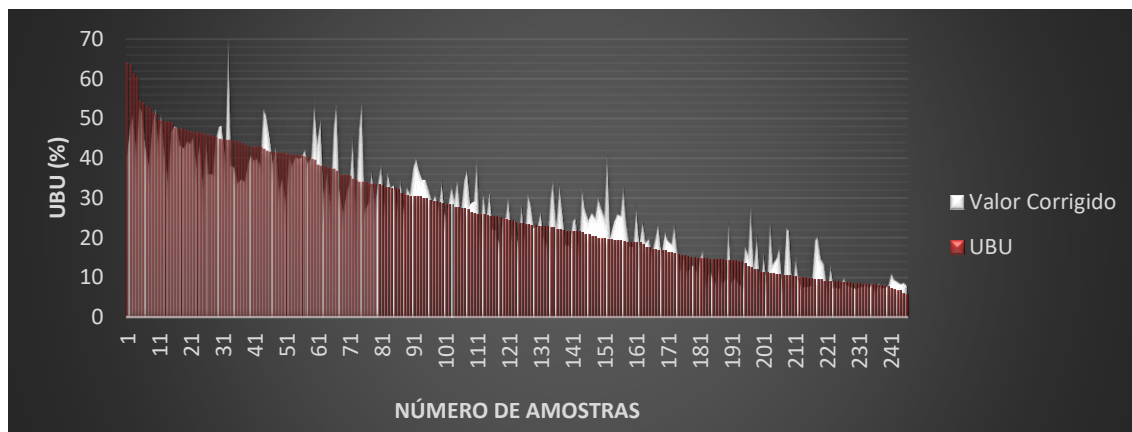
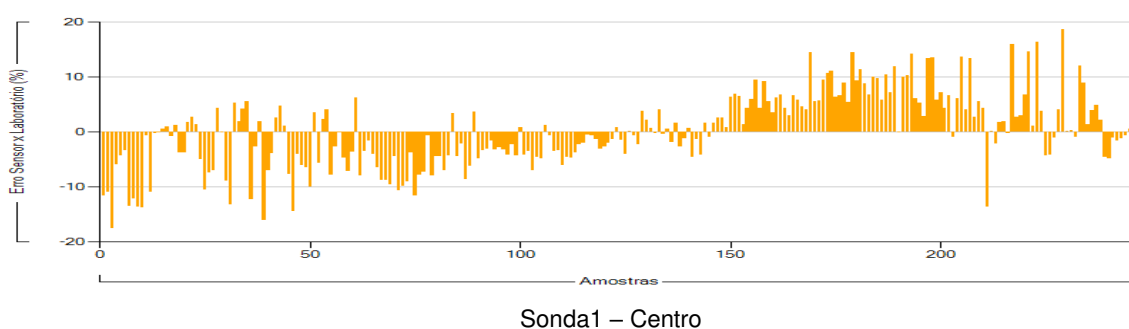


Figura 9 - Curva de secagem da madeira para todas 246 amostras com valores de teor de umidade, base úmida, obtidos pelo método gravimétrico (barras vermelhas), e dados corrigidos após aplicação da equação geral (área branca), para Sonda 1 (P1) posição "Ponta"

Para a situação (sonda 1, Ponta) o equipamento UMILOG-M65 em sua configuração original, apresentou percentual de acerto de 37%, e após aplicada a equação geral de correção, o percentual de acerto foi para 65%, promovendo um ganho de 28 pontos percentuais após a correção. Dessa forma, fica evidente a necessidade de confecção de equações matemáticas para calibração e utilização do equipamento UMILOG-65 de forma mais segura e precisa.

#### 5.1.5. Subestimação ou Superestimação dos dados

A partir do software TRACKER (MARRARI AUTOMAÇÃO ®) foram gerados gráficos que permitiram comparar os dados, destacando o erro que acontece na forma de superestimação ou subestimação dos valores (Figura 10).



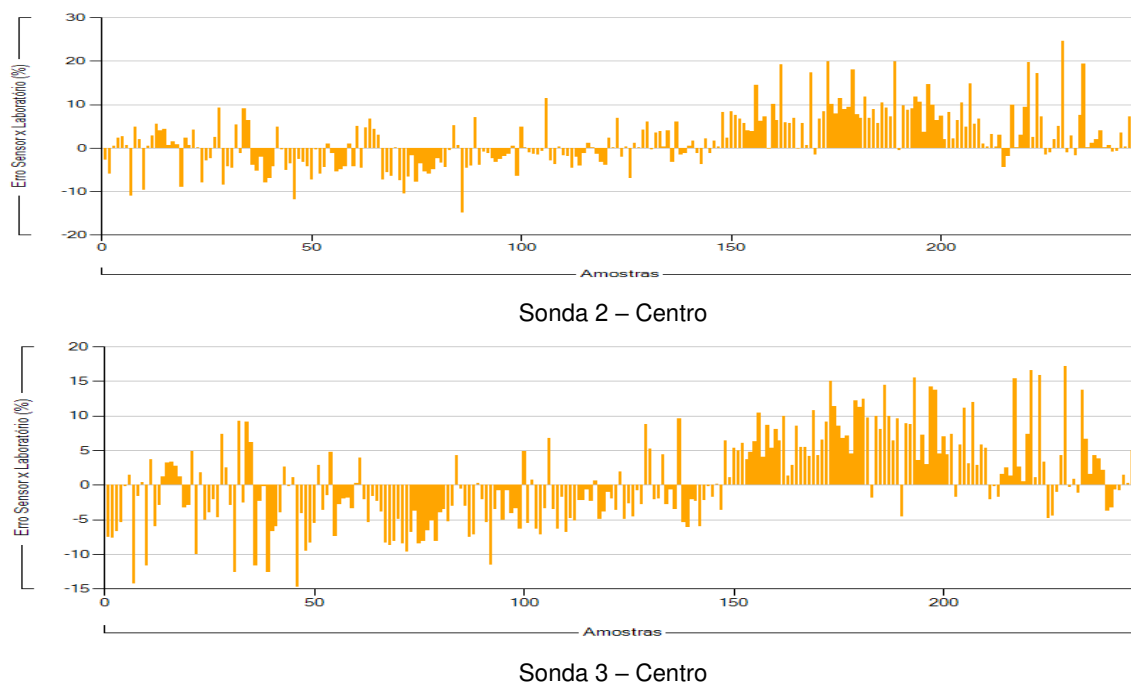


Figura 10 – Gráfico de Qualidade gerado no software TRACKER para o erro do sensor após equações aplicadas em relação ao valor de UBU real, para as três Sondas na posição “Centro”.

Avaliando todos os dados obtidos nas três fases da pesquisa, sem considerar as classes de diâmetro e utilizando os valores corrigidos, a partir dos dados obtidos a partir da “Equação Geral”, verificou-se uma subestimação dos teores de umidade acima de 20%, e uma superestimação dos dados abaixo desse valor, podendo, por exemplo, superestimar em 20% o valor de teor de umidade, base úmida, (Sonda 2). Já em teores de umidade acima de 20%, as equações de calibração proporcionam, subestimação dos dados, moderada, com maior variação de 17%.

A tendência de subestimar os dados até o teor de umidade, base úmida, de 20%, e superestimar abaixo desse valor mostra uma dificuldade de calibração do equipamento, a partir de modelos matemáticos, para toda a faixa de variação de umidade. Apesar das equações terem proporcionado melhores resultados, os gráficos demonstram que dificilmente valores superiores aos encontrados neste trabalho, seguindo a mesma metodologia, serão superados, devido a esta tendência. Em caso de apenas subestimação ou superestimação dos dados, a correção da equação se torna mais simples, sendo possível trabalhar melhor o valor da constante da equação, de forma a “subir” ou “abaixar” a curva.

Outra hipótese pode estar na variação do valor de BIT’s fornecido pelo equipamento, para faixa de teor de umidade. Apesar dos altos valores observados para correlação de Pearson, o equipamento UMILOG-M65 pode variar, em

proporções diferentes, o valor de BIT's para cada percentual de umidade (acima e abaixo de 20% UBU real), tornando assim necessário uma correção no equipamento para proporcionar um melhor desempenho das curvas de calibração.

### 5.1.6. Percentual de acerto

Os valores médios de percentual de acerto para cada uma das classes de diâmetro e para a equação geral, desconsiderando o tipo de Sonda, estão apresentados na Figura 11. Valores obtidos a partir do equipamento em sua configuração original estão representados em amarelo (M65), e valores corrigidos em azul (equações matemáticas da Tabela 8). A partir da Figura 11 é possível comparar os ganhos referentes à aplicação das equações para cada classe de diâmetro e para a equação geral. A partir desse gráfico é possível verificar ganhos próximos a 30 pontos percentuais para as classes de diâmetro 1 e 2; 25 pontos percentuais para a classe 3 e equação geral (Geral); e 20 pontos percentuais para a classe 4, avaliando as três sondas de forma simultânea.

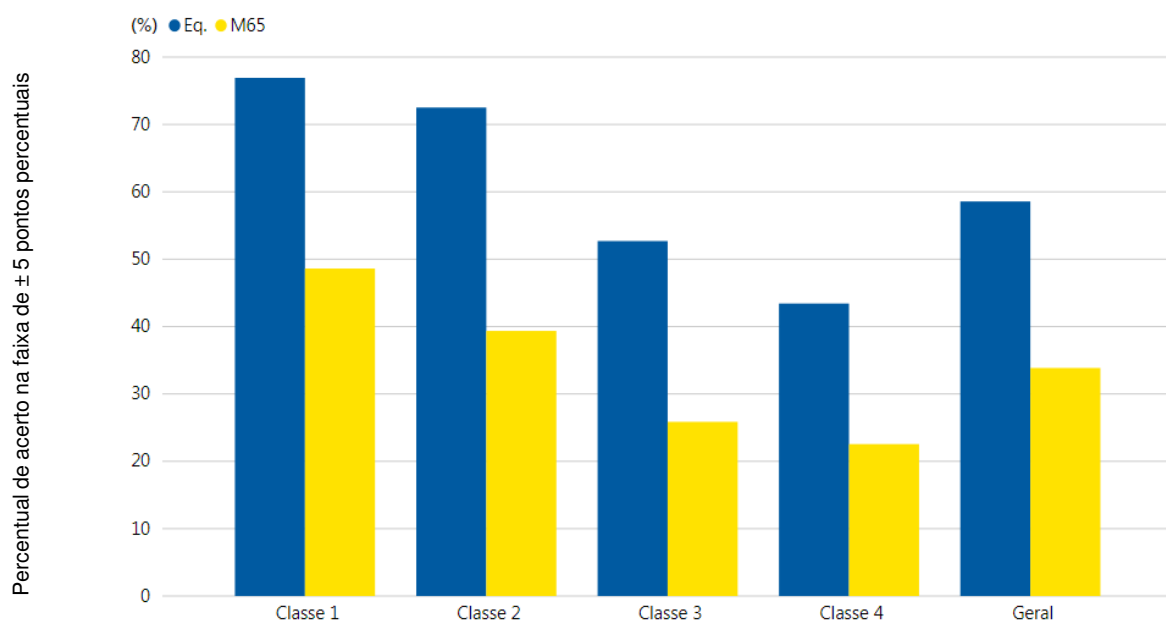


Figura 11 – Valores médios de percentual de acerto para cada uma das classes de diâmetro e para a equação geral, desconsiderando o tipo de sonda e a posição de coleta.

Ainda na Figura 11 é possível verificar a diminuição na precisão do equipamento à medida que se aumenta a classe de diâmetro, seguindo para uma “média” das classes quando se aplica a equação “Geral”. Observa-se, para todas as

classes de diâmetro, e equação geral, que houve maior percentual de acerto após aplicação das equações.

Para medidores elétricos capacitivos, o melhor ajuste de correlação para peças de menor diâmetro está associado ao efeito de profundidade de campo elétrico, visto que apesar de não ser de forma linear o campo elétrico diminui de forma logarítmica da região externa em direção ao centro da peça de madeira (Donato et al., 2020). Dessa forma, madeiras de maior diâmetro possuem maior teor de umidade, e maior variação do teor de umidade no sentido radial da peça de madeira, influenciando negativamente sobre os resultados do equipamento UMILOG-M65.

Na Tabela 15, as “Equações aplicadas” representam o valor médio de acerto final após aplicadas as correções, e “M65” representa o valor médio de acerto final a partir do equipamento em sua configuração original desconsiderando a classe de diâmetro e a posição de coleta dos dados. Para todas as três sondas foi possível perceber melhora no percentual de acerto após aplicadas as equações de correção.

Tabela 15 – Valores médios de acerto dentro da faixa de erro de  $\pm 5\%$  para cada sonda em sua configuração original (M65) e após aplicadas as equações (Equações aplicadas) desconsiderando a posição de coleta.

	<b>Sonda 1</b>	<b>Sonda 2</b>	<b>Sonda 3</b>
<b>Equações aplicadas</b>	64,57%	65,85%	67,26%
<b>M65</b>	41,58%	35,62%	39,15%

Os ganhos após a aplicação das equações de correção foram superiores a vinte pontos percentuais para todas as sondas, sendo que a Sonda 3 apresentou o melhor desempenho. A Sonda 2 e Sonda 1 ficaram com segundo e terceiro melhor desempenho, respectivamente. Tais valores evidenciam a diferença de sensibilidade de cada sonda ao campo elétrico da madeira, podendo estar associada à superfície de contato ou material utilizado na produção da sonda.

Na Figura 12 são apresentados os acertos médios percentuais, por classe de diâmetro e posição de coleta dos dados, desconsiderando os tipos de sondas, utilizando apenas o valor médio obtido entre elas.

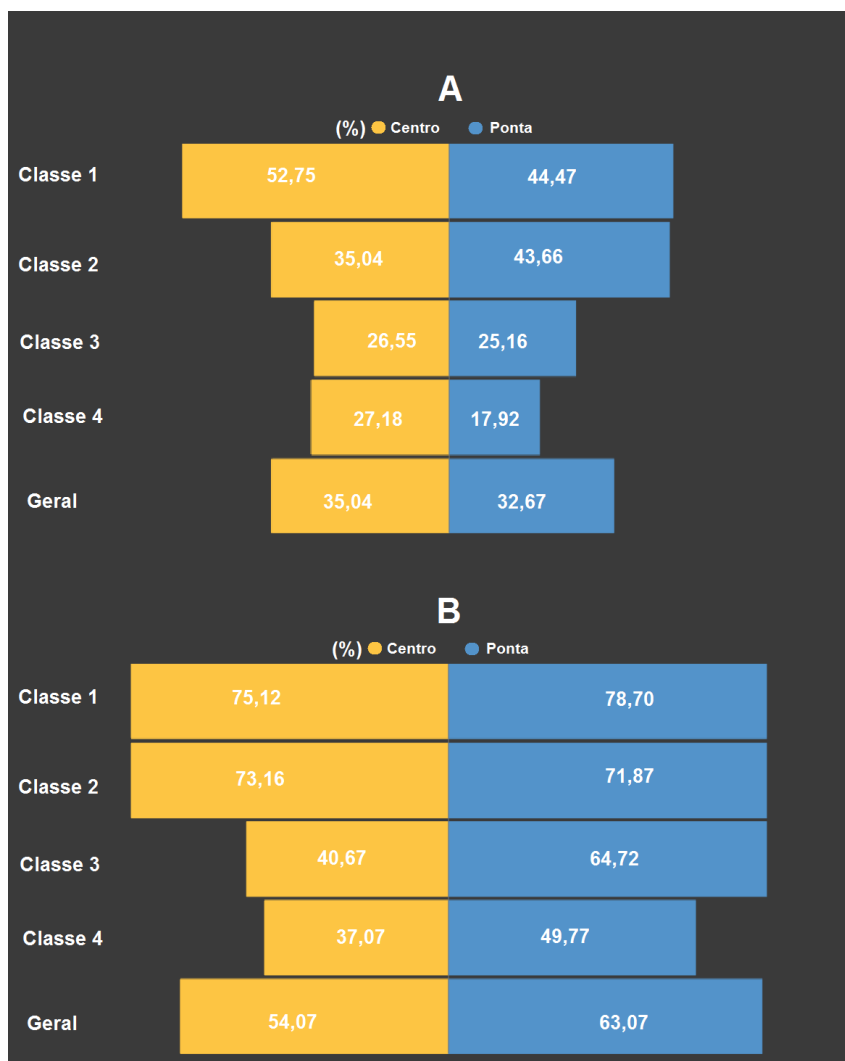


Figura 12 – Percentual de acerto do equipamento UMILOG-M65 em sua configuração original (A) e após aplicadas as equações (B) por classe de diâmetro e posição de coleta (Centro-amarelo / Ponta-Azul).

Observa-se que ocorre uma queda no percentual de acerto do equipamento, em ambas as configurações, independente da posição, à medida que o diâmetro da tora aumenta. Tal fato ocorre devido ao menor gradiente de umidade em toras de menor diâmetro quando comparadas a toras de maior diâmetro, sendo que quanto mais próximos da umidade de saturação das fibras, mais eficientes são as leituras realizadas por equipamentos elétricos (Donato et al., 2020). Dessa forma, independentemente da posição de coleta dos dados na tora, tal equipamento terá melhor desempenho em toras de menor classe de diâmetro.

Avaliando o equipamento, em sua configuração original, nota-se que a posição “Centro” teve melhor desempenho para as classes 1, 3, 4 e equação geral. Quando avaliado o equipamento após a aplicação das equações de correção, a posição

“Ponta” teve melhor desempenho para as classes 1, 3, 4 e equação geral, com destaque para a classe 3, com diferença de 24,05 pontos percentuais em relação a posição “Centro”.

O desempenho do equipamento, após aplicadas as equações, foi superior a 70% para ambas as posições e classes 1 e 2. O pior desempenho após aplicadas as equações ocorre para a classe 4 na posição centro (37,07%). Mais uma vez é possível observar a influência da classe de diâmetro no desempenho do equipamento tanto em sua configuração original, quando para as equações aplicadas.

## **6. Conclusões**

Foi possível gerar equações de calibração que permitam converter o valor de BIT's fornecido pelo equipamento em teor de umidade base úmida.

Houve maior precisão na determinação do teor de umidade com o medidor dielétrico em toretes de menor diâmetro, tanto para o equipamento em configuração original, quanto após aplicadas as equações de calibração.

Após aplicadas as equações de calibração foi possível determinar o teor de umidade, base úmida, da madeira para teores de umidade variando de 60,97% a 5,75%.

Em sua configuração original o equipamento se limita à determinadas faixas, não sendo possível acompanhar uma ampla faixa de teores de umidade, base úmida.

Mesmo após aplicadas as equações de calibração foi possível observar uma tendência de superestimação dos valores de teor de umidade abaixo de 20% UBU.

O equipamento apresentou melhor desempenho na posição ponta quando aplicadas as equações de calibração.

A precisão do equipamento não foi superior a 68%, mesmo após aplicadas as equações de correção.

## **7. Recomendações**

O equipamento não apresentou bom desempenho nos testes realizados para determinação do teor de umidade, base seca. Dessa forma, novos estudos deverão ser realizados para que seja possível avaliar a precisão do equipamento na determinação do teor de umidade, base seca.

O desempenho médio do equipamento ficou entre 60 e 70% após aplicadas as equações de correção. Tal precisão ainda é considerada baixa, sendo necessário estudos que avaliem outras possíveis causas do baixo desempenho do equipamento, como, profundidade de coleta, tempo de leitura, influência da relação cerne/alburno, etc.

Ao usar comercialmente, novas funções de calibração deverão ser testadas, avaliando as condições e o material utilizado pela empresa. As equações disponibilizadas neste documento foram geradas para materiais com características tecnológicas (anatômicas) semelhantes. Não foi avaliado a influência de tais características no desempenho do equipamento, podendo o mesmo, variar.

## 8. Referências

- ALTGEN, M.; WILLEMS, W.; HOSSEINPOURPIA, R.; & RAUTKARI, L. Hydroxyl accessibility and dimensional changes of Scots pine sapwood affected by alterations in the cell wall ultrastructure during heat-treatment. **Polymer Degradation and Stability**, v. 152, p. 244-252, 2018. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2018.05.005
- ARENDS, T.; BARAKAT, A. J.; & PEL, L. Moisture transport in pine wood during one-sided heating studied by NMR. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 99, p. 259-271, 2018. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2018.08.004
- ARRUDA, T. P. M. de; PIMENTA, A. S.; VITAL, B. R.; LUCIA, R. M. D.; ACOSTA, F. C. Avaliação de duas rotinas de carbonização em fornos retangulares. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 4, p. 949-955, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 7190**. Projeto de Estruturas de Madeira, 107p, Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14929**: madeira: determinação da umidade da madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- AUTENGRUBER, M.; LUKACEVIC, M.; & FÜSSL, J. Finite-element-based moisture transport model for wood including free water above the fiber saturation point. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 161, p. 120228, 2020. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120228
- BÄR, A.; HAMACHER, M.; GANTHALER, A.; LOSSO, A.; MAYR, S. Electrical resistivity tomography: patterns in *Betula pendula*, *Fagus sylvatica*, *Picea abies* and *Pinus sylvestris*. **Tree Physiology**, v. 39, n. 7, p. 1262-1271, 2019. DOI: 10.1093/treephys/tpz052.
- BARBOSA, R. A. G. S. **Efeito da deterioração da madeira estocada em campo para fins energéticos**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal), Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2020.
- BATISTA, R. W.; SANTOS, J. E. G. S.; SEVERO, E. T. D.; KLAR, A. E. Calibração de um equipamento TDR (Reflectometria por Domínio do Tempo) para a determinação da umidade da madeira de *Grevillea robusta* (Cunn.). **Revista Energia e Agricultura**, Botucatu, v. 26, n. 2, p. 129-145. 2011.
- BIEKER D.; KEHR R.; WEBER G.; RUST S. Non-destructive monitoring of early stages of white rot by *Trametes versicolor* in *Fraxinus excelsior*. **Annals of Forest Science** v. 67, p. 210, 2010.
- BONNET, M.; COURTIER-MURIAS, D.; FAURE, P.; RODTS, S.; & CARE, S. NMR determination of sorption isotherms in earlywood and latewood of *Douglas fir*. Identification of bound water components related to their local environment. **Holzforschung**, v. 71, n. 6, p. 481-490, 2017. DOI: 10.1515/hf-2016-0152

BORGES, L. M.; QUIRINO, W. F. Higroscopicidade da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* tratado termicamente. **Revista Biomassa & Energia**, v. 1, n. 2, p. 173-182, abr./jun. 2004.

BRAND, M. A.; CUNHA, A. B.; CARVALHO, A. F.; BREHMER, D. R.; KÜSTER, L. C. Análise da qualidade da madeira e do carvão vegetal produzido a partir da espécie *Miconia cinnamomifolia* (De Candolle) *Naudin* (Jacatirão-açu) na agricultura familiar, em Biguaçu, Santa Catarina. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 99, p. 401-410, 2013.

BRISCHKE, C.; RAPP, A. O.; BAYERBACH, R. Measurement system for long-term moisture recording with internal conductively glued electrodes. **Build. Environ.** v. 43, p. 1566–1574, 2008.

CARMO, A.P.T. **Avaliação de algumas propriedades da madeira de seis espécies de eucalipto**. 1996. 74f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa. 1996.

CASTRO, V. R.; CHAMBI-LEGOAS, R.; TOMMASIELLO FILHO, M.; SURDI, P. G.; ZANUNCIO, J. C.; ZANUNCIO, A. J. V. The effect of soil nutrients and moisture during ontogeny on apparent wood density of *Eucalyptus grandis*. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1-9, 2020. DOI:10.1038/s41598-020-59559-2

CHEN, C. L.; CHANG, J. S.; LEE, D. J. Dewatering and drying methods for microalgae. **Drying Technology**, v. 33, n. 4, p. 443-454, 2015. DOI: 10.1080/07373937.2014.997881

CHRISTOFORO, A. L.; ROCCO, F. A. L.; MORALES, E. A. M.; PANZERA, T. H.; BORGES, P. H. Numerical Evaluation of Longitudinal Modulus of Elasticity of *Eucalyptus grandis* Timber Beams. **International Journal of Agriculture and Forestry**, v. 2, n. 1, p. 166-170, 2012.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL (Minas Gerais). Deliberação nº231, de 29 de agosto de 2018. Estabelece procedimentos para redução das emissões atmosféricas dos fornos de produção de carvão vegetal de floresta plantada e para avaliação da qualidade do ar no seu entorno e dá outras providências. **Diário Executivo de Minas Gerais**: Disponível em < [http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=46681#\\_ftn1](http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=46681#_ftn1) > Acesso em 23 de setembro de 2021.

COTA, G. E. M.; HENRIQUES, R. J.; JÚNIOR, A. P. M. Processos de encouraçamento de leitos fluviais (bed armouring) na perspectiva geomorfológica: o caso do rio conceição–quadrilátero Ferrífero/MG. **Raega- O Espaço Geográfico em Análise**, v. 53, p. 95-115, 2021.

DA SILVA, S. P.; DA COSTA, A. S. V.; DOS SANTOS, S. L. B.; & DE LAIA, M. L. A Importância da Biomassa na Matriz Energética Brasileira. **Pensar Acadêmico**, v. 19, n. 2, p. 557-583, 2021.

DONATO, D. B.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. L. M.; PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. L.; BARBOSA, C. J. Determinação da umidade da madeira em tora por diferentes métodos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 34, n. 80, p. 449-453, 2014. DOI:10.4336/2014.pfb.34.80.608.

DONATO, D. B.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; VITAL, B. R.; TEIXEIRA, R. U. Teor de umidade da madeira em Tora. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 107, p. 703-712, 2015.

DONATO, D. B.; CARNEIRO, A. C. O.; CARVALHO, A. M. L. M.; VITAL, B. R.; MILAGRES, E. G.; CANAL, W. D. Influência do diâmetro da madeira de eucalipto na produtividade e propriedades do carvão vegetal. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 11, n. 2, p. 63-73, 2020.

EL HACHEM, C.; ABAHRI, K.; BENNACER, R. Original experimental and numerical approach for prediction of the microscopic hygro-mechanical behavior of spruce wood. **Construction and Building Materials**, v. 203, p. 258-266, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.107

EVANGELISTA, W. V. **Caracterização da madeira de clones de Eucalyptus camaldulensis Dehnh. e Eucalyptus urophylla S.T. Blake, oriunda de consórcio agrossilvipastoril**. 2007. 120p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Departamento de Engenharia Floresta, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

FAXITRON. **User Manual Faxitron DX radiography system**. Linconshire, 2009. 95 p.

FERREIRA, C. A.; URBINATI, C. V.; DE OLIVEIRA RIBEIRO, A.; DUARTE, P. J.; MORI, F. A.; ASSIS, M. R. Relações morfo-anatômicas dos elementos traqueais de genótipos de *Eucalyptus L' Héritier*. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 18, n. 3, p. 232-243, 2019.

FORSÉN, H.; TARVAINEN, V. **Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters**. Espoo, Finland: Technical Research Centre of Finland, 2000.

FU, Z.; ZHOU, Y.; GAO, X.; LIU, H.; ZHOU, F. Changes of water related properties in *Pine radiata* wood due to heat treatment. **Construction and Building Materials**, v. 227, p. 116692, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116692

GANTHALER, A.; SAILER, J.; BÄR, A.; LOSSO, A.; MAYR, S. Noninvasive analysis of tree stems by electrical resistivity tomography: unraveling the effects of temperature, water status, and electrode installation. **Frontiers in plant science**, v. 10, p. 1455, 2019.

GEZICI-KOÇ, Ö., ERICH, S. J., HUININK, H. P., VAN DER VEN, L. G., & ADAN, O. C. Bound and free water distribution in wood during water uptake and drying as measured by 1D magnetic resonance imaging. **Cellulose**, v. 24, n. 2, p. 535-553, 2017. DOI: 10.1007/s10570-016-1173-x

GLASS, S. V.; ZELINKA, S. L. **Moisture Relations and Physical Properties of Wood**. In: Wood Handbook. Forest Products Laboratory - USDA, 2010.

GOLTZ, E.P. **Aplicação do método dielétrico, princípio capacitivo para a medição da umidade de cavacos de madeira**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2018.

GUYOT A.; OSTERGAARD K. T.; LENKOPANE M.; FAN J.; LOCKINGTON D. A. Using electrical resistivity tomography to differentiate sapwood from heartwood: application to conifers. **Tree Physiology**. v.33, p.187–194, 2013.

HEARLE, J. W. S. The electrical resistance of textile materials: IV. Theory. **Journal of the Textile Institute Transactions**. v.44, n. 4, p.177–198, 1953.

IGLESIAS, H. A. & CHIRIFE, J. Prediction of the effect of temperature on water sorption isotherms of food material. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 11, n. 2, p. 109-116, 1976.

Indústria Brasileira de Árvores (IBÀ). **Relatório Anual 2021**. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>>. Acesso em 15 de maio de 2022.

JAMES, W. L. **Dielectric Properties of Wood and Hardboard: Variation with Temperature, Frequency, Moisture Content, and Grain Orientation**. Madison, WI: U.S: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1975.

JANKOWSKY, I. P. **Melhorando a eficiência dos secadores para madeira serrada**. ESALQ/USP. Circular técnica do IPEF, n.191, 2000.

JENSEN, P. D.; HARTMANN, H.; BOHM, T.; TEMMERMAN, M.; RABIER, F.; MORSING, M. Moisture content determination in solid biofuels by dielectric and NIR reflection methods. **Biomass and Bioenergy**, v.30, n. 11, p. 935–943, 2006.

KANDALA, C. V.; R. HOLSER, V. SETTALURI, S. MANI AND N. PUPPALA, Capacitance Sensing of Moisture Content in Fuel Wood Chips. **IEEE Sensors Journal**, v.16, n.11, p.4509-4514, 2016. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2541081.

KING, R. J. On-line industrial applications of microwave moisture sensors. **Sensors Update**, v. 7, n. 1, p. 109–170, 2000.

KLOCK, U.; ANDRADE, A. S. de; HERNANDEZ, J. A. **Manual didático polpa e papel**. 3.ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2013. 118 p.

KULASINSKI, K.; GUYER, R.; DEROME, D.; CARMELIET, J. Water adsorption in wood microfibril-hemicellulose system: Role of the crystalline–amorphous interface. **Biomacromolecules**, v. 16, n. 9, p. 2972-2978, 2015. DOI: 10.1021/acs.biomac.5b00878

LEITE, F. P.; GOMES, F. J. B.; SOUZA, E.; ROSADO, A. M.; AMARAL, L. S. Investigação do tempo de secagem no teor de umidade e nas características físicas e químicas da madeira para produção de celulose. In: **42o Congresso e Exposição Internacional de Celulose e Papel-ABTCP, São Paulo**. 2010.

LIMA, E. A.; ABDALA, E. M.; WENZEL, A. A. **Influência da umidade no poder calorífico superior da madeira**. Colombo, EMBRAPA-FLORESTAS, Comunicado Técnico 2020, 2008.

LONGUE JÚNIOR, D.; COLODETTE, J. L. Importância e versatilidade da madeira de eucalipto para a indústria de base florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.33, n.76, p.429-438, 2013. DOI: 10.4336/2013.pfb.33.76.528

MACHMUDAH, S.; WICAKSONO, D. T.; HAPPY, M.; WINARDI, S.; KANDA, H.; GOTO, M. Water removal from wood biomass by liquefied dimethyl ether for enhancing heating value. **Energy Reports**, v. 6, p. 824-831, 2020.

MARES, R.; BARNARD, H. R.; MAO, D. Examining diel patterns of soil and xylem moisture using electrical resistivity imaging. **Journal of Hydrology**. v. 536, p. 327–338, 2016.

MOREIRA, J. M. M. A. P.; DE LIMA, E. A.; GOULART, I. D. R. **Impacto do teor de umidade e da espécie florestal no custo da energia útil obtida a partir da queima da lenha**. EMBRAPA FLORESTAS -Comunicado Técnico (INFOTECA-E), 2012.

MORESCHI, J. C. Propriedades da madeira. **Curitiba: Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, Universidade Federal do Paraná**, 2014. 194 p.

MORESCHI, J. C. Propriedades tecnológicas da madeira: manual didático. **Curitiba: Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, Universidade Federal do Paraná**, 2005. 168 p.

NORIMOTO, M.; YAMADA, T. The dielectric properties of wood on the dielectric properties of the chemical constituents of wood and the dielectric anisotropy of wood. **Wood Research**, v.51, n.12, p.31-43, 1971.

OHOFUGI, N. G.; GÓIS, M. S.; COSTA, K. R. C. B. C.; CAVALCANTE, A. L. B. Low Cost Soil Column Instrumentation for Time-Lapse Monitoring of Rising Damp. **Brazilian Applied Science Review**, Curitiba, v., n.1, p. 226-240, 2021.

OLIVEIRA, J. T. D. S., HELLMEISTER, J. C., & TOMAZELLO FILHO, M. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 29, n. 1, p. 115-127, 2005.

PALMA, P.; STEIGER, R. Structural health monitoring of timber structures—Review of available methods and case studies. **Construction and Building Materials**, v. 248, p. 118528, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118528

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 4.Ed. New York: Mc Graw - Hill, 1980. 722p.

PEREIRA, E. G.; MARTINS M. A.; PECENKA, R.; CARNEIRO, A. C. O.; Pyrolysis gases burners: Sustainability for integrated production of charcoal, heat and electricity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 592- 600, 2017.

PONS, C.; & KNOP, A. CONSTRUÇÕES UTILIZANDO ESTRUTURAS DE MADEIRA. **Cippus**, v. 8, n. 1, p. 79-96, 2020.

RAHIMAN, M. H. F.; THOMAS, T. W. K.; SOH, P. J.; RAHIM, R. A.; JAMALUDIN, J.; RAMLI, M. F.; ZAKARIA, Z. Microwave tomography sensing for potential agar wood trees imaging. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 164, p. 104901, 2019. DOI: 10.1016/j.compag.2019.104901

RODRIGUES, T.; JUNIOR, A. B. Technological prospecting in the production of charcoal: A patent study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 111, p. 170-183, 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2019.04.080

ROSS, R. J. Wood handbook: wood as an engineering material. **USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL-GTR-190**, 2010: 509 p. v. 1, 2010.

SANTOS, L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; TRUGILHO, P. F. Propriedades da madeira e estimativas de massa, carbono e energia de clones de *Eucalyptus* plantados em diferentes locais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 5, p. 971-980, 2012. DOI:10.1590/S0100-67622012000500019

SAPORITI, J.; DIAS, A.; CRUZ, H.; PEREIRA CUSTÓDIO, J. E.; COUTINHO PALMA, P. M. Avaliação, Conservação e Reforço de Estruturas de Madeira. 1ªed. Lisboa: **Verlag Dashöfer**, 2009.

SILVA, F. T. M.; ATAÍDE, C. H. Valorization of *Eucalyptus urograndis* wood via carbonization: Product yields and characterization. **Energy**, v. 172, p. 509-516, 2019. DOI: 10.1016/j.energy.2019.01.159

SILVA, J. D. C., & OLIVEIRA, J. T. D. S. Avaliação das propriedades higroscópicas da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm., em diferentes condições de umidade relativa do ar. **Revista Árvore**, v. 27, n. 2, p. 233-239, 2003.

SOUZA, A. P. S.; MOTA, L. L.; CASAVECCHIA, B. H.; STANGERLIN, D. M.; MELO, R. R. Variação anual da umidade de equilíbrio e da cor de madeiras amazônicas submetidas a ensaios de campo. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**. v. 10, n. 3, p. 223-235. 2019.

STENSTRÖM, Stig. Drying of paper: A review 2000–2018. **Drying Technology**, v. 38, p. 825-845, 2019. DOI: 10.1080/07373937.2019.1596949

TEIXEIRA, R. U. **Efeito da produtividade florestal e permeabilidade da madeira de *Eucalyptus* spp. na velocidade de secagem**. 2015. 56 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2015.

TORGOVNIKOV, G. I. Dielectric properties of wood and wood-based materials. In: **Springer, Berlin, Heidelberg**. 1993. P. 135-159. DOI: 10.1007/978-3-642-77453-9

VIDAL, J. M.; EVANGELISTA, W. V.; SILVA, J. C.; JANKOWSKY, I. P. Preservação de madeiras no Brasil: histórico, cenário atual e tendências. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 257-271, 2015.

VIDAURRE, G. B.; SILVA, J. G. M.; MOULIN, J. C.; CARNEIRO, A. C. O. **Qualidade da madeira de eucalipto proveniente de plantações no Brasil**. Vitória, ES: **EDUFES**, p. 103- 131, 2020.

ZANGIÁCOMO, A. L.; CHRISTOFORO, A. L.; ROCCO LAHR, F. A. Módulo de elasticidade aparente em vigas roliças estruturais de madeira *Pinus elliottii*. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 7-13, 2014.

ZEN, L. R.; MONTEIROA, T. C.; SCHAEFFERA, W.; KAMINSKIA, J. M.; KLITZKE, R. J. Secagem ao ar livre da madeira serrada de eucalipto. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 7, n. 2, p. 291-298, 2019. DOI: 10.20873/jbb.uft.cemaf.v7n2.zen

ZHOU, M.; CARÉ, S.; KING, A.; COURTIER-MURIAS, D.; RODTS, S.; GERBER, G.; COUSSOT, P. Wetting enhanced by water adsorption in hygroscopic plantlike materials. **Physical Review Research**, v. 1, n. 3, p. 033190, 2019. DOI: 10.1103/PhysRevResearch.1.033190

ŽLAHTIČ-ZUPANC, M.; LESAR, B.; HUMAR, M. Changes in moisture performance of wood after weathering. **Construction and Building Materials**, v. 193, p. 529-538, 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.196