

EDSON MARCELO BRUDER

**RELAÇÃO ENTRE A DENSIDADE E RAZÃO ISOTÓPICA DO CARBONO DA
MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* SUBMETIDA AO DÉFICIT HÍDRICO**

Botucatu

2020

EDSON MARCELO BRUDER

**RELAÇÃO ENTRE A DENSIDADE E RAZÃO ISOTÓPICA DO CARBONO DA
MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* SUBMETIDA AO DÉFICIT HÍDRICO**

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp
Câmpus de Botucatu, para obtenção do
título de Doutor em Agronomia (Energia
na Agricultura).

Orientador: Prof. Dr. Vladimir Eliodoro Costa

Botucatu

2020

B888r	Bruder, Edson Marcelo Relação entre a densidade e razão isotópica do carbono da madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> submetida ao déficit hídrico / Edson Marcelo Bruder. -- Botucatu, 2020 130 p. : il., tabs., fotos Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu Orientador: Vladimir Eliodoro Costa 1. Silvicultura. 2. Reflorestamento. 3. Eucalyptus. 4. Densidade. 5. Razão Isotópica. I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: RELAÇÃO ENTRE A DENSIDADE E RAZÃO ISOTÓPICA DO CARBONO DA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* SUBMETIDA AO DÉFICIT HÍDRICO

AUTOR: EDSON MARCELO BRUDER

ORIENTADOR: VLADIMIR ELIODORO COSTA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. VLADIMIR ELIODORO COSTA
Física e Biofísica / Instituto de Biociências de Botucatu - UNESP

Prof. Dr. SAULO PHILIPPE SEBASTIÃO GUERRA
Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu - UNESP

Prof. Dr. JOEL MESA HORMAZA
Física e Biofísica / Instituto de Biociências de Botucatu - UNESP

Prof. Dr. LUIZ ANTONIO MARTINELLI
Laboratório de Ecologia Isotópica / CENA - USP

Prof. Dr. RICARDO MARQUES BARREIROS
Coordenação Executiva / UNESP - Campus de Itapava - videoconferência

Botucatu, 28 de julho de 2020

A Dedicatória

A MINHA QUERIDA ESPOSA ADRIANA,

*TENHO ENORME ORGULHO DE DEDICAR ESTA CONQUISTA PELO RESPEITO,
O CARINHO E A CONFIANÇA
DEPOSITA EM MIM..
MEU, MUITO OBRIGADO...*

AO MEU QUERIDO FILHO MATHEUS,

*PELO FATO QUE NO DECORRER DESTA CONQUISTA, NOS APROXIMAMOS E ESTREITAMOS O
RELACIONAMENTO ENTRE PAI E FILHO.*

MOTIVAÇÃO

*A MINHA ESPOSA POR ACREDITAR,
A MINHA ESPOSA POR SONHAR,
A MINHA ESPOSA POR CHORAR,
A MINHA ESPOSA POR MOTIVAR.
SEM QUERER SONHEI,
SEM PESTANEJAR LUTEI,
MOTIVADO POR TI, CONSEGUI.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador *PROF. DR. VLADIMIR ELIODORO* Costa, que simplesmente foi além do profissionalismo tornando-se um amigo nos momentos em que mais precisei, tanto na formação profissional como para a minha vida pessoal. Um profissional que me auxiliou nos ensaios experimentais no Laboratório de Física Aplicada do Departamento de Física e Biofísica como no Centro de Isótopos Estáveis do Instituto de Biociências da Universidade Estadual Paulista no campus de Botucatu-SP.

Ao Curso de Pós-Graduação em Energia na Agricultura da Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP – Campus de Botucatu, pela oportunidade de realizar o curso.

Ao Departamento de Física e Biofísica do Instituto de Biociências de Botucatu, por uma ajuda muito importante na prontidão e disposição para esclarecimento de dúvidas quanto ao trabalho e pós-graduação.

A minha família, *CELSO, MARIA DE LOURDES, MÁRCIA E, MURILO* e ao meu *FILHO MATHEUS*, pelo apoio, carinho.

Um muito obrigado com muito carinho para minha esposa *ADRIANA P. BRUDER*, pelo carinho, apoio, incentivo, mas meu agradecimento ainda maior por ter confiado, impulsionado e acreditado em mim.

Enfim a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização e sucesso desse trabalho.

RESUMO

As florestas do gênero *Eucalyptus* apresentam uma grande importância econômica. A matéria-prima gerada apresenta uma plasticidade adaptativa aos diversos tipos de clima e região, além de sua diversidade de aplicação. O estudo avaliou e correlacionou a densidade (ρ) e a razão isotópica de Carbono ($\delta^{13}\text{C}$) na madeira de árvores submetidas ao déficit hídrico em reflorestamento comercial, de origem seminal e clonal de *Eucalyptus grandis*. A ρ é um dos indicadores de qualidade e controle das florestas plantadas, e os valores isotópicos $\delta^{13}\text{C}$ indicam respostas fisiológicas à restrição hídrica. O déficit hídrico foi realizado com exclusão artificial de um terço da água de precipitação no solo. A ρ foi determinada pela atenuação da radiação gama do ^{241}Am e os valores de $\delta^{13}\text{C}$ a partir de um sistema de fluxo contínuo de espectrometria de massa de razão isotópica. Os valores pontuais da ρ e $\delta^{13}\text{C}$ na direção radial dos discos foram utilizados para o cálculo da média ponderada nos discos, nas árvores e nos tratamentos. Foram realizadas correlações entre os valores de ρ e $\delta^{13}\text{C}$ na direção radial dos discos, longitudinal das árvores e nos valores médios dos tratamentos. As procedências submetidas ao tratamento com e sem déficit hídrico não apresentaram diferenças significativas. A ρ estimada na posição de 12,5% da altura total, pode auxiliar na estimativa da ρ , alcançando resultados muito próximos aos valores médios da árvore. Os tratamentos submetidos ao déficit hídrico apresentaram diminuição no volume final. Os resultados mostraram que a ponderação da ρ média da árvore poderá ser estimada com uma diminuição da amostragem na direção longitudinal mantendo a mesma precisão. A ρ média entre as procedências seminal e clone, não apresentaram diferenças significativas. A ρ e $\delta^{13}\text{C}$ na direção radial dos discos apresentaram correlação, enquanto os valores médios apresentaram uma relação direta. As análises da ρ e $\delta^{13}\text{C}$ possibilitaram identificar a variabilidade nos tratamentos e evidenciaram a possibilidade de uma metodologia para a investigação da qualidade da madeira.

Palavra-chave: Reflorestamento. Restrição de água. Precipitação.

ABSTRACT

Eucalyptus forests are of great economic importance. The raw material generated has an adaptive plasticity to different types of climate and region, in addition to its diversity of application. The quality of eucalyptus forests is directly correlated to genetic factors, climatic conditions and soil quality, which directly influence wood productivity and quality. The study evaluated and correlated the density (ρ) and the carbon isotope ratio ($\delta^{13}\text{C}$) in the wood of trees submitted to hydric deficit in commercial reforestation, of seminal origin and clonal of the species *Eucalyptus grandis*. The ρ is used as an indicator of quality and control of planted forests, and the $\delta^{13}\text{C}$ isotopic values, indicate physiological responses to hydric deficit. The hydric deficit was achieved with the artificial exclusion of one third of the precipitation water in the soil. The ρ was determined by gamma-ray attenuation of ^{241}Am and the values of $\delta^{13}\text{C}$ from a continuous-flow system of isotopic ratio mass spectrometry. The point values of ρ and $\delta^{13}\text{C}$ in the radial direction of the discs were used to calculate the weighted average of the discs, trees and treatments. Correlations were made between the values of ρ and $\delta^{13}\text{C}$ in the radial direction of the discs, longitudinal of the trees and in the mean values of the treatments. The species submitted to treatment with and without hydric deficit did not show significant differences. The ρ estimated at the position of 12.5% total height, can assist in the ρ estimate, achieving results very close to the tree. The treatments submitted to hydric deficit showed a decrease in the final volume. To investigate the average density of the tree it can be determined with a decrease of the sampling in the longitudinal direction. The mean ρ between seminal and clone, did not show significant differences. The ρ and $\delta^{13}\text{C}$ in the radial direction of the disks showed a relationship, while the mean values showed a direct relationship. The analysis of ρ and $\delta^{13}\text{C}$ made it possible to identify the variability in treatments and showed a methodology for the investigation of wood quality.

Keywords: Reforestation. Water restriction. Precipitation.

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	Razão isotópica dos isótopos estáveis do elemento Carbono
$\delta^{13}\text{C}$	Diferença relativa da $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$
$\delta^{13}\text{C}_{\text{pond}}$	Valor médio ponderado
$\delta^{13}\text{C}_{50\%}$	Valor utilizando 50% do raio dos discos próxima a casca.
S e C	Clone e Seminal
Ci_A / Si_A	Letra "A" significa o disco da região a 12,5% da altura total, quando substituída pelas letras subsequentes (b, c, d e e) fazem referência aos demais disco coletados.
Ci/Si	Letra <i>i</i> significa que foram realizadas com todas as amostras no sentido radial e direção longitudinal
ρ	Densidade da madeira
ρ_{12}	Densidade à 12% de umidade ou densidade em equilíbrio
ρ_{ARV}	Densidade da árvore
ρ_a	Densidade aparente
ρ_b	Densidade básica
$\rho_{a50\%}$	Densidade aparente obtida com os 50% (metade dos disco) próximo a casca
ρ_m	Densidade média aritmética dos discos
ρ_{md}	Densidade (mediana) dos discos
AIE	Análise de Isótopos Estáveis
TARG	Técnica de atenuação da radiação gama ^{214}Am
μ_m	Coefficiente de atenuação de massa na madeira para radiação gama de 59,6 keV de energia
x	Espessura da amostra
I_o	Fótons não atenuados
I	Fótons atenuados
keV	Quilo elétrons-volts
mCi	Mili curie
NaI(Tl)	Iodeto de Sódio dopado com Tálcio.
cpm	Contagem por minuto
ρ_i	Densidade pontual
ln	Logaritmo natural
^{241}Am	Radioisótopo do Amerício com número de massa 241
at	Altura total

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	17
REVISÃO DE LITERATURA	20
CAPÍTULO 1 - VARIAÇÃO DA DENSIDADE DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus grandis</i> SUBMETIDAS AO DÉFICIT HÍDRICO	
1.1 INTRODUÇÃO	34
1.2 MATERIAL E MÉTODO	35
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
1.4 CONCLUSÃO	51
REFERÊNCIAS	52
CAPÍTULO 2 - VARIAÇÃO ISOTÓPICA EM FUNÇÃO DA DENSIDADE DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus grandis</i> SUBMETIDA AO DÉFICIT HÍDRICO	
2.1 INTRODUÇÃO	59
2.2 MATERIAL E MÉTODO	60
2.3 RESULTADO	67
2.4 DISCUSSÃO	77
2.5 CONCLUSÃO	83
REFERÊNCIAS	85
CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
REFERÊNCIAS	93
APÊNDICE A - Variabilidade da densitometria radial das procedências clonais (C) e seminais (S), submetidas ao déficit hídrico, pelo Método de Atenuação da Radiação Gama – (TARG) do gênero <i>Eucalyptus</i>	102
APÊNDICE B - Resultados obtidos pelos métodos de determinação de densidade (kg.m^{-3}) a 12% de umidade, dos discos direção longitudinal das procedências do gênero <i>Eucalyptus</i>	125
APÊNDICE C - Densidade aparente (ρ_a) apresentada com média aritmética das amostras de 12,5 a 62,5% da altura comercial, obtidas pela variação pontual das procedências clonais (C) e seminais (S), determinada pelo Método de Atenuação da Radiação Gama (TARG) do gênero <i>Eucalyptus</i>	127
APÊNDICE D - Resultados da densidade aparente (ρ_a) e média aritmética dos discos obtida pelos Métodos de Imersão e o paquímetro das procedências clonais (C) e seminais (S) do gênero <i>Eucalyptus</i>	128
APÊNDICE E - Resultado da Área basal e Área média dos discos do gênero <i>Eucalyptus</i>	129
APÊNDICE F - Resultado da variação isotópica ($\delta^{13}\text{C}$) em por mil (‰) em duplicata das procedências clonal (C) e seminal (S) submetidas ao déficit hídrico do gênero <i>Eucalyptus</i>	130

INTRODUÇÃO GERAL

O gênero *Eucalyptus* apresenta um grande potencial para o processamento mecânico (LIMA; GARCIA, 2010), por ser de rápido crescimento (GONÇALVES et al., 2010), possuir boa adaptação às condições ambientais brasileiras (SANTANA et al., 2008), além da possibilidade de produção a baixo custo (LIMA; GARCIA, 2010). O gênero é caracterizado pela sua capacidade de adaptação a diferentes condições ambientais, às práticas silviculturais, ao manejo e, principalmente, ao melhoramento genético das espécies (VALE et al., 2002).

A matéria-prima do gênero *Eucalyptus* apresenta versatilidade no uso (ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA – AMS, 2009), e devido a este fato, houve um aumento progressivo na utilização das florestas plantadas (VIDAL et al., 2015), especialmente dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus* (VALE et al., 2002). O consumo de madeira serrada do gênero *Pinus* teve uma diminuição considerável após o interesse de empresas florestais por espécies alternativas, que apresentavam rápido crescimento como o gênero *Eucalyptus* (DEL MENEZZI et al., 1998), que se destacou em 2018, com a área ocupada por plantios aproximadamente 5,6 milhões de hectares (IBÁ, 2019) enfatizando o interesse empresarial.

Atualmente há grande importância em florestas de ciclo curto (BALLARIN; PALMA, 2003; IBÁ, 2019), devido à alta demanda de madeira (VIDAL et al., 2015; IBÁ, 2019) e as novas procedências como os híbridos do gênero *Eucalyptus* que estão adquirindo importância no Brasil, por fornecerem madeira de alta qualidade, árvores com rápido crescimento, resistentes às pragas e às doenças (CARVALHO, 2000; GONÇALEZ et al., 2014). Porém ainda a demanda é alta por material que atenda ao mercado madeireiro, vistos os estudos direcionados a indústria de Celulose e Papel, para a melhora do rendimento da polpa de celulose (GONÇALVES et al., 2010; FERNANDES et al., 2011; GOUVÊA et al., 2011). Assim, é importante o conhecimento detalhado dos materiais disponíveis e as relações entre as características tecnológicas e dendrométricas (GONÇALVES et al., 2010).

Com a alta demanda e as poucas opções de madeira no mercado, a matéria-prima oriunda de novos gêneros ou de espécies necessita de avaliações para seu uso e a propriedade densidade apresenta-se como um padrão de quantificação e de qualidade (BELINI, 2008; GUERRA; EUFRATE JUNIOR, 2019), é utilizada como parâmetro de controle (MALONEY, 1989; BELINI, 2008), basicamente para todos os

produtos, como exemplo a produção de celulose (DIAS et al., 2017), a madeira serrada (OLIVEIRA et al., 2005), a produção carvão (PEREIRA et al., 2016). A densidade é um parâmetro importante para as organizações do setor florestal, pois, apresenta correlação entre as outras propriedades da madeira como rendimento da polpa de celulose (MOKFIENSKI et al., 2008), a retratibilidade e as propriedades de resistência mecânica (GONÇALVES et al., 2010) que, por sua vez, variam em função da idade das árvores e da taxa de crescimento (SETTE JR et al., 2012).

Qualificar a madeira é relativamente difícil, pois, é um material complexo, heterogêneo e com grande diversidade estrutural, devido a sua composição anatômica e química. Tal complexidade da madeira se devem não apenas a esta estrutura, mas também ao fator ambiental inserido, portanto, é importante compreender as propriedades da madeira e os seus efeitos no produto final (GONÇALEZ, 2014).

A análise dos isótopos estáveis (AIE) é uma importante ferramenta para a compreensão de cadeias alimentares e fluxos de nutrientes nos sistemas de produção animal (LIMA, 2018), e também é utilizada como uma ferramenta para análise qualitativa e quantitativa na área alimentar (MAPA, 2007; BAHAR et al., 2008). A maioria das novas descobertas, com foco nos isótopos estáveis de carbono, melhorou nossa compreensão sobre a discriminação de isótopos de carbono durante a fotossíntese (FARQUHAR et al, 1982; GILLON, GRIFFITHS, 1997; SEIBT et al., 2008; DUCATTI et al., 2011), como também, o progresso da compreensão na composição dos isótopos de oxigênio e sua conversão em biomassa (CUNTZ et al., 2003; FARQUHAR E CERNUSAK, 2005; BARBOUR, 2007; BARNARD et al., 2007a; GESSLER, 2007; GESSLER, 2014).

A AIE apresenta-se como uma ferramenta nas diversas áreas do conhecimento e está difundida mundialmente (DUCATTI, 2007) e a ocorrência dos isótopos é de forma natural. As análises dos bioelementos – *Carbono (C)*, *Hidrogênio (H)*, *Oxigênio (O)* e *Nitrogênio (N)* têm sido aplicadas de forma crescente em pesquisas agropecuárias (LIMA, 2018) e com aplicações comerciais a mais de uma década. Portanto, o uso da razão isotópica do carbono ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$), denotado de $\delta^{13}\text{C}$, pode representar um indicador de qualidade como atualmente a densidade representa, pois, a madeira possui grande quantidade de carbono. Quanto à madeira do gênero *Eucalyptus*, há análises sobre as propriedades físicas, químicas e energéticas em espécies com a procedência clonal, híbrida e seminal, no entanto, as análises

apresentam a função de qualificar a madeira para um determinado fim e perante a necessidade de avaliação, a busca é constante por metodologias eficazes, rápidas para a qualificação, porém, há escassez de estudos que envolvam a densidade e o $\delta^{13}\text{C}$, com a função de utilizar análise isotópica também como uma ferramenta para a qualificação.

Há uma preocupação sobre a dinâmica das mudanças climáticas envolvendo o gênero *Eucalyptus* e suas variações com a influência da disponibilidade hídrica e de nutrientes para seu desenvolvimento. O gênero *Eucalyptus* atualmente é a mais importante fonte de matéria-prima para vários setores, no entanto, é necessário avaliar os efeitos da disponibilidade hídrica quanto ao rendimento e qualidade da madeira, e ainda avaliar espécies do gênero *Eucalyptus* tolerantes a seca (HAKAMADA et al., 2020) e outras variáveis climáticas como precipitação, temperatura e umidade do ar, pois, são as variáveis que possuem maior influência no desenvolvimento do gênero (SETTE JR et al., 2016). Perante este cenário, análises isotópicas da $\delta^{13}\text{C}$ podem ampliar o conhecimento sobre o comportamento das espécies em ambientes mais severos, como a disponibilidade hídrica e variações de temperatura.

O trabalho teve como objetivo abordar às árvores da espécie *Eucalyptus grandis* submetidas a dois regimes hídricos e seus efeitos sobre a densidade, a área basal e a influência sobre a razão isotópica do carbono. O estudo foi elaborado com dois capítulos, sendo que o primeiro relata a influência do déficit hídrico sobre a densidade da madeira e o segundo relata a variação isotópica em função da densidade. Ambas abordagens foram realizadas com o intuito de obter um índice ou método ágil, prático para qualificar da madeira.

REVISÃO DE LITERATURA

Eucalyptus

Atualmente a visão da sustentabilidade apresenta prioridade nos planos estratégicos das empresas que utilizam árvores plantadas como matéria prima. O conceito está apoiado em três áreas a econômica, a ambiental e a social. O setor empresarial trabalha com a diversificação do uso econômico da floresta que envolve os pequenos produtores, por meio de programas de parcerias florestais, criando oportunidades de geração de emprego, renda e ampliando o conhecimento pela troca de experiências (IBÀ, 2019).

As empresas, ao utilizar florestas plantadas, se aproximam da autossuficiência energética e buscam um ciclo de produção limpa (OLIVEIRA et al., 2012), principalmente devido ao aumento do consumo para fins energéticos (SANTOS et al., 2012). Estas empresas são agentes de desenvolvimento econômico e social, pois investem em diversas áreas como a saúde, a educação, a cultura e a qualidade de vida que beneficiam cerca de dois milhões de pessoas (IBÀ, 2019).

Considerando a importância que conquistou o gênero *Eucalyptus* como matéria-prima é importante descrever de forma sucinta o surgimento do gênero utilizado para os mais diversos fins, devido a sua plasticidade e alta adaptação aos diversos tipos de clima e região. Historiadores mencionaram que, por volta de 1774, o gênero foi introduzido na Europa e, em 1788 foi descrito pela primeira vez pelo botânico francês *L'Héritier de Brutelle*, no *Sertum Anglicum*.

No entanto, até a metade do século XIX, o gênero não apresentou características de importância comercial. Na Índia, os primeiros plantios ocorreram em 1843 e, por volta de 1856, já havia povoamentos desenvolvidos. Na África do Sul mais especificamente na colônia do Cabo os primeiros ensaios ocorrem em 1828. Na Europa, em 1854, os primeiros ensaios visavam à produção comercial, principalmente com o *E. globulus*, plantados em Portugal. Em 1863 foi introduzido na Espanha e, em 1869, foi introduzido na Itália (REMADE, 2002). Quanto a introdução do gênero na América do Sul o rumor é que o Chile talvez tenha sido o primeiro país a introduzir em 1823 e na Argentina talvez em 1865, através do Presidente Garcia Moreno. No Uruguai, as primeiras sementes de *Eucalyptus* foram recebidas em 1853 (REMADE, 2002).

No Brasil, em 1904, o gênero *Eucalyptus* foi introduzido no Horto de Jundiaí/SP, conduzido por Edmundo Navarro de Andrade (SOARES et al., 2010), no entanto, há informações da existência de duas procedências do gênero *Eucalyptus* no Jardim Botânico do Rio de Janeiro, em 1825, e de alguns exemplares no Rio Grande do Sul, em 1865 (ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA – AMS, 2009).

O gênero *Eucalyptus* pertence à família *Myrtaceae* com cerca de 600 espécies e grande número de variedades, híbridos adaptados a diversos climas e tipos de solo (ALZATE, 2004). Com exceção do *E. urophylla* e *E. deglupta* que ocorrem em ilhas na Oceania, os demais são originários da Austrália. O gênero apresenta grande versatilidade e devido a esta característica sua área de plantio no mundo tem aumentado rapidamente nas últimas décadas (IGLESIAS-TRABADO; WILSTERMANN, 2009).

Alguns exemplos desta versatilidade são os produtos oriundos do gênero como óleos essenciais, os produtos apícolas, a celulose e o papel, a madeira serrada (OLIVEIRA et al., 2005; BELINI, 2008; GUERRA; EUFRATE JUNIOR, 2019), os postes e os moirões, os laminados de Medium Density Fiberboard ou Painel de Fibra de Média Densidade (MDF) (BELINI, 2008), os de High Density Fiberboard ou Painel de Fibras de Alta Densidade (HDF), a chapa de fibra, o compensado, o carvão e a lenha (ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA – AMS, 2009; PEREIRA, 2016; MAGALHÃES et al., 2017).

O gênero ganhou destaque, devido ao seu potencial para processamento mecânico da madeira; o rápido crescimento; a adaptações às condições ambientais encontradas em grande parte do Brasil; apresentar propriedades físicas e mecânicas adequadas ao produto final; apresentar fácil trabalhabilidade; e poder ser produzida a baixo custo. Há ainda uma característica valorizada, o gênero possui uma variedade de cores que contribui para destacar e valorizar o seu potencial de substituição de espécies tradicionalmente utilizadas em determinados usos (LIMA; GARCIA, 2010; HSING et al., 2016). O gênero é muito valorizado e no Brasil a madeira ganhou importância comercial, podendo ser estimada pela área ocupada pelas florestas plantadas de 7,8 milhões de hectares (IBÁ, 2019).

Qualidade da madeira

A implantação de florestas está diretamente correlacionada a vários fatores, como disponibilidade de terras aptas na região de plantio, condições climáticas, distância até o local de consumo, características do solo e a disponibilidade de material genético adaptado e adequado (FERNANDES et al., 2011). Tais fatores influenciam diretamente as plantações florestais e também a qualidade da madeira (CASTRO et al., 2017). Muitos trabalhos enfatizam a importância em correlacionar a densidade com a taxa de crescimento da madeira (MIGLIORINI, 1986; MALAN, 1991; WANG, 1984 *apud* DOWNES, 1997) e outras propriedades (BALLARIN; PALMA, 2003; GOMIDE et al., 2005; SANTOS, 2005; GONÇALVES et al., 2006; MOKFIENSKI et al., 2008; FERNANDES, 2011) com o intuito de caracterizar a madeira para um determinado fim.

A madeira apresenta uma diversidade estrutural e compreender suas propriedades e variações é importante para o controle de seus efeitos para obtenção de matéria-prima de qualidade (PALERMO et al., 2013). Esforços e investimentos no setor florestal em qualidade têm se apresentado como alternativa para obtenção de árvores com madeiras uniformes ou homogêneas (BATISTA; KLITZKE; SANTOS, 2010), melhorando a sua utilidade e evitando ineficiências (PALERMO et al., 2013; GONÇALEZ et al., 2014).

Com a necessidade de matéria-prima de qualidade o planejamento da dinâmica de uma floresta plantada faz toda a diferença, pois, aos tipos diferenciados de manejo (LIMA; GARCIA, 2010), podem promover alterações na qualidade da madeira, consequentemente no produto final desejado e em seu valor (SOARES et al., 2010). A busca por material de qualidade superior que atenda ao exigente mercado madeireiro vem crescendo a cada ano (GONÇALVES et al., 2010), vistos os estudos realizados direcionados particularmente à indústria de Celulose e Papel (SOARES et al., 2010) para a melhora no rendimento da polpa de celulose (FERNANDES, 2011; GOUVÊA, 2011).

Assim, o conhecimento da variabilidade entre os materiais disponíveis e as relações entre as características tecnológicas e dendrométricas são importantes, pois as características e o comportamento são refletidos nos diferentes segmentos florestais a partir da silvicultura e do melhoramento florestal, finalizando no setor tecnológico de base florestal (GONÇALVES, 2010).

A indústria de base florestal investiu na produção e na qualidade da madeira do gênero *Eucalyptus* e nas últimas décadas apresentou ganhos e proporcionou impacto na produção industrial (IBÁ, 2019), visto a quantidade de estudos envolvendo as várias propriedades da madeira. A busca é constante por metodologias buscando a melhor aplicação para a estimativa a qualidade da madeira (GOUVÊA et al., 2010) e os métodos utilizados na quantificação (VIDAURRE et al., 2011) e na qualificação (PALERMO et al., 2013; CASTRO et al., 2017) apresentaram avanços nos últimos anos de forma imprescindível para a avaliação de forma geral.

A indústria florestal brasileira a silvicultura é a base predominante do setor florestal; as florestas plantadas são responsáveis por 100% do suprimento de madeira para a indústria nacional de celulose e de painéis reconstituídos (FISCHER; ZYLBERSZTAJN, 2012), portanto, à alta demanda e a importância da madeira de *Eucalyptus* para a mercado brasileiro, e tendo em vista as extensas áreas cultivadas no território nacional, os novos materiais genéticos em potencial, provenientes de experimentos ou plantações comerciais, necessitam de avaliações para a obtenção de expertises e aprofundamentos do conhecimento quando correlacionados com os parâmetros de qualidade (GONÇALVES, 2010).

A indústria madeireira no Brasil utiliza em grande escala toras de madeira de reflorestamento dos principais gêneros cultivados, o *Pinus* e o *Eucalyptus*, como matéria-prima para diversas finalidades (FISCHER; ZYLBERSZTAJN, 2012). As florestas plantadas foram as responsáveis por impulsionar a substituição da madeira nativa, explorada de forma indiscriminada, no entanto, atualmente outras procedências de madeiras em menor escala, como *Tectona grandis* Linn. popularmente conhecida como “teca” vem obtendo destaque pela produtividade e pela qualidade, devido ao aumento da demanda de matéria-prima (MACEDO et al., 2005; IBÁ, 2019).

Perante as limitadas opções de madeira no mercado e a matéria-prima alternativa necessita de avaliações. E no setor florestal a densidade é frequentemente utilizada como parâmetro de controle e de qualidade para a caracterização, pois fornece informações sobre outras características da madeira (SETTE JR et al., 2016). A propriedade densidade está diretamente correlacionada à conversão em metro cúbico de madeira (MALONEY, 1989; BELINI, 2008, GOMIDE et al., 2010) e basicamente correlacionada a maior parte dos produtos de origem florestal. A densidade é utilizada como um padrão de quantificação e de qualidade da matéria-

prima (BATISTA; KLITZKE; SANTOS, 2010; GUERRA; EUFRADE JUNIOR, 2019) para os diversos fins (FISCHER; ZYLBERSZTAJN, 2012). A matéria-prima de qualidade é o resultado de práticas de manejo florestal e de uma combinação de características genéticas, físicas, anatômicas e químicas da madeira (GUERRA; EUFRADE JUNIOR, 2019).

No setor industrial e nos estudos envolvendo a matéria prima madeira, a densidade ainda é uma característica utilizada como um fator de correlação, pois, exemplo desta afirmação é o rendimento de polpação na indústria de polpa de celulose baseada nesta característica (MOKFIENSKI et al., 2008), que são alcançados com densidade básica variando entre 470 a 490 kg.m⁻³ (GOMIDE et al., 2010). É um parâmetro utilizado nas indústrias de madeira serrada, na moveleira e nas siderurgias (MALONEY, 1989; GONÇALVES et al., 2006; LOPES et al., 2011), portanto, os processos de avaliação da matéria-prima são necessários, devido a novos programas de melhoramento apresentarem material genético diferenciado, visando melhora na produtividade (FERNANDES et al., 2011). Perante o cenário, a utilização de matéria-prima renovável, a demanda de florestas plantadas e a diversidade dos produtos, torna-se evidente a necessidade de qualificar a madeira e analisar os impactos oriundos de madeira com densidades superiores e inferiores.

As análises para a quantificação e a qualificação muitas vezes são aplicadas de forma equivocada, promovendo uma baixa ou alta demanda de matéria-prima ou de produção. As metodologias atualmente empregadas muitas requerem um tempo demasiado para a execução, e disponibilidade de recursos humanos, as novas metodologias apresentam a tendência de análises praticamente instantâneas e dinâmicas para uma tomada de decisão eficaz.

Métodos de determinação da densidade

A determinação da densidade básica não requer dificuldade é determinada com a interação entre massa seca (kg) e volume verde (m³) ou saturado, esta propriedade é empregada na indústria, devido à sua importância nos inventários florestais e para a caracterização da madeira (GONÇALVES et al., 2006; MOKFIENSKI et al., 2008; MOULIN et al., 2017; GUERRA; EUFRADE JUNIOR, 2019), utilizada na comparação e na uniformidade dos resultados.

As metodologias utilizadas para a determinação da densidade básica se destacam as que utilizam de forma direta a mensuração de volume, por meio da imersão em água. Os métodos da balança hidrostática e de imersão em água são metodologias utilizadas e difundidas para qualificar a madeira de um modo geral, devido à simplicidade e praticidade quando comparada a outros métodos. O método da balança hidrostática, utilizado para caracterização da madeira, é preciso e regido pela ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 11941:2003). O método de imersão para determinar a densidade obtém o volume pela massa do fluido (água, mercúrio) deslocado quando a amostra é imersa no mesmo, cuja metodologia é descrita pela norma ASTM - *Designation: D2395-7a: Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials*.

O método da balança hidrostática para determinação do volume da madeira consiste em determinar o volume completamente saturado (m^3) e a massa completamente seca (kg). Outro método é a imersão em água que abrange amostras com umidade próxima a 12%, cuja a característica do método é a praticidade, pois, com qualquer umidade e a qualquer momento pode ser obtida a densidade da madeira. Segundo Costa (2006) e Bruder, Rezende e Costa (2016) a densidade pode ser obtida em qualquer umidade entre 12 a 50% e transformada em qualquer outra, por meio de equações de forma precisa.

Os métodos que utilizam ensaios não destrutivos para caracterização da madeira estão ganhando espaço, devido, à possibilidade de reutilização da peça testada para outros ensaios, a confiabilidade dos valores obtidos, a rapidez de aplicação (PAULA et al., 2016) e repetitividade dos resultados determinado. Tais métodos, correlacionam os resultados das propriedades físicas e químicas com o objetivo de prever as propriedades da madeira (GOUVÊA, 2011), e trabalhos de Targa et al., (2005) e Abreu et al. (2013) são alguns exemplos de avaliação. As principais vantagens para aplicação são devido, ao baixo custo dos equipamentos, a praticidade dos testes, a capacidade de avaliação de grande número de amostras, à comodidade e à agilidade nas determinações, que podem ser aplicados por diferentes metodologias, na avaliação dos parâmetros de qualidade da madeira (BALLARIN; NOGUEIRA, 2005; GOUVEA et al., 2011).

Os ensaios têm contribuído para o avanço do conhecimento da variabilidade natural da madeira (SCHIFMAN et al., 2012), que permitem a identificação da homogeneidade (BATISTA; KLITZKE; SANTOS, 2010) e a investigação de defeitos

internos, o que auxilia na sua utilização racional e adequada. Atualmente a exploração dos recursos tecnológicos bem adaptadas são importantes na melhora da coleta de dados para que a tomada de decisão seja eficaz.

Isótopos estáveis ambientais

Os isótopos estáveis são átomos que não emitem radiações e estão presentes em abundância no meio ambiente em seres vivos a partir dos elementos Carbono, Hidrogênio, Oxigênio, Nitrogênio e Enxofre (*CHONS*), também chamados de bioelementos. A análise dos isótopos estáveis (*AIE*) é uma metodologia utilizada para a investigação de cadeias alimentares e fluxos de nutrientes nos sistemas de produção animal, uma vez que reflete o valor isotópico dos bioelementos proveniente da dieta a qual foi submetido (LIMA, 2018), também sendo estudada como metodologia para análise qualitativa e quantitativa na área alimentar (MAPA, 2007; BAHAR et al., 2008).

Nas últimas décadas, a nossa compreensão dos processos de fracionamento de isótopos com base fisiológica em tecidos vegetais tem aumentado consideravelmente (DUCATTI et al., 2011; GESSLER, 2014). A maioria das novas descobertas, com foco nos isótopos estáveis de carbono, melhorou nossa compreensão da discriminação isotópica durante a fotossíntese (FARQUHAR et al., 1982; DUCATTI et al., 2011). Foi obtido um progresso na compreensão da composição dos isótopos de oxigênio e enriquecimento de evaporação da água da folha com influência na composição do fotossintato e sua conversão em biomassa (CUNTZ et al., 2003; FARQUHAR; CERNUSAK, 2005; GESSLER, 2014). No entanto, com os estudos e o conhecimento adquirido, ainda é desafiadora a interpretação de assinatura de isótopos de anéis de árvores, do que inicialmente considerado (GESSLER et al., 2009a).

A *AIE* também pode ser usada na autenticidade e rastreabilidade dos alimentos e bebidas (BAHAR et al., 2008; DUCATTI et al., 2011) com intuito, onde, metodologias convencionais não podem prever resultados totalmente seguros (DUCATTI et al., 2011). A mensuração dos bioelementos é determinada pela razão isotópica do menos abundante para o mais abundantes ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ e $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$) utilizando espectrometria de massas de razão isotópica (*IRMS*) para determinação e expressa pela diferença relativa da razão isotópica da amostra pela razão isotópica

de um padrão internacional, na notação em delta (δ) ($\delta^{13}\text{C}$, no caso do Carbono) expresso per mil (‰) (COPLIN, 2012).

As AIE dos bioelementos estão aumentando em pesquisas agropecuárias (LIMA, 2018), os primeiros produtos investigados foram frutas, sucos, mel, vinho e álcool e, para todos eles, foram utilizados métodos oficiais por meio da análise isotópica para detectar a adição de água ou açúcar, existem desde 1978 nos Estados Unidos e 1995 na Europa (QUEIROZ, 2009), outra área que a AIE possibilitou avanço foi nas pesquisas relacionada à nutrição animal (DUCATTI, 2011).

No Brasil, o Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento publicou, em 2007, a Instrução Normativa N° 39 de 8 de agosto, que oficializou o método analítico para identificação da razão isotópica dos açúcares de diferentes origens, como: suco, refresco, néctar e bebida de uva (BRASIL, 2007). Como estes bioelementos (CHONS) constituem a estrutura dos carboidratos, proteínas, lipídios, ácidos nucleicos e são responsáveis por mais de 90% de todos os tecidos vivos, torna-se possível utilizar esta análise em estudos de nutrição e metabolismo animal (LIMA, 2018), como também análises envolvendo quantificação e qualificação de determinado produto. Portanto, a identificação, qualificação e a quantificação dos isótopos estáveis dos tecidos animais (KENNEDY; KROUSE, 1990), plantas e madeira dependem principalmente da alimentação, nutriente, água e gases envolvidos no processo.

O carbono é um dos principais bioelementos da natureza, e uma vez que a matéria orgânica viva é composta principalmente de carbono, os ciclos de outros elementos importantes como nitrogênio e oxigênio são influenciados pelo ciclo desse bioelemento e as alterações antrópicas (desmatamentos, queimadas, efluentes domésticos, uso de combustíveis fósseis, etc.), em muitas fases do seu ciclo biogeoquímico estão influenciando o equilíbrio de muitos ecossistemas e da atmosfera global. O uso dos isótopos estáveis em estudos ambientais baseia-se no fato de que o valor isotópico varia de uma forma previsível conforme o ciclo do elemento na natureza.

Há uma diferença na abundância natural dos isótopos estáveis do carbono, a relação na maioria das amostras fornece valores pequenos. A fonte primária do $\delta^{13}\text{C}$ para as plantas terrestres é o gás carbônico atmosférico, o qual apresenta valor de aproximadamente $-7,7\text{‰}$ (KENNEDY; KROUSE, 1990). Os isótopos de ^{13}C sofrem uma discriminação isotópica ao longo do processo de fotossíntese. O termo

“discriminação isotópica” indica que houve enriquecimento ou empobrecimento do isótopo menos abundante relativo do produto em relação à fonte precursora.

Análise de isótopos estáveis na madeira

Atualmente, há discussão entorno das mudanças climáticas globais, que combinadas com a elevação das concentrações atmosféricas de CO₂, apresentam características que afetam o crescimento e o desempenho das plantas e, conseqüentemente, a composição e distribuição espacial das espécies dos ecossistemas terrestres (IPCC, 2019). Para avaliar o efeito das variáveis climáticas no desempenho das plantas a longo prazo é necessário caracterizar e interpretar informações fisiológicas registradas em arquivos naturais “no passado” (GESSLER, et al., 2009a).

As plantas lenhosas apresentam crescimento secundário, os anéis de crescimento no xilema (geralmente referidos como 'anéis de árvores') que registra informações sobre as condições ambientais e ecofisiológicas sob as quais o CO₂ atmosférico foi assimilado e particionado durante o crescimento (GESSLER et al., 2014). Com os registros nos anéis das árvores, foi possível reconstruir as variações climáticas (BRIFFA et al., 2002) e as respostas obtida das árvores a essa variação, muito antes dos tempos pré-industriais (GESSLER et al., 2014). A tecnologia ajudou a promover descobertas, pois, nos últimos anos, vimos que as informações sobre anéis de árvores também foram utilizadas para estimar a biomassa e a produção primária de árvores (KIRDYANOV et al., 2003) e mais recentemente para a validação do fluxos de carbono em ecossistemas terrestres (BABST et al., 2013; LARA, et al., 2013).

A AIE, cada vez mais está promovendo descobertas e a procura pela melhor correlação com variáveis, seja, quanto as climáticas, as ambientais, a rastreabilidade, a certificação, a quantificação ou a qualificação de um produto. Como exemplo, os índices isotópicos em celulose de anéis de árvores ou madeira inteira são cada vez mais usados como ferramentas para obter uma visão retrospectiva de processos ecofisiológicos, especialmente taxas de processo e as resistências mitigadoras que controlam trocas de massa e energia entre plantas e atmosfera (MARSHALL; MONSERUD, 1996, 2006; SAURER et al., 1997a; RINNE et al., 2010). A teoria do fracionamento dos isótopos estáveis na escala foliar e sua transferência para o

arquivo de anéis de árvores, apresenta grande evolução, mas nos últimos anos várias publicações têm argumentado que existem processos faltando na teoria, especialmente no que diz respeito ao caminho da produção de fotossintatos foliares para a formação de madeira (FLANAGAN et al., 1998; GESSLER et al., 2014;).

A A/E é utilizada em várias áreas e se destacou na análise de fluxos e de rotas metabólicas (RATCLIFFE; SHACHAR-HILL, 2006), análise de efeitos de estresses em plantas e em estudo da matéria orgânica do solo (PFLUG et al., 2015). A metodologia possui uma vasta aplicação e com os estudos realizados foi possível combinar a compreensão adquirida sobre a discriminação isotópica fotossintética, com mudanças na composição do isótopo de carbono da atmosfera, possibilitando a reconstrução de padrões históricos pela combustão de combustível fóssil e sua influência no ciclo global de carbono (GRUBER et al., 1999).

A maior parte dos estudos correlacionam a $\delta^{13}\text{C}$ da madeira inteira, celulose e lignina e relatam resultados análogos dos sinais climáticos (LOADER et al., 2003; ROBERTSON et al., 2004; HARLOW et al., 2006). Foi encontrada correlações entre a $\delta^{18}\text{O}$ utilizando a madeira e celulose e foram relatadas que a $\delta^{18}\text{O}$ da celulose quanto o da lignina apresentaram correlações com a $\delta^{18}\text{O}$ da precipitação (BORELLA et al., 1999; GORI et al., 2012). Contrastando os resultados, outras correlações fracas foram encontradas entre a $\delta^{18}\text{O}$ da madeira inteira e celulose (GRAY; THOMPSON, 1977; BATTIPAGLIA et al., 2008), e até mesmo relações ligeiramente negativas entre a $\delta^{18}\text{O}$ da celulose e a lignina. Os resultados contrastantes podem ocorrer devido à complexidade da biossíntese de lignina, a partir do fato de que parte do oxigênio nos precursores de lignina é originalmente derivada de oxigênio molecular (BOERJAN et al., 2003; SHI et al., 2010), e não exclusivamente de água, como é o caso dos açúcares e celulose.

As análises entre a celulose e a lignina podem apresentar correlações forte ou fraca, que dependem de alguns fatores, sejam ambientais ou fisiológicas, como quando há elevada troca entre o oxigênio nos precursores da lignina e água, a correlação é diretamente proporcional (BATTIPAGLIA et al., 2008). Portanto, mais estudos tornam-se necessários para entender a forma em que o sinal do isótopo de oxigênio é propagado para a lignina, e sua variabilidade com o clima e entre as espécies. Ao realizar pesquisas mais intensivas, os resultados apontam que sinais climáticos passados são melhores registrados em $\delta^{18}\text{O}$ de madeira inteira, e não com celulose ou lignina (GORI et al., 2012). Entretanto, o procedimento de trabalho mais

sensato é testar a extração de celulose, pelo menos com um subconjunto de amostras, e usar a madeira inteira, se os valores estiverem bem correlacionados com os da celulose.

Alterações isotópicas de $\delta^{13}\text{C}$ na madeira

As medições realizadas de CO_2 retido nas calotas de gelo (Antártida e na Groenlândia) informam que, as mudanças durante os últimos 150 anos, na composição atmosférica de CO_2 excedem os alcançados no último meio milhão de anos, demonstrando um aumento de aproximadamente $\sim 270 \mu\text{mol mol}^{-1}$ durante a maior parte do Holoceno¹ para valores acima de $350 \mu\text{mol mol}^{-1}$ (INDERMUHLE et al., 1999). As variações na concentração atmosférica de CO_2 vêm com depleção em $\delta^{13}\text{C}$, mas mudanças na própria concentração de CO_2 também pode afetar a $\delta^{13}\text{C}$ do material vegetal e, portanto, indicando uma resposta fisiológica à mudança ambiental (GESSLER et al., 2014).

Vários estudos em anéis de crescimento de árvores (HERES et al., 2013, VOLTAS et al., 2013), em material de herbário (KÖHLER et al., 2010) e em folhas sub-fósseis (BEERLING, 1996) apresentaram resultados opostos às tendências em $\delta^{13}\text{C}$, com um aumento na planta da $\delta^{13}\text{C}$, desde o período pré-industrial até o atual, embora esta tendência tenha variado consideravelmente entre espécies. No entanto, essas tendências foram interpretadas como comprovação da eficiência no uso de água, em resposta às mudanças de CO_2 atmosférico. Portanto, uma vez que o recente aumento de CO_2 está associado à mudança climática global é difícil separar CO_2 e efeitos climáticos na $\delta^{13}\text{C}$ em estudos retrospectivos. Além disso, a maior eficiência do uso da água em resposta a concentrações crescentes de CO_2 são geralmente esperadas em plantas C3 (FRANKS et al., 2013). Infelizmente, enquanto o efeito de CO_2 elevado ($>350 \text{ ppm}$) no metabolismo das plantas são o objeto de pesquisa, apenas alguns estudos experimentais foram realizados para compreender a resposta da planta sob ambientes de baixo CO_2 (POLICY et al., 1993). Alterações nas

¹ Na escala de tempo geológico, o **Holoceno** ou **Holocénico** é a atual época do período Quaternário da era Cenozoica do éon Fanerozoico que se iniciou há cerca de 11,65 mil cal anos antes do presente, após o último período glacial, que concluiu com o recuo glacial holocénico. O Holoceno e o Pleistoceno precedente juntos que formam o período Quaternário. O Holoceno foi identificado com o período quente atual, conhecido como MIS 1. É considerado por alguns como um período interglacial dentro da época do Pleistoceno. Fonte: Wikipédia, 04/2019.

características anatômicas, como a densidade de estômatos, em resposta ao aumento de CO_2 (GAGEN et al., 2011) pode complicar ainda mais a interpretação de $\delta^{13}C$ em registros de anéis de árvores.

CAPÍTULO 1 - VARIAÇÃO DA DENSIDADE DA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* SUBMETIDAS AO DÉFICIT HÍDRICO

RESUMO

A indústria utiliza madeira de florestas plantadas das espécies do gênero *Eucalyptus* como matéria-prima para diversos fins e atualmente existem poucas opções de madeira alternativa no mercado. Portanto, dada a importância do gênero *Eucalyptus* para a indústria, a evolução do método de produção, as variações climáticas e as exigências do mercado, o objetivo do trabalho foi determinar a densidade (ρ) da madeira na direção radial e longitudinal de árvores de seis anos de *Eucalyptus grandis* das procedências seminal e clonal sob déficit hídrico com restrição de um terço da água de precipitação, com o intuito de estabelecer relações. A ρ foi determinada pela atenuação da radiação gama do ^{241}Am . A ρ das procedências submetidas ao tratamento com e sem déficit hídrico não apresentou diferenças significativas. O volume apresentou diferenças significativas entre os tratamentos com déficit hídrico, sendo inferior a 50% em relação ao tratamento convencional. Foi possível estimar a ρ da árvore utilizando as amostras da região a 12,5% da altura e a análise obteve um coeficiente de determinação de 0,83 e a correlação de 0,92. A ρ estimada na região de 12,5% altura da árvore poderá auxiliar na estimativa de densidade alcançando resultados muito próximos ao estimado da árvore.

Palavras chaves: Silvicultura. Gravidade específica. Densidade ponderada.

ABSTRACT

The industry uses reforestation wood of the species of the *Eucalyptus* genus as raw material for several purposes and currently there are few options for alternative wood on the market. Given the importance of the *Eucalyptus* genus for industry, the evolution of the production method, climatic variations and the requirement of the market, the objective of the study was to determine the density (ρ) of the *Eucalyptus grandis* in the radial and longitudinal direction wood from the tree seminal and clonal sources under water deficit, implemented with reduction of one third of the rain, in order to establish relationships. The ρ was determined by gamma-ray attenuation of ^{241}Am . The ρ of the treatment with hydric deficit did not present significant differences. The volume showed significant differences between treatment with hydric deficit showed a result less than 50% compared to conventional treatment. It was possible to estimate the density (ρ) of the tree using samples from the region at 12.5% of the height. The analysis obtained a determination coefficient of 0.83 and a correlation of 0.92. The estimated ρ in the region 12.5% can help in the density estimate reaching results very close to the estimated tree.

keywords: Forestry. Specific gravity. Weighted density.

1.1 INTRODUÇÃO

O gênero *Eucalyptus* ganhou destaque devido ao potencial para processamento mecânico da madeira (LIMA; GARCIA, 2010), ao rápido crescimento (GONÇALVES et al., 2010), a adaptação às condições ambientais encontradas em grande parte do Brasil (ASSIS; RESENDE, 2011). Outras características importantes são suas propriedades físicas e mecânicas adequada ao produto final (VIDAL et al., 2015) e poder ser produzida a baixo custo (OLIVEIRA et al., 2012). O gênero apresenta variedade de cores que contribui para valorizar o seu potencial em substituir espécies tradicionalmente utilizadas em determinados usos (LIMA; GARCIA, 2010; HSING et al., 2016). O gênero no Brasil apresenta grande importância comercial que é representada pela área das florestas plantadas, que ocupa cerca de 7,8 milhões hectares (IBÁ, 2019).

O gênero apresenta diversidade estrutural, sendo necessário compreender suas propriedades e variações para obter o controle da qualidade da matéria-prima (GONÇALEZ et al., 2014). Esforços e investimentos no setor florestal em qualidade mostram-se como a principal alternativa para obtenção de árvores com madeiras uniformes ou homogêneas (BATISTA; KLITZKE; SANTOS, 2010; DREW; DOWNES; EVANS, 2011), melhorando a sua utilidade evitando ineficiências (GONÇALEZ, 2014). O interesse crescente no uso de madeiras de florestas plantadas, devido à alta demanda, seja para o setor de celulose e papel (IBÁ, 2019), para a produção de ferro gusa (PEREIRA et al., 2016), madeira serrada (CADEMARTORI et al., 2015) e etc. Com a necessidade de matéria-prima de qualidade o planejamento da dinâmica de uma floresta plantada faz toda a diferença (CHAVES; MAROCO; PEREIRA, 2003), pois, os tipos diferenciados de manejo, podem promover alterações na qualidade da madeira (LIMA; GARCIA, 2010), consequentemente no produto final desejado e em seu valor agregado.

A quantificação e qualificação da madeira é importante e os métodos utilizados apresentaram avanços nos últimos anos, que foram imprescindíveis para avaliar a madeira de forma geral. A Técnica de Atenuação da Radiação Gama analisa a variação densitométrica radial e longitudinal caracterizando o perfil da madeira (REZENDE, 1997; COSTA, 2006; JAMMAL FILHO, 2016). Esta metodologia é empregada para a obtenção do perfil radial da madeira, que são variações precisas de densidade intra e inter anéis de crescimento e associadas com as condições

climáticas (SETTE JR et al., 2016), fixação do carbono (PITA et al., 2005), influência da fertilização (CASTRO et al., 2017), de práticas silviculturais e com a qualidade da madeira (CHERUBINI et al., 2013, SURDI et al., 2014). Os estudos realizadas entre as características da madeira e o ambiente em que está inserida, fazem parte do conhecimento e servirão para a construção de estratégias para os condições adversas futuras, devido à projeção do aumento do aquecimento antrópico (SCHIFMAN et al., 2012). Portanto, há a necessidade de compreender o comportamento das florestas e se haverá limitações de crescimento.

O gênero *Eucalyptus* possui uma plasticidade fenotípica (VIDAL et al., 2015) em relação à variação da temperatura (SANTANA et al., 2008), mas a água e os nutrientes são os fatores que contribuem com maior relevância na produção (produtividade) florestal (SANTANA et al., 2008; CASTRO et al., 2017). Outro fator importante relacionado as condições climáticas e o mecanismo fisiológico das plantas que apresentam inibição do crescimento volumétrico quando submetidas às condições de estresse (BLAKE; TSCHAPLINSKI, 1992). O gênero *Eucalyptus* quanto submetido ao déficit hídrico possui um mecanismo de otimização e minimização do efeito do estresse, pela redução da condutância estomática e diminuição da taxa de transpiração em relação à absorção de CO_2 , aumentando a eficiência da utilização da água.

Perante, as incertezas do cenário futuro com ambientes mais severos e a importância da florestas plantadas, o trabalho testou a hipótese que o estresse hídrico apresenta influência sobre o perfil da densidade da madeira e que o valor médio da densidade árvore apresenta resultados diferentes entre os tratamentos convencionais e os submetidos ao déficit hídrico. Portanto, o objetivo do trabalho foi determinar a densidade da madeira de *Eucalyptus grandis* na direção radial e longitudinal com o intuito de estabelecer relações com os regimes que foram submetidos com e sem déficit hídrico.

1.2 MATERIAL E MÉTODO

1.2.1 Amostragem e análise

O experimento foi instalado na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga – SP. O clima da região é caracterizado como mesotérmico úmido (Cwa), segundo Koppen, com precipitação e temperatura média anual respectivamente de 1635 mm e 16,2°C nos meses frio e 28,6°C nos meses mais quentes. O solo foi caracterizado como latossolo vermelho amarelo distrófico, com a litologia composta por arenito, de textura média. O plantio foi realizado em maio de 2010, utilizando a espécie *E. grandis* de procedência clonal e seminal, da empresa Suzano Bahia Sul, com espaçamento de 3x2 m e fertilização básica inicial de 2000 kg de calcário dolomítico por hectare. Foram plantadas 684 árvores divididas em 3 blocos de 228 árvores, e cada bloco dividido em 6 parcelas, sendo metade com um potencial de restrição de um terço de precipitação (exclusão artificial com a utilização de cobertura do solo de 1700 m² de lonas de polietileno transparente). As 18 parcelas, de 38 árvores, cada uma alternavam entre os quatro tratamentos: *CD* (clonal com déficit); *CN* (clonal convencional); *SD* (seminal com déficit) e *SN* (seminal convencional). De cada tratamento foram selecionadas 6 árvores representativas com 6 anos de idade e retiradas do centro de cada parcela (Figura 1). Durante a seleção e amostragem das árvores foram medidas a altura total e o diâmetro a altura do peito (*DAP*) (Tabela 1).

Figura 1 - Discos serrados e com espessura uniforme de *Eucalyptus grandis*. Dados: amostras clonais de 12,5, 37,5, 62,5 e 87,5% da altura total; Figura (A) – Amostras obtidas no tratamento convencional; Figura (B) - Amostras obtidas no tratamento com déficit hídrico

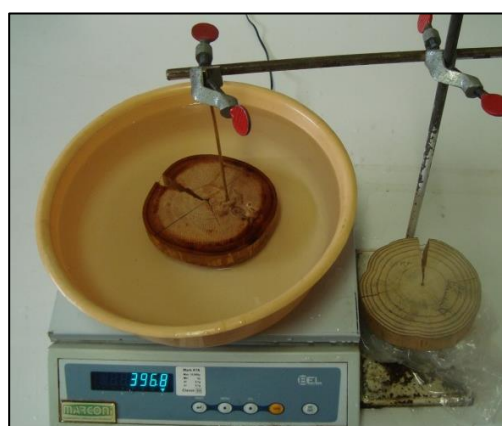


Tabela 1 - Características por tratamento das árvores de *Eucalyptus grandis*

Tratamento	Número de árvores	Altura média total (m)	Diâmetro a altura do peito (cm)
CD	6	14,47±1,24	7,95±1,06
CN	6	21,14±0,68	12,34±1,00
SD	6	14,77±1,04	7,72±0,91
SN	6	19,41±0,70	11,75±0,68

Para avaliar a densidade na direção axial das árvores foram amostrados quatros discos (a, b, c e d) localizados no centro de cada $\frac{1}{4}$ da altura total (at), nos percentuais de 12,5%, 37,5%, 62,5% e 87,5% respectivamente e espessura uniforme entre 1,0 e 2,0 cm. Todos os discos foram submetidos ao processo de secagem natural por 60 dias, até adquirirem massa constante. O volume dos discos, sem casca, foi obtido por meio da força de empuxo, utilizando o Método de Imersão – *MI*, a partir da imersão em recipiente com água sob balança, a fim de obter a densidade na umidade de equilíbrio, conforme Figura 2. A densidade na umidade de equilíbrio foi obtida pela divisão da massa sobre o volume (BRUDER; REZENDE; COSTA, 2016; BRUDER, 2018) que utilizou o método com os instrumentos balança e paquímetro (MPB); e a área da face dos discos obtida pela divisão do volume pela espessura.

Figura 2 - Ilustração para determinar o volume das amostras (12% de umidade); Figura (A) método por imersão em água; Figura (B) amostras com densidade do fluido maior que o densidade do corpo

**(A)****(B)**

Fonte: Adaptado de Bruder, E. M. (2012)

Para avaliar a densidade na direção radial das árvores foram determinadas as densidades pontuais ao longo do raio dos discos (três ponto por milímetro) do centro para a casca. Cada valor pontual da densidade foi obtido pela Técnica de Atenuação da Radiação Gama (TARG), conforme Figura 3, com um feixe colimado (0,5 x 6,0 mm) de 59,6 keV de energia que atravessa o disco na direção axial. Os discos foram acomodados em um sistema com movimentação automática em 3,0 mm.min⁻¹, uma fonte fixa e blindada de radiação gama com o radioisótopo ²⁴¹Am (atividade de 200 mCi) e um detector fotomultiplicador de cintilação sólida de NaI(Tl) (Ortec) a 10 cm da fonte. A intensidade atenuada da radiação gama (*I*) detectada, em cpm (contagens por minuto), obtido a cada 20 segundos, foi realizada a amplificação do sinal analógico detectado e a conversão para sinal digital foi utilizada uma placa eletrônica acoplada a um computador. A intensidade inicial da radiação gama (*I*₀), em cpm, foi detectada no sistema sem a amostra e a densidade pontual (ρ_i), em g.cm⁻³, dos enésimos pontos (*i*) foi determinada pela função exponencial, conforme Equação 1.

$$\rho_i = \frac{\ln I_0 - \ln I}{\mu_m x} \quad (1)$$

Onde μ_m , em cm².g⁻¹, é o coeficiente de atenuação de massa e *x*, em cm, é a espessura do disco e *i* é a enésima densidade pontual com *n* pontos. O valor de μ_m foi ajustado experimentalmente a partir da densidade média do disco (MALAN, 1992). Após a análise da densidade pela TARG os discos foram submetidos a secagem forçada em estufa a 105°C para obter as massas secas e o percentual de umidade.

Figura 3 - Sistema de Atenuação da Radiação Gama de ²⁴¹Am: Figura 3A – Imagem frontal; Figura 3B – Imagem lateral

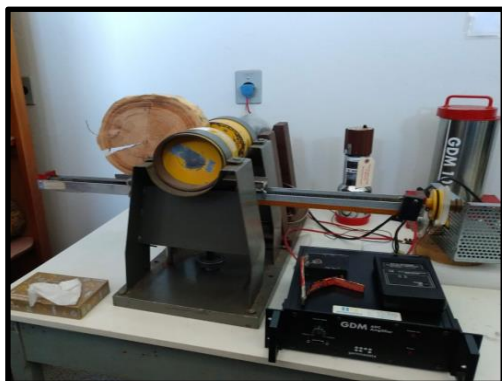


Figura: 3 – A



Figura: 3 – B

Fonte: Adaptado de Bruder, E. M. (2012)

1.2.2 Cálculo da densidade da madeira nos discos e nas árvores

Para o cálculo da densidade média ponderada ou densidade aparente (ρ_a), em g.cm^{-3} , dos discos foi considerado que são formados por n anéis delgados e concêntricos de massa (m_i), volume (v_i) e densidade ρ_i conforme Equação 2.

$$\rho_a = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_i + \dots + m_n}{v_1 + v_2 + \dots + v_i + \dots + v_n} = \frac{v_1 \rho_1 + v_2 \rho_2 + \dots + v_i \rho_i + \dots + v_n \rho_n}{v_1 + v_2 + \dots + v_i + \dots + v_n} \quad (2)$$

Considerando que ρ_i ao longo do raio dos discos foi determinada com mesmo intervalo de distância radial (r) devido a velocidade constante do sistema da *TARG*, e que, a espessura (x) de cada disco é constante. Assim, v_i foi calculado conforme Equação 3. Sabendo que o termo $(2i-1)$ é a sequência dos números naturais ímpares, e que a soma deles é igual a n^2 , onde n é a quantidade de números da sequência a somatória dos volumes dos anéis delgados v_i pode ser representado pela Equação 4.

Substituímos a Equação 4 na Equação 2 e temos a densidade ponderada (ρ_a) do disco a partir da ρ_i e n , conforme Equação 5.

Também foram calculadas as densidades médias aritméticas das ρ_i apenas dos discos a 12,5% de at de cada árvore considerando: ρ_i todos os pontos; $\rho_{1/2}$ metade dos pontos até a periferia; $\rho_{2/3}$ os 2/3 dos pontos até a periferia (WIEMANN; WILLIAMSON, 2012; WASSENBERG et al., 2015), para avaliação do ponto ideal de amostragem da densidade na árvore.

$$\begin{aligned} v_1 &= r^2 \pi x \\ v_2 &= 4r^2 \pi x - r^2 \pi x = 3r^2 \pi x \\ v_3 &= 9r^2 \pi x - 4r^2 \pi x = 5r^2 \pi x \\ v_4 &= 16r^2 \pi x - 9r^2 \pi x = 7r^2 \pi x \\ v_i &= i^2 r^2 \pi x - (i-1)^2 r^2 \pi x = (2i-1)r^2 \pi x \end{aligned} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n v_i = r^2 \pi x \sum_{i=1}^n (2i-1) = r^2 \pi x (n^2) \quad (4)$$

$$\rho_a = n^{-2} \sum_{i=1}^n (2i-1) \cdot \rho_i \quad (5)$$

Para o cálculo da ρ_a , em kg.m^{-3} , de cada árvore foi utilizada a Equação 2 considerando que v_i seja o volume cilíndrico de cada $\frac{1}{4}$ do seguimento (a , b , c e d) da árvore, onde a área do cilindro será a área do disco (A) no centro do segmento e a

altura será a mesma para todos os segmentos e igual a $\frac{1}{4}$ da ac . Assim, temos a ρ_a da árvore a partir de A e ρ dos discos a , b , c e d da árvore, conforme Equação 6.

$$\rho_a = \frac{A_a\rho_a + A_b\rho_b + A_c\rho_c + A_d\rho_d}{A_a + A_b + A_c + A_d} \quad (6)$$

Também foram calculadas as densidades médias aritméticas dos discos, a ponderação e as variações ao longo da direção axial de cada árvore. A conversão de ρ_a no teor de umidade dos discos em densidade básica (ρ_b) foi realizada com equações de conversão para *Eucalyptus. grandis* (COSTA; REZENDE; RODRIGUES, 2014).

1.2.3 Análise dos dados

O software utilizado para obtenção dos gráficos e ajuste das equações foi o *MICROCAL SOFTWARE, INC. Data analysis and technical graphics software. Origin Professional Version 6.0*, com uma atualização para a versão *Origin Professional Version 7.0*. A análise estatística foi realizada para investigar as influências das variáveis determinadas na madeira bem como suas interações. Neste processo investigativo promoveu-se a análise de variância, além de testes de comparação de médias (Tukey), ao nível de 5% de probabilidade. As análises de variância foram realizadas após a confirmação da normalidade e variância constante (homocedasticidade) dos dados. Foram realizadas correlações e regressões com o intuito de estimar a relação entre as variáveis estudadas.

Antes de realizar as análises estatísticas, foram formuladas hipóteses gerais para os efeitos das diferentes variáveis em função da variação da densidade. As conjecturas esperadas foram: (1) as procedências (C e S) e os tratamentos (D e N) apresentassem densidade diferentes; (2) o perfil axial e radial diferenciado, pois o déficit hídrico alterou o padrão fisiológico da planta promovendo a redução do conteúdo de água, diminuição do potencial hídrico, fechamento de estômatos, redução da expansão celular e do crescimento das plantas (JALEEL et al., 2008).

Para analisar os métodos de Imersão (MI), $TARG$ e suas variáveis foi realizada a análise de variância (ANOVA) para determinar a eficiência dos métodos para garantir a assertividade dos resultados. As ρ_l , $\rho_{1/2}$, $\rho_{2/3}$, ρ_a , ρ_{art} e ρ_b foram selecionadas

para correlacionar com a ρ_a das árvores na tentativa de obter um ponto ideal de amostragem na árvore.

Para analisar o perfil radial dos discos (*TARG*), foi inserida uma regressão polinomial de 2º grau ($y = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2x^2$) para verificar visualmente a tendência de aumento do perfil radial das amostras a 12,5, 37,5 e 62,5% *at*. A regressão foi escolhida, pois, foi a que se ajustou melhor ao perfil radial médio. Com o perfil radial da região a 12,5% foi realizado uma análise de regressão linear ($y = \beta_0 + \beta_1x$) para avaliar a inclinação da reta, em que a variável β_1 (coeficiente angular) que estima a maior ou menor inclinação fornecendo um parâmetro quantitativo para avaliar o aumento da densidade no perfil radial.

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

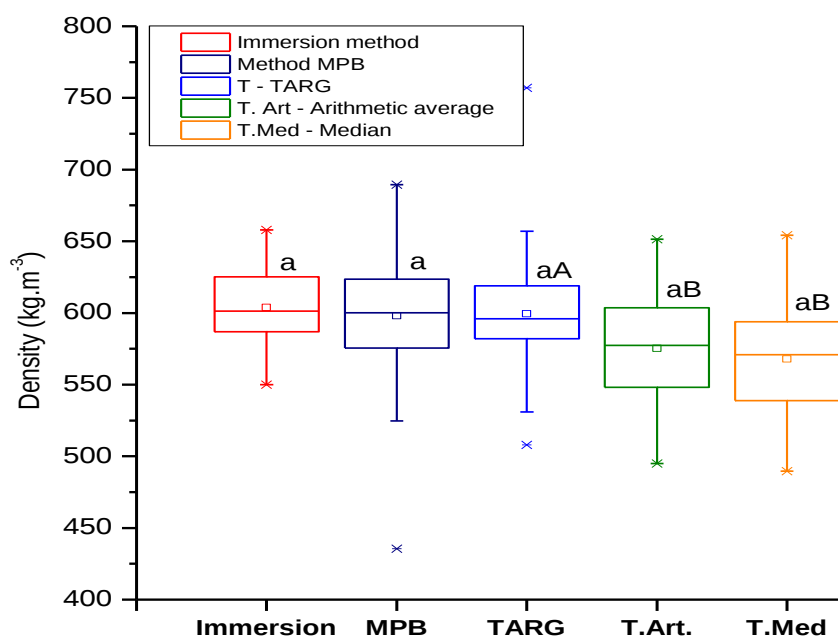
1.3.1 Ponderação no valor médio da densidade

A ρ_a foi estimada por três ensaios (Figura 4) e não apresentaram diferenças significativas. A opção por utilizar métodos diferentes foi a garantia de assertividade e a precisão dos resultados (REZENDE et al., 1997; COSTA, 2006; BRUDER, 2018). A opção em utilizar a *TARG* foi a obtenção de variáveis nos discos, para melhorar a eficácia dos parâmetro para facilitar ou melhorar as estimativas de avaliação da matéria-prima (GONÇALVES et al., 2018) como, a ρ_a e a gravimétrica utilizadas para estimar os parâmetros anatômicos e físicos (COSTA, 2006; BRUDER, 2012; PEREIRA et al., 2016; GUERRA; EUFRATE JUNIOR, 2019).

O resultado médio da ρ_a a ρ_b apresentaram respectivamente as médias de 599 e a 489 kg.m⁻³, e os resultados não foram diferentes da literatura (FERNANDES et al., 2011; LOPES et al., 2011; PEREIRA et al., 2016). A ρ_a dos tratamentos não apresentaram diferenças a 5% de probabilidade, ou seja, o déficit hídrico não afetou a densidade média dos tratamentos. O resultado foi diferente do esperado, devido ao estresse, quando a planta é submetida ao déficit hídrico, a função fisiológica é alterada, melhorando a eficiência no uso da água (HAKAMADA et al., 2020), diminuindo a absorção de CO₂, o crescimento diametral lento com a mudança fisiológicas (HAKAMADA et al., 2020; SCHIFMAN et al., 2012), portanto, esperava-se um aumento da densidade, mas o tratamento apresentou as mesmas características

do tratamento convencional. Os resultados foram diferentes das mesmas procedências de *E. grandis* submetidas ao déficit hídrico com suplementação nutricional, que apresentaram a maior variação da densidade aparente do lenho (CASTRO et al., 2017).

Figura 4 - Comparação entre os métodos utilizados para determinar a densidade aparente (ρ_a - kg.m^{-3}) dos tratamentos com e sem déficit hídrico. Dados: as letras (a) em minúsculo não apresentam resultados com diferenças significativas, e as letras (A e B) em maiúsculos são os resultados das variáveis obtidas pela TARG e apresentam resultados com diferenças significativas



A análise ρ_a obtida dos tratamentos *N* e *D*, apresentaram os valores respectivamente de 592 e 596 kg.m^{-3} , resultados semelhantes foram determinados por Soares et al., (2018) e Pereira et al. (2016) analisando a ρ_a de clones de *E. grandis* de 7,5 anos, e encontraram baixa variação entre as procedências clonais. Portanto, a ρ_a na direção longitudinal ou radial de árvores da mesma espécie, localizado em um mesmo sítio, sob as mesmas características edafoclimáticas e idades próximas apresentam um comportamento semelhante para a maioria dos casos estudados. Os resultados submetidos a um arredondamento evidenciam a mínima variação dos mesmos, pois, esta variação os justifica, os expressos apenas com duas casas decimais (MOULIN et.al., 2017).

1.3.2 Variação diametral

Na análise diametral restrita aos discos da região a 12,5% da *at*, o tratamento com déficit hídrico apresentou variações significativas a 5% de probabilidade (CASTRO et al., 2017; SCHAFER et al., 2018;), pois, esperava-se uma variação, devido ao formato dos tratamentos (FERNANDES, 2011; CASTRO et al., 2017;). Os tratamentos *CN* e *SN* apresentaram os maiores de área total dos discos quando comparada aos tratamentos *CD* e *SD*, conforme Figuras 5 e 6. A variação restrita à área entre as procedências submetidos ao mesmo tratamento (*CD* x *SD*) e (*CN* x *SN*) não apresentaram diferenças significativas. A análise entre a área média dos discos (*CD* e *SD*) de 12,5 a 87,5% *at*, apresentaram resultados significativos menores (ou menor produtividade) que o tratamento convencional (CASTRO et al., 2017; MOULIN et al., 2017), seguindo o padrão do resultado da região a 12,5% *at*.

Figura 5 - Representa a variação média diametral dos discos (m²) e os valores dos tratamentos com déficit hídrico (*CD* e *SD*) são relativos ao tratamento convencional (*CN* e *SN*). Dados: as letras em minúsculo foram para as análises realizadas para as amostras de 12,5 a 87,5% da altura comercial; e as letras maiúsculas foram utilizadas para as análises realizadas para as amostras a 12,5% da altura comercial

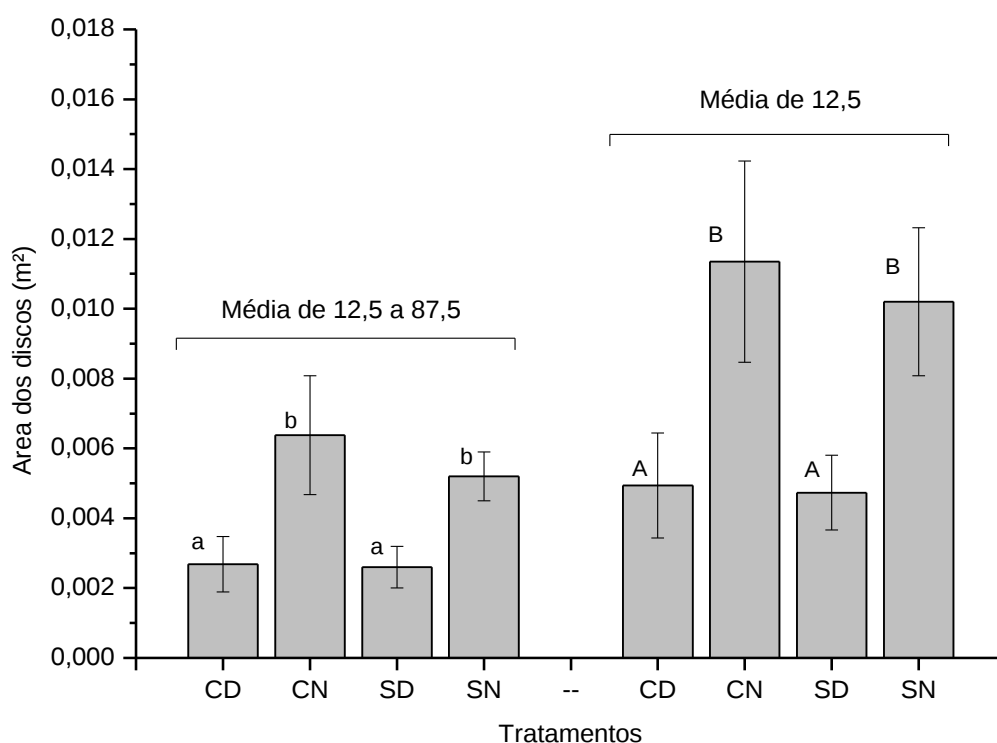
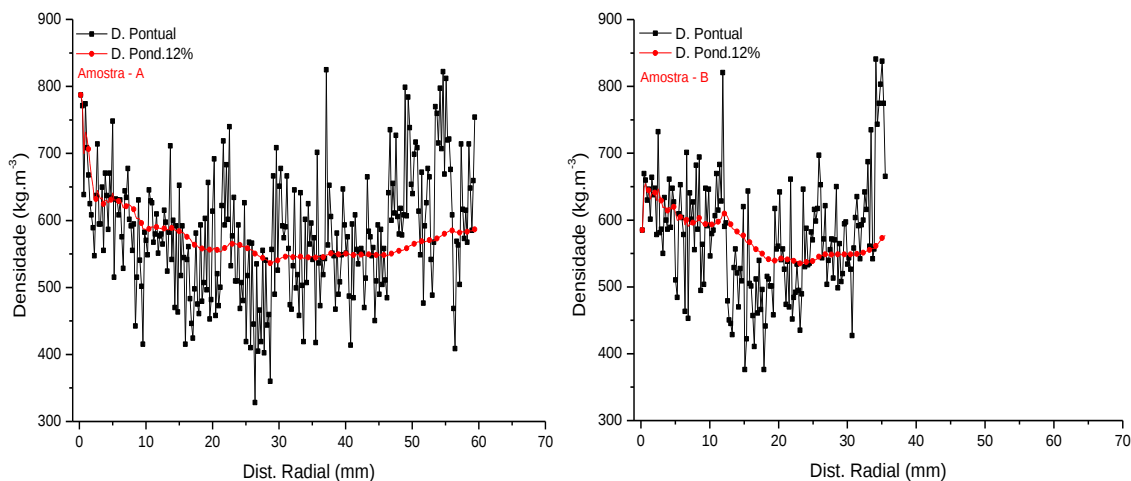


Figura 6 - Gráfico da variação radial de discos a 12,5% da altura comercial das árvores de *Eucalyptus grandis*. Obtidas pela Técnica de atenuação da radiação gama – TARG. Dados: Variação da densidade pontual e da densidade ponderada, a 12% de umidade, das amostras de procedência Seminal submetida ao tratamento convencional (A) e com déficit hídrico (B)



Os tratamentos convencionais (CN e SN) apresentaram um resultado maior que 50%, evidenciando a variação da área dos discos de 12,5 a 87,5% at. A variação diametral do tratamento sob estresse foi evidenciada devido à escassez hídrica, pois, é um dos principais fatores para o baixo desempenho ou até a inutilização da árvore (CASTRO et al., 2017). A expectativa foi concretizada quanto as alterações na planta promovida pelo déficit hídrico, pois afetou fortemente o crescimento do caule (SCHAFER et al., 2018). Portanto, em regimes hídricos, algumas espécies clonais do gênero *Eucalyptus* utilizam processos adaptativos diminuindo da taxa de fotossíntese, a condutância estomática e a transpiração (TATAGIBA et al., 2008). Outra estratégia de tolerância ao estresse é o fechamento parcial dos estômatos, pois diminui a taxa de transpiração, mantendo o conteúdo hídrico foliar hidratado (PEAK et al., 2004). Contudo, o controle estomático, a baixa condutância difusiva do mesofilo pode contribuir para uma limitante assimilação de CO_2 (PEEVA; CORNIC, 2009) diminuindo a formação de madeira.

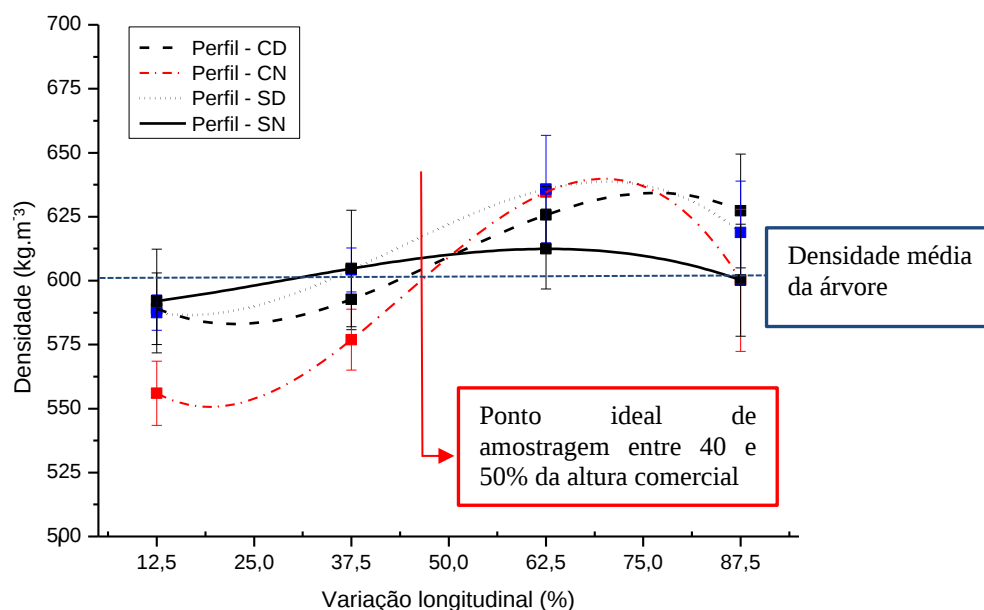
1.3.3 Densidade média da árvore

A busca por um ponto médio da árvore que caracterize a densidade média é importante para minimizar o trabalho em obter a densidade média de um lote, visto que um resultado poderá demorar semanas, se necessário a saturação das amostras

e a secagem completa (BRUDER; REZENDE; COSTA, 2016). Uma estimativa foi a correlação estimada entre a ρ_a e a ρ_{art} e apresentaram valores com diferenças significativa, conforme Figura 7. A estimativa da densidade das árvores (ρ_{ARV}) foi estimada a partir da ρ_a da região a 12,5% ac ($\rho_{a12,5\%}$) e apresentaram os respectivos valores de $^A599\pm23$ e $^B583\pm31$ kg.m⁻³, conforme a Tabela 2. A correlação foi estimada por uma análise de regressão e resultou em valores com diferenças significativas a 5% de probabilidade, e apresentou a correlação de 0,92 e um coeficiente de determinação (R^2) ajustado de 0,87. O resultado poderá ser utilizado para estimar a ρ_{ARV} utilizando apenas uma amostra na região entre 12 e 13% da altura. Com dados estimados de $\rho_{a12,5\%}$ foi ajustada a seguinte equação $y = 1,03x$. A estimativa possibilitou, se necessário, um ajuste com a equação na $\rho_{a12,5\%}$ do disco (x) para estimar a ρ_{ARV} (y). O resultado é positivo, pois, utiliza apenas uma amostra para estimar a densidade média da árvore, apesar da estimativa utilizar uma única amostra é necessário a coleta ou derrubada da árvore, caracterizando uma amostragem destrutiva.

A análise da ρ_a e do perfil longitudinal apresentaram resultados diferentes dos esperados, que era obter diferença entres os tratamentos (D e N) e as procedências (S e C), Figura 7 e Tabela 2. O perfil longitudinal apresentou uma pequena variação de densidade não uniforme, entre a base e o topo, que apresentaram os respectivos valores mínimos de 581 ± 13 e máximos de 611 ± 22 kg.m⁻³. O resultados está em conformidade com a literatura, pois, foram encontradas variações entre a base e topo entorno de 40 kg.m⁻³ (MACHADO et al., 2014) e variações maiores de 80 kg.m⁻³ (GIL et al., 2018). As análises evidenciaram um padrão longitudinal, que resultou em um ponto médio único para as amostras próximo a região a 45% da altura comercial (COSTA, 2006; BRUDER, 2012), cujo resultado possibilitou que a coleta de uma única amostra poderá ser realizada entre a região de 40 a 50% da ac que não afetará o resultado. A expectativa em obter um ponto ou discos para caracterizar a densidade média da árvores foi confirmada, caracterizando a viabilidade da região a 12,5% ac e a alta correlação foi devido apresentar as características da árvore, por apresentar todos os anéis de crescimento, além de estar em uma altura acessível, em um ponto médio próximo a 2 metros.

Figura 7 - Variação média da densidade aparente (ρ_a) na direção longitudinal base-topo pelo método de Imersão dos tratamentos clonal e seminal (CD, CN, SD e SN) de *E. grandis*



Na análise longitudinal apenas o perfil do tratamento SN foi diferenciado apresentando um perfil médio crescente, conforme a Figura 7. O perfil não apresentou um resultado diferenciado entre os tratamentos e entres as procedências, apresentando baixa variabilidade, também estimados por Oliveira et al. (2005). Os perfis foram condizentes com a literatura (LOPES et al., 2011; GIL et al., 2018), que apresentam os mais variados padrões dentro de certos parâmetros como idade, sítio, espécie, gênero e condições edafoclimáticas (OLIVEIRA et al., 2005; LOPES et al., 2011; MODES et al., 2019). A variação longitudinal da ρ_a dos tratamentos CN e SN apresentaram a maior variabilidade com os desvios médios respectivos de 19 e 19,5 kg.m⁻³ e os tratamentos CD e SD a menor, respectivamente de 15 e 13 kg.m⁻³.

Tabela 2 - Densidade (ρ_a - kg.m⁻³) dos tratamentos (CD, CN, SD e SN) obtidas pelo método de Atenuação da Radiação Gama – TARG de árvores de *E. grandis*. Dados: densidade obtida com as regiões de 12,5 a 87,5% da altura comercial

Tratamento	Densidade (ρ_a) (kg.m ⁻³)	Amplitude
CD	^A 593±14	91
CN	^A 585±32	153
SD	^A 612±29	136
SN	^A 606±16	118
Média	599±23	

*as letras (A) em maiúsculo não apresentam resultados com diferenças significativas

1.3.4 Densidade (ρ_a) a partir dos 50% dos discos

Os discos da região 12,5% *ac* foi utilizado para correlacionar a densidade estima nos 50% ($\rho_{a50\%}$) final do disco e a ρ_{ARV} (Tabela 2), e apresentaram os valores médios respectivos de ^A600±38 e ^A599±23 kg.m⁻³, e a análise não apresentou diferenças significativas a 5% de probabilidade, portanto, não houve diferença entre as variáveis. A expectativa em determinar um ponto amostral foi concretizada (região entre 12 a 13% *ac*) e poderá ser utilizada para caracterização média da árvore. Os resultados determinados evidenciam que a coleta de uma amostra na região estimada poderá ser realizada pontualmente, sem a necessidade de uma coleta destrutiva. A coleta dos dados para caracterização da ρ_{ARV} poderá ser realizada por métodos que caracterize a análise não destrutiva, que colete o material até 50% do raio. Para obter 1/4 do disco ou 50% do raio ($R_{1/4}$), poder ser utilizada a Equação 13, cuja variável C_{RC} é o comprimento da circunferência da região de coleta da árvore.

$$R_{1/4} = \left(\frac{C_{RC}}{2\pi} \right) / 2 \quad (13)$$

Quanto à análise radial, o estudo limitou-se a 50% do raio ($\rho_{a50\%}$), mas a utilização de 1/3 do raio ou 1/6 do diâmetro apresentará as mesmas características do resultado obtidos, pois esta região apresenta quase 45% do disco, constituído com a material formado nos últimos 3 anos, que caracterizará a madeira.

As estimativas determinadas foram úteis, pois poderão ser utilizadas por outras metodologias sem a necessidade de derrubada da árvore. As metodologias não destrutivas associadas com padrão de qualidade e uma quantidade amostral representativa do povoamento, alcançarão resultados apresentando uma estimativa de densidade muito próxima da real.

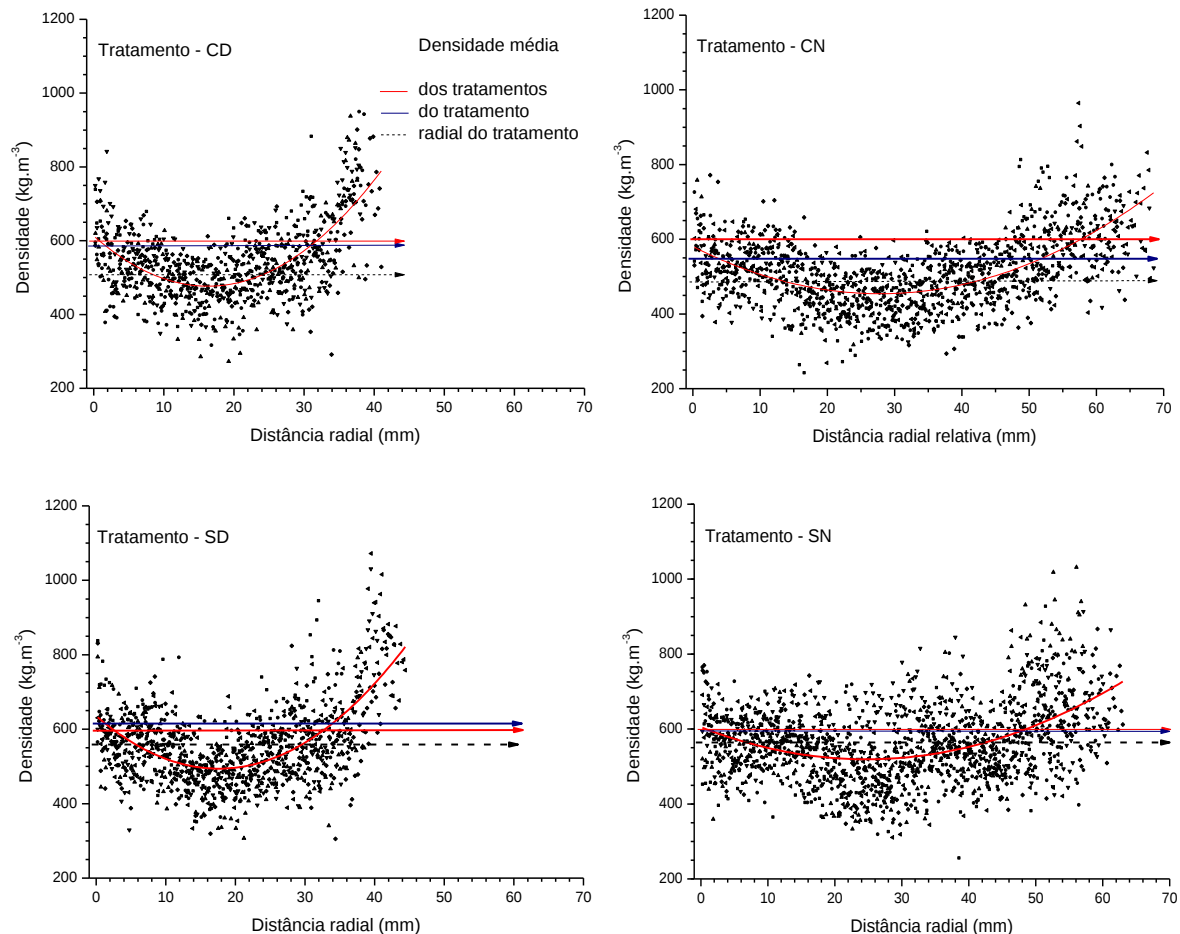
1.3.5 Variação radial e longitudinal

A análise entre as procedências e os tratamentos apresentaram perfis radiais semelhantes, porém com algumas exceções. A principal característica radial foi a variação entre os tratamentos (*D*) e (*N*), em que amostras no tratamento *D* apresentaram um perfil médio mais homogêneo, com poucas variações individuais de densidade entre os anéis de crescimento. Já o tratamento *N* apresentou maior heterogeneidade, ou seja, variações de densidade média maiores entre os anéis, conforme Figura 8 e Tabela 2.

O perfil radial da densidade aritmética (ρ_{art}) das procedências clonais (*C*) e seminais (*S*) não apresentaram diferenças e seus respectivos valores foram $^{A}560 \pm 71$ e $^{A}591 \pm 78$ kg.m⁻³. A análise realizada com o tratamento convencional (*CN* e *SN*) também não apresentaram diferenças significativa, e seus respectivos resultados foram $^{A}556 \pm 73$ e $^{A}591 \pm 81$ kg.m⁻³. Na análise ρ_{art} não foi encontrado um perfil predominante entre os tratamentos e as procedências, pois os desvios analisados foram muito próximos.

Foi utilizada a variação radial das amostras (Figura 6) para identificar o aumento da densidade radial com a variável β da reta estimada por uma regressão linear. O aumento radial da densidade, na região a 12,5% at, foi caracterizado como um aumento médio de 21% e acentuado foi 13% das amostras na direção radial, totalizando 34%, o restante 66% foi caracterizado com um perfil de aumento baixo, sem apresentar, linearmente, grandes variações. E, quanto à expectativa de haver uma variação radial diferenciada dos tratamentos foi confirmada. Analisando os resultados do β da reta, o tratamento *N* apresentou o menor resultado, enquanto que o tratamento *D* apresentou em 63% das amostras um aumento radial médio de 45% e acentuado 18%. Portanto, as variações radiais das amostras submetidas ao déficit hídrico apresentaram uma alteração no perfil radial.

Figura 8- Resultados dos perfis radiais das procedências de *E. grandis*. Dados:
Perfil radial dos discos a 12,5% da altura das 6 árvores de cada tratamento,
apresentando a densidade dos quatro tratamentos, a densidade média de cada
tratamentos e densidade média radial de cada tratamento (ρ_{part}): CD (clonal com
restrição); CN (clonal convencional); SD (seminal com restrição); SN (seminal
convencional)



Quanto às análises radial e a longitudinal, a expectativa era encontrar perfis distintos entre os tratamentos submetidos ao déficit hídrico e o convencional, devido aos efeitos complexos do déficit hídrico sobre as plantas, que não apresentam processo de ação de resistência à seca, mas o combate essa condição por meio de processos adaptativos, como a redução do potencial hídrico, combinada às adaptações morfológicas, anatômicas e fisiológicas (NOGUEIRA et al., 2005). A primeira e mais sensível resposta ao estresse hídrico é a diminuição da turgescência celular, que provoca o fechamento dos estômatos e a redução da fotossíntese (LARCHER, 2006). Apesar de todos os processos ocorrendo para adaptação da planta ao estresse, as expectativas de apresentarem perfis radial e longitudinal

diferentes do tratamento convencional não foram confirmadas, os perfis foram praticamente iguais.

1.3.6 Densidade aparente (ρ_a) e a média (ρ_m) dos disco

A ρ_a e a ρ_{art} obtidas pela densitometria radial apresentaram resultados com diferenças significativas (Figura 8) e a diferença entre as variáveis foi de 27 ± 33 kg.m^{-3} . A TARG permitiu obter a variabilidade da ρ_a no sentido radial, fornecendo múltiplas variáveis e a ρ_{art} apresentou um resultado inferior a 3%, semelhante aos resultados determinados por Castro et al., (2017), um parâmetro importante para avaliação da densidade da árvore. A variação determinada entre as variáveis foi pequena e quando submetidas ao arredondamento, quase se aproximam da diferença mínima, portanto, poderão ser utilizadas de forma segura. Para estimar a correção da densidade aparente (ρ_{ac}) utilizou-se a Equação 14.

$$\rho_{ac} = \rho_{art} \cdot 1.042 \quad (14)$$

A análise diametral evidenciou, que procedências diferentes quando submetidos ao mesmo tratamento (D e N) a produtividade apresenta um desempenho semelhante, e quando submetidos a tratamentos diferentes, ambas procedências, apresentam variações na produtividade. O processo de desenvolvimento é elucidado com a construção de modelos dos processos ecofisiológicos das árvores de *Eucalyptus*, que permitem entender a variação do crescimento e desenvolvimento do seu tronco, pela interação dos mecanismos fisiológicos e às condições climáticas. Para entender este processo é abordado na literatura a relação entre a taxa de crescimento radial das árvores de *Eucalyptus*, a disponibilidade hídrica (precipitação), o efeito do déficit hídrico na atividade cambial e a consequente diminuição da produtividade das plantações florestais (OLIVEIRA et al., 2011).

As árvores de *Eucalyptus* possuem uma plasticidade em relação à variação da temperatura (CHAVES; MAROCO; PEREIRA, 2003), mantendo a taxa de crescimento volumétrico, desde que não haja restrição dos demais fatores de crescimento, de modo geral, a água e nutrientes são os fatores mais relevantes à produção (produtividade) florestal. Ainda, em relação aos mecanismos fisiológicos das plantas,

o fechamento dos estômatos, em condição de estresse hídrico restringe a absorção de CO_2 e, conseqüentemente, o crescimento volumétrico (BLAKE; TSCHAPLINSKI, 1992; CHAVES; MAROCO; PEREIRA, 2003). As árvores de *Eucalyptus grandis* possuem mecanismos de amenização do efeito causado pelo déficit hídrico, promovendo a redução da condutância estomática (PEEVA; CORNIC, 2009) e diminuição da taxa de transpiração em relação à absorção de CO_2 , aumentando a eficiência da utilização da água (HAKAMADA et al., 2020). Quanto aos efeitos causado pelo estresse hídrico nos tratamentos convencional e com déficit hídrico de 34%, não foi o suficiente para cessar completamente aumento do incremento radial das plantas. Quanto aos tratamentos analisados o maior interesse foi em relação às análises do tratamento convencional, pois apresenta as características dos reflorestamentos comerciais.

1.4 CONCLUSÃO

A estimativa de densidade entre a Técnica de Radiação Gama - (TARG) e os métodos convencionais foram eficientes, e a TARG possibilitou a investigação da variabilidade radial de forma detalhada apresentando outras variáveis, se necessário, para a avaliação da madeira.

O déficit hídrico apresentou um papel fundamental nos processos das plantas, e foi evidenciado as alterações físicas nos tratamentos submetidos ao déficit, com um perfil radial diferenciado com um aumento de densidade.

A estimativa em utilizar apenas uma amostra da árvore para caracterizar a madeira apresentou resultado satisfatório e as variáveis, utilizadas das amostras da região a 12,5% altura comercial, resultou em um indicador para estimar a densidade média da árvore.

REFERÊNCIAS

ASSIS, T. F.; RESENDE, M. D. V. Genetic improvement of forest tree species. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Pelotas, v. 11, n. spe, p. 44-49, 2011.

BATISTA, D. C.; KLITZKE, R. J.; SANTOS, C. V. T. Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 4, p. 665–674, 2010.

BLAKE, T. J.; TSCHAPLINSKI, T. J. Water relations. *In*: MITCHELL, P. C.; SENNERBY-FORSSE, L.; HINCKLEY, T. M. (ed.). **Ecophysiology of short rotation forest crops**. Amsterdam: Springer, 1992. p. 66-94.

BRUDER, E. M. **Densidade básica e aparente da madeira**: método para qualificação. Brasil: Novas Edições Acadêmicas, 2018. 100 p.

BRUDER, E. M. **Métodos de determinação da densidade básica e aparente da madeira de *Eucalyptus* sp.** 2012. 99 f. Dissertação (Mestrado Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2012.

BRUDER, E. M.; REZENDE, M. A.; COSTA, V. E. Densidade de *Eucalyptus* sp. Próxima a umidade de equilíbrio estimado pelo método de imersão. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 31, n. 1, p. 38, 2016.

CADEMARTORI, P. H. G. *et al.* Uso de herbicida na redução das tensões de crescimento na madeira serrada de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 3, p. 801–808, 2015.

CASTRO, V. R. *et al.* Efeito da aplicação do potássio, do sódio e da disponibilidade hídrica na densidade aparente a 12% de umidade do lenho juvenil de árvores de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 3, p. 1017, 2017.

CHAVES, M. M.; MAROCO, J. P.; PEREIRA, J. S. Understanding plant responses to drought - From genes to the whole plant. **Functional Plant Biology**, Victoria, v. 30, n. 3, p. 239–264, 2003.

CHERUBINI, P. *et al.* Olive tree-ring problematic dating: a comparative analysis on Santorini (Greece). **Plos One**, Berkeley, v. 8, n. 1, p. 1-5, 2013.

COSTA, V. E. **Caracterização físico-energética da madeira e produtividade de reflorestamentos de clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*.**

2006. 99 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.

COSTA, V. E.; DE REZENDE, M. A.; RODRIGUES, V. A. Conversion between basic density and apparent density at any moisture content in *Eucalyptus grandis*. **Holzforschung**, Berlin, v. 68, n. 8, p. 981–986, 2014.

DREW, D. M.; DOWNES, G. M.; EVANS, R. Short-term growth responses and associated wood density fluctuations in variously irrigated *Eucalyptus globulus*. **Trees - Structure and Function**, Berlin, v. 25, n. 2, p. 153–161, 2011.

FERNANDES, D. E. *et al.* Influência da produtividade de clones híbridos de eucalipto na densidade da madeira e na polpação Kraft. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 143-150, 2011.

GIL, J. L. R. A. *et al.* Características físicas e anatômicas da madeira de *Tectona grandis* L.f. aos 7 anos de idade. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 41, n. 2, p. 529–538, 2018.

GONÇALEZ, J. C. *et al.* Relações entre dimensões de fibras e de densidade da madeira ao longo do tronco de *Eucalyptus urograndis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 101, p. 81–89, 2014.

GONÇALVES, F. G. *et al.* Densitometria de raios x na avaliação da densidade em painéis de partículas. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 3, p. 1151, 2018.

GONÇALVES, F. G. *et al.* Parâmetros dendrométricos e correlações com propriedades tecnológicas em um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 947–959, 2010.

GUERRA, S. P. S.; EUFRATE JUNIOR, H. J. **Recuperação energética da biomassa de tocos e raízes de florestas plantadas**. Botucatu: FEPAF, 2019. 176 p.

HAKAMADA, R. E. *et al.* Influence of stand density on growth and water use efficiency in *Eucalyptus* clones. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 466, p. 118-125, 2020.

HSING, T. Y. *et al.* Características dendrométricas, químicas e densidade básica da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 1, p. 273-283, 2016.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Dados do Relatório Ibá 2018**. Brasília: IBA, 2018. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/digital-sumarioexecutivo-2018.pdf>. Acesso em: 12 maio 2019.

JALEEL, C. A. *et al.* Alterations in morphological parameters and photosynthetic pigment responses of *Catharanthus roseus* under soil water deficits. **Colloids and Surfaces. B, Biointerfaces**, Amsterdam, v. 61, n. 2, p. 298–303, 2008.

JAMMAL FILHO, F. A. **Determinação da densidade da madeira de clones de *Eucalyptus* spp. a idades passadas com uso da técnica de atenuação de radiação gama**. 2011. 81 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2011.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes, 1928.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. Tradução: Carlos Henrique Britto de Assis Prado. São Carlos: Rima, 2006. 531 p.

LIMA, I. L.; GARCIA J. N. Variação da densidade aparente e resistência à compressão paralela às fibras em função da intensidade de desbaste, adubação e posição radial em *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 551-559, 2010.

LOPES, C. S. D. *et al.* Estudo da massa específica básica e da variação dimensional da madeira de três espécies de eucalipto para a indústria moveleira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 315-322, 2011.

MACHADO, J. S. *et al.* Variation of wood density and mechanical properties of blackwood (*Acacia melanoxylon* R. Br.). **Materials & Design**, Surrey, v. 56, p. 975–980, 2014.

MODES, K. S. *et al.* Wood quality of *Pinus patula* Schltdl & Cham for the pulp production. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 43, n. 2, p. e430207, 2019.

MOULIN, J. C. *et al.* Efeito do espaçamento, idade e irrigação no volume e densidade básica do eucalipto. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 24, p. 1-10, 2017.

NOGUEIRA, R. J. M. C. *et al.* Aspectos ecofisiológicos da tolerância à seca em plantas da caatinga. In: NOGUEIRA, R. J. M. C. *et al.* (ed.). **Estresses ambientais: danos e benefícios em plantas**. Recife: UFRPE, 2005. p. 22-31.

OLIVEIRA, B. R. U. *et al.* Correlações dendroclimatológicas do *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden na região de Rio Claro, RJ. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 499-508, 2011.

OLIVEIRA, F. G. R. *et al.* Influência da seção transversal na velocidade ultra-sônica na madeira de *Eucalyptus citriodora*. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 197-203, 2005.

OLIVEIRA, J. G. L. *et al.* Parâmetros quantitativos da anatomia da madeira de Eucálpto que cresceu em diferentes locais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 559–567, 2012.

PEAK, D. *et al.* Evidence for complex, collective dynamics and emergent, distributed computation in plants. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 101, n. 4, p. 918–922, 2004.

PEEVA, V.; CORNIC, G. Leaf photosynthesis of *Haberlea rhodopensis* before and during drought. **Environmental and Experimental Botany**, Elmsford, v. 65, n. 2–3, p. 310–318, 2009.

PEREIRA, B. L. C. *et al.* Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 545-557, 2016.

PITA, P. *et al.* Use of physiological traits in tree breeding for improved yield in drought-prone environments. The case of *Eucalyptus globulus*. **Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales**, Madrid, v. 14, n. 3, p. 383, 2005.

REZENDE, M. A. **Uma abordagem não convencional sobre as principais características físicas da madeira, com ênfase para retratibilidade, massa específica e técnica de atenuação da radiação gama**. 1997. 138 f. Tese (Livre-Docência) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1997.

SANTANA, R. C. *et al.* Estimativa de biomassa de plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 697–706, 2008.

SCHAFER, C. *et al.* Daily stem water deficit of Norway spruce and European beech in intra- and interspecific neighborhood under heavy drought. **Scandinavian Journal of Forest Research**, Stockholm, v. 33, n. 6, p. 568-582, 2018.

SCHIFMAN, L. A. *et al.* Carbon isotope variation in shrub willow (*Salix* spp.) ring-wood as an indicator of long-term water status, growth and survival. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 36, p. 316–326, 2012.

SETTE JUNIOR, C. R. *et al.* Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1183–1190, 2012.

SETTE JUNIOR, C. R. *et al.* Relationship between climate variables, trunk growth rate and wood density of *Eucalyptus grandis* W. Mill ex Maiden trees. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 40, n. 2, p. 337–346, 2016.

SOARES, A. K. *et al.* Composição química e estabilidade dimensional da madeira de três eucaliptos. **Matéria (Rio J.)**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, p. e12226, 2018.

SURDI, P. G. *et al.* Perfil de densidade do lenho utilizando métodos radiográficos. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, p. 229-236, 2014.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. 2. ed. Massachusetts: Publishers Sunderland, Sinauer Associates, Inc. 1998. 792 p.

TATAGIBA, S. D.; PEZZOPANE, J. E. M.; REIS, E. F. Relações hídricas e trocas gasosas na seleção precoce de clones de eucalipto para ambientes com diferenciada disponibilidade de água no solo. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 2, p. 387-400, 2008.

VIDAL, J. M. *et al.* Preservação de madeiras no Brasil: histórico, cenário atual e tendências. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 257–271, 2015.

VIDAURRE, G. *et al.* Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 18, n. 4, p. 469–480, 2011.

WASSENBERG, M. *et al.* Analysis of wood density profiles of tree stems: incorporating vertical variations to optimize wood sampling strategies for density and biomass estimations. **Trees**, Santa Monica, v. 29, n. 2, p. 551–561, 2015.

WIEMANN, M. C.; WILLIAMSON, G. B. Testing a novel method to approximate wood specific gravity of trees. **Forest Science**, Bethesda, v. 58, n. 6, p. 577–591, 2012.

CAPÍTULO 2 - VARIAÇÃO ISOTÓPICA EM FUNÇÃO DA DENSIDADE DA MADEIRA DE *Eucalyptus grandis* SUBMETIDA AO DÉFICIT HÍDRICO

RESUMO

A densidade da madeira (ρ) é um dos principais indicadores de qualidade, e os valores isotópicos do carbono ($\delta^{13}\text{C}$) na madeira, indicam respostas fisiológicas ao déficit hídrico. O objetivo do estudo foi determinar os ρ e $\delta^{13}\text{C}$ da madeira de *Eucalyptus grandis* de procedência seminal (S) e clonal (C) na direção radial e longitudinal a fim de estabelecer correlações. O estudo avaliou e correlacionou ρ e a $\delta^{13}\text{C}$ na madeira de árvores de reflorestamentos comerciais de *E. grandis* de procedência S e C, submetidos a um tratamento convencional (N) e com déficit hídrico (D) com um terço de restrição de água de precipitação. Em cada um dos tratamentos SD, SN, CD e CN foram amostrados seis árvores e quatro discos por árvore, totalizando 96 discos. O Método de Atenuação da Radiação Gama do ^{241}Am foi utilizado para determinação da ρ pontual na direção radial dos discos, onde também, foram amostradas alíquotas de madeira para determinação da $\delta^{13}\text{C}$ utilizando um sistema de fluxo contínuo de espectrometria de massa de razão isotópica. Os valores pontuais da ρ e $\delta^{13}\text{C}$ na direção radial foram utilizados para o cálculo da média ponderada nos discos, nas árvores e nos tratamentos. As correlações entre a $\delta^{13}\text{C}$ e a ρ apresentaram coeficiente de determinação de 0,86, a estimativa evidencia o aumento da $\delta^{13}\text{C}$ em função da ρ . O déficit hídrico não afetou a densidade, mas diminuiu o incremento de volume e consequentemente a produtividade. Os tratamentos CD e SD apresentaram volume inferior à 50% em relação ao tratamento CN e SN. As procedências C e S apresentaram um perfil radial diferenciado e o regime com déficit hídrico afetou a densidade, apresentando um aumento no perfil radial para ambas procedências, não de forma significativa. A ρ média entre os SD e SN, e entre CD e CN, não apresentaram diferenças significativas. A ρ e $\delta^{13}\text{C}$ na direção radial dos discos apresentaram uma relação inversamente, enquanto os valores médios apresentaram uma relação direta. A análise isotópica do um terço final dos discos possibilitou a caracterização das amostras isotopicamente.

Palavra-chave: Floresta. Gravidade específica. Densidade ponderada.

ABSTRACT

The density of the wood (ρ) is one of the main quality indicators, and that the isotopic values of carbon ($\delta^{13}\text{C}$) in the wood, indicate physiological responses to hydric deficit. The objective of the study was to determine the ρ and $\delta^{13}\text{C}$ of *Eucalyptus grandis* wood from seminal (S) and clonal (C) origin in the radial and longitudinal direction in order to establish correlations. The study evaluated and correlated ρ and $\delta^{13}\text{C}$ in the wood of commercial reforestation trees of the *E. grandis* of S and C, submitted to a conventional treatment (N) and with hydric deficit of 33% (D). In each of the SD, SN, CD and CN treatments, six trees and four discs per tree were sampled, totalizing 96 discs. The Gamma Radiation Attenuation Method ^{241}Am was used to determine the point ρ in the radial direction of the discs, where wooden aliquots were also sampled to determine the $\delta^{13}\text{C}$ using a continuous flow system using isotopic ratio mass spectrometry. The point values of ρ and $\delta^{13}\text{C}$ in the radial direction were used to calculate the weighted average in the disks, trees and treatments. The correlations between $\delta^{13}\text{C}$ and ρ presented a coefficient of determination of 0.86, the estimate shows an increase in $\delta^{13}\text{C}$ as a function of ρ . The hydric deficit does not affect the density, but decreases the volume increase and consequently the productivity. The treatments CD and SD showed an increase in volume 50% less in relation to the CN and SN treatment. The C and S trees showed a different radial profile and the hydric deficit regime affected the density, presenting an increase in the radial profile for both sources, not significantly. The mean ρ between SD and SN, and between CD and CN, did not show significant differences. The ρ and $\delta^{13}\text{C}$ in the radial direction of the disks showed an inverse relationship, while the mean values showed a direct relationship. The isotopic analysis of the final third of the discs made it possible to characterize the sample isotopically.

Keywords: Forestry. Specific gravity. Weighted density.

2.1 INTRODUÇÃO

O gênero *Eucalyptus* é a principal fonte de matéria-prima para vários setores, devido a versatilidade (BATISTA; KLITZKE; SANTOS, 2010), o rápido crescimento e adaptação às diversas condições ambientais encontradas no Brasil (VALE et al., 2002; CADEMARTORI et al., 2015). A madeira serrada para abastecer o mercado madeireiro é basicamente do gênero *Pinus*. Com a diminuição dos estoques florestais houve interesse por espécies alternativas de rápido crescimento (DEL MENEZZI et al., 1998; RIBEIRO; MORI; MENDES, 2010), no entanto, há poucas opções de madeira no mercado, mas com potencial (CARVALHO, 1994), e necessitam ser avaliadas (GUERRA; EUFRATE JUNIOR, 2019).

A madeira é um material complexo e sua caracterização é relativamente difícil, devido à sua composição química e anatômica. Torna-se importante compreender suas propriedades e correlacioná-las com os fatores ambientais (GONÇALEZ, 2014). Para a qualificação da matéria-prima são descritas várias metodologias, que utilizam desde métodos tradicionais aos mais tecnológicos e a comparação destes dados é a busca constante para facilitar as avaliações. A análise dos isótopos estáveis (A/E) se apresenta como características à praticidade e rapidez, que determina seu potencial para utilização. A A/E foi utilizada como uma ferramenta para a compreensão de cadeias alimentares e fluxos de nutrientes nos sistemas de produção animal (LIMA, 2018), e também é utilizada como uma ferramenta nas análises qualitativas e quantitativas (BRASIL, 2007; BAHAR et al., 2008).

A A/E está difundida mundialmente, pois a ocorrência é natural dos isótopos, (DUCATTI, 2007) e estabelecida nas diversas áreas do conhecimento. As análises dos bioelementos – Carbono (C), Hidrogênio (H), Oxigênio (O) e Nitrogênio (N) são aplicadas de forma crescente em pesquisas agropecuárias (LIMA, 2018) e com aplicações comerciais a mais de uma década. Os isótopos de carbono foram responsáveis pela compreensão sobre a discriminação de carbono durante a fotossíntese (FARQUHAR et al, 1982; GILLON; GRIFFITHS, 1997; SEIBT et al., 2008; DUCATTI et al., 2011) e na composição dos isótopos de oxigênio e sua conversão em biomassa (CUNTZ et al., 2003; FARQUHAR; CERNUSAK, 2005; BARBOUR, 2007; GESSLER, 2007; GESSLER, 2014). As análises com os bioelementos estão presentes em áreas como: alimentar (LIMA, 2018), em estudos ambientais e nas reconstruções climáticas (MCCARROLL; LOADER, 2004; WEIGT et al., 2015), e na

resposta das árvores às mudanças climáticas (SAURER; SIEGWOLF; SCHWEINGRUBER, 2004; BATTIPAGLIA et al., 2013), e apresenta muita aplicação com madeira (PFLUG, 2015) como o rastreio de produtos (LIMA, 2018) e a substituição da medição da largura dos anéis de crescimento dos discos de madeira (KAGAWA; LEAVITT, 2010; KAGAWA; NAKATUKA, 2014).

Quanto às variações climáticas, é necessário compreender as reações das árvores ao estímulo às mudanças de temperatura e ao regime hídrico. É importante avaliar o gênero *Eucalyptus* devido à sua importância comercial, compreender a influência do déficit hídrico e nutricional para seu desenvolvimento e a ainda avaliar espécies resistente à seca. Portanto, é necessário a compreensão do comportamento das procedências do gênero em ambientes mais severos, pois o déficit hídrico altera o padrão fisiológico da planta promovendo a redução do conteúdo de água, a diminuição do potencial hídrico, o fechamento de estômatos, reduzindo a assimilação de carbono, a expansão celular e o crescimento (KERBAUY, 2004; JALEEL et al., 2008).

A madeira possui grande quantidade de carbono e seu valor isotópico pode representar um indicador de qualidade, que é obtida na maioria das vezes pela densidade. Há escassez de estudos que envolvam a densidade (ρ) e a razão isotópica ($\delta^{13}C$), com a função de utilizar a A/E também como um método analítico para a qualificação. Assim, o estudo testou as hipóteses de que os valores ($\delta^{13}C$) possam apresentar relações com a densidade, e que o déficit hídrico e a espécie apresentam influência nos valores da ρ e $\delta^{13}C$.

Buscando obter um método eficiente para determinar da densidade, o trabalho teve como objetivo correlacionar a $\delta^{13}C$ e a ρ utilizando as variáveis obtidas radial e longitudinalmente dos discos de madeira da espécie *Eucalyptus grandis*.

2.2 MATERIAL E MÉTODO

2.2.1 Amostragem e análise

O experimento foi instalado na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga – SP. O clima da região é caracterizado como mesotérmico úmido (Cwa), segundo Koppen, com precipitação e temperatura média anual respectivamente de

1635 mm e 16,2°C nos meses mais frios e 28,6°C nos meses mais quente. O solo foi caracterizado como latossolo vermelho amarelo distrófico, com a litologia composta por arenito, de textura média. O plantio foi realizado em maio de 2010 utilizando espécimes de *E. grandis* de procedência clonal e seminal da empresa Suzano Bahia Sul, com espaçamento de 3 x 2 m e fertilização básica inicial de 2000 kg de calcário dolomítico/ha. Foram plantadas 684 árvores divididas em 3 blocos de 228 árvores e cada bloco foi dividido em 6 parcelas, sendo metade com um potencial de restrição de 33% de precipitação (exclusão artificial realizada com a utilização de cobertura do solo de 1700 m² de lonas de polietileno transparente). As 18 parcelas, de 38 árvores, cada alternavam entre os quatro tratamentos: *CD* (clonal com déficit); *CN* (clonal convencional); *SD* (seminal com déficit); *SN* (seminal convencional). De cada tratamento foram selecionadas 6 árvores representativas, com 6 anos de idade e retiradas do centro de cada parcela, conforme Figura 1.

Para avaliar a densidade na direção axial das árvores foram amostrados quatro discos (a, b, c e d) localizados no centro de cada $\frac{1}{4}$ da altura total (*at*), nos percentuais de 12,5%, 37,5%, 62,5% e 87,5% respectivamente, e espessura uniforme entre 1,0 e 2,0 cm, conforme Figura 1. As amostras de discos foram submetidas ao processo secagem natural por mais de 60 dias até adquirirem massa constante. O volume dos disco, sem casca foi obtido por meio da força de empuxo utilizando o Método de Imersão – *MI*, a partir da imersão em recipiente com água sob balança, a fim de obter a densidade na umidade de equilíbrio, conforme Figuras 3 e 4. A densidade aparente (ρ_a) na umidade de equilíbrio foi obtida pela divisão da massa sobre o volume (BRUDER; REZENDE; COSTA, 2016; BRUDER, 2018) que utilizou o método com os instrumentos balança e paquímetro (MPB); e a área da face dos discos por meio da divisão do volume pela espessura.

Figura 1 - Discos serrados e com espessura uniforme de *Eucalyptus grandis*. Dados: amostras clonais de 12,5 a 87,5% da altura comercial; Figura (A) – Amostras obtidas no tratamento convencional; Figura (B) - Amostras obtidas no tratamento com déficit hídrico



Para avaliar a densidade na direção radial das árvores foram determinadas as densidades pontuais ao longo do raio dos discos (três ponto por milímetro) do centro para a periferia, conforme Figura 2. Cada valor pontual da densidade foi obtido pela Técnica de Atenuação da Radiação Gama (TARG - Figura 4), com um feixe colimado (0,5 x 6,0 mm) de 59,6 keV de energia que atravessa o disco na direção axial. Os discos foram acomodados em um sistema com movimentação automática da amostra em 3,0 mm.min⁻¹, uma fonte fixa e blindada de radiação gama com o radioisótopo ²⁴¹Am (atividade de 200 mCi) e um detector fotomultiplicador de cintilação sólida de NaI(Tl) (Ortec) a 10 cm da fonte. A intensidade atenuada da radiação gama (*I*) detectada, em cpm (contagens por minuto), obtido a cada 20 segundos, foi realizada a amplificação do sinal analógico detectado e foi utilizada uma placa de conversão para sinal digital acoplada a um computador. A intensidade inicial da radiação gama (*I*₀), em cpm, detectada no sistema sem a amostra e a densidade pontual (ρ_i), em g.cm⁻³, dos enésimos pontos (*i*) foi determinada pela Equação 1.

$$\rho_i = \frac{\ln I_0 - \ln I}{\mu_m x} \quad (1)$$

Onde μ_m , em $\text{cm}^2.\text{g}^{-1}$, é o coeficiente de atenuação de massa e x , em cm, é a espessura do disco e i é a n ésima densidade pontual com n pontos. O valor de μ_m foi ajustado experimentalmente a partir da densidade média do disco (MALAN, 1992). Após a análise da densidade pela TARG os discos foram submetidos a secagem forçada em estufa a 105°C para obter as massas secas e o percentual de umidade.

Figura 2 - Gráfico da variação radial do disco a 12,5% da altura comercial das árvores de *Eucalyptus grandis* obtidas pela Técnica de atenuação da radiação gama – TARG. Dados: Variação da densidade pontual relativa e da densidade ponderada, a 12% de umidade; proporção dos 50% dos discos e a divisão em terços para análise radial das amostras de procedência clonal (C) e seminal (S)

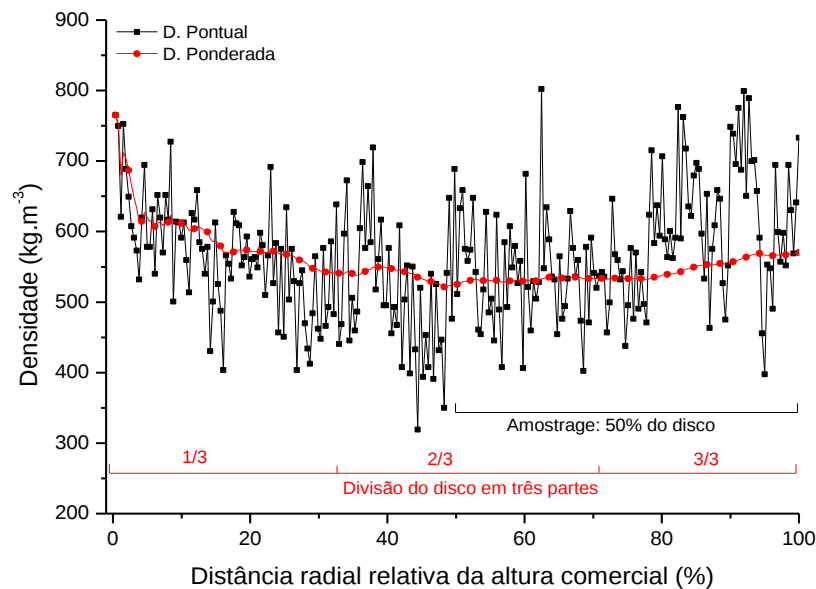
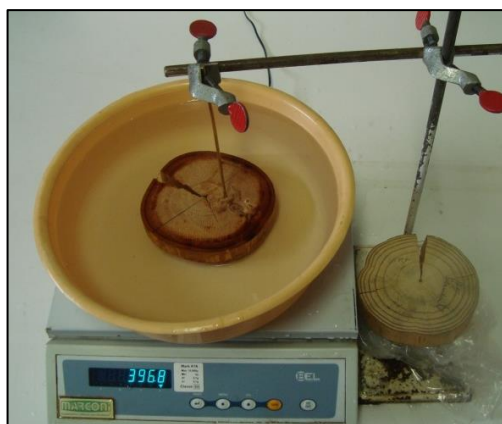


Figura 3 - Ilustração para determinar o volume das amostras (12% de umidade) pelo método por imersão em água para amostras com densidade do fluido maior que o densidade do corpo



(A)



(B)

Fonte: Adaptado de Bruder, E. M. (2012)

**Figura 4 - Imagens do Sistema de Atenuação da Radiação Gama de ^{241}Am :
Figura 4A – Imagem frontal - perfil do sistema apresentando o compartimento em que a fonte de ^{241}Am é confinada, a foto multiplicadora e a amostras:
Figura 4B – GDM Amplificado de sinal responsável pela conversão do sinal captado para o computador (interface gráfica)**

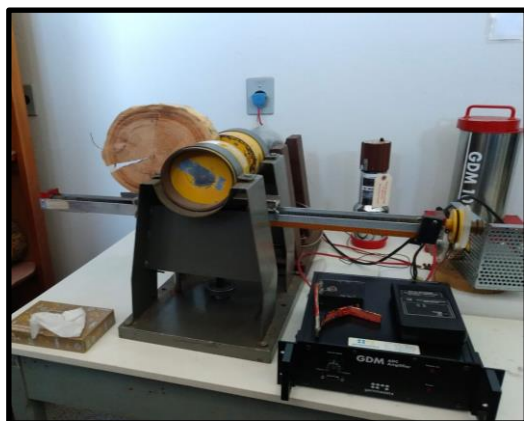


Figura: 4 – A



Figura: 4 – B

2.2.2 Análise de isótopos estáveis (AIE)

As AIE ($\delta^{13}\text{C}$) foram realizadas com a madeira coletada de forma ponderada e pontual. A ponderação foi realizada para obter um material homogêneo e que caracterizasse o $\delta^{13}\text{C}$ médio dos discos e a amostragem pontual foi realizada em regiões pré-determinadas, em terços ($3/3 = a_1$; $2/3 = a_2$ e $1/3 = a_3$), de cada disco da região a 12,5% da altura comercial, conforme Figura 1.

As amostras coletadas foram trituradas para obter um pó extrafino utilizando um moinho criogênico e colocadas 50 µg em capsulas de estanho para determinação do $\delta^{13}\text{C}$. As cápsulas foram introduzidas por um amostrador automático no analisador elementar (*Flash HT 2000*, Thermo Scientific, Alemanha) acoplado por sistema de fluxo contínuo a um espectrômetro de massa de razões isotópicas (*Delta V Advantage Isotope Ratio MS*, Thermo Scientific, Alemanha). Os resultados foram expressos em notação delta (δ), em relação ao padrão internacional *Vienna-Pee Dee Belemnite* (PDB) para $\delta^{13}\text{C}$, calculado pela Equação 2, em que: δ é o enriquecimento relativo da amostra em relação ao padrão (Adimensional) e R é a razão isotópica da amostra e do padrão (Adimensional).

$$\delta^{13}\text{C} = \left[\frac{R_{\text{amostra}} - R_{\text{padrão}}}{R_{\text{padrão}}} \right] \quad (2)$$

2.2.3 Análise dos dados

O software utilizado para obtenção dos gráficos e ajuste das equações foi o *MICROCAL SOFTWARE, INC. Data analysis and technical graphics software. Origin Professional Version 6.0*, com uma atualização para a versão *Origin Professional Version 7.0*. A análise estatística foi realizada para investigar as influências das variáveis determinadas na madeira bem como suas interações. Neste processo investigativo promoveu-se a análise de variância, além de testes de comparação de médias (*Tukey*), ao nível de 5% de probabilidade. As análises de variância foram realizadas após a confirmação da normalidade, variância constante (homocedasticidade) dos dados. Foram realizadas correlações e regressões com o intuito de estimar a relação entre as variáveis estudadas.

Antes de realizar as análises estatísticas, foram formuladas hipóteses gerais para os efeitos das diferentes variáveis em função da variação da densidade. As conjecturas esperadas foram que: (1) as procedências (C e S) e os tratamentos (D e N) apresentassem densidade (ρ_a) e valor isotópico ($\delta^{13}\text{C}$) diferentes; (2) variações entre a parte inferior (12,5%) e superior (87,5% da *at*) e um perfil longitudinal e radial diferenciado da árvore; (3) uma relação entre a ρ_a e a $\delta^{13}\text{C}$; (4) os discos das regiões (12,5%; 37,5% e 62,5% da *ac*) ou uma fração dos discos (50% ou 1/3) podem ser utilizados na caracterização da densidade média.

As conjecturas foram estabelecidas, devido as plantas submetidas à um estresse hídrico para se adaptarem, necessitam modificar seus processos fisiológicos (MENDES et al., 2013), alterando o padrão fisiológico, promovendo a redução do conteúdo de água, do potencial hídrico, o fechamento de estômatos e a redução da expansão celular e do crescimento (JALEEL et al., 2008; CASTRO et al., 2017). As árvores são afetadas pelas variações climáticas e os anéis de crescimento anuais do lenho é o resultado da variação da atividade cambial, afetada pelo déficit de água e a temperatura ao longo das estações do ano (KERBAUY, 2004). Quanto às conjecturas sobre a existência de uma relação da densidade com a razão isotópica, foi devido aos processos fisiológicos e morfológicos envolvidos com o estresse hídrico com relação à assimilação de CO_2 (FERNANDES; CAIRO; NOVAES, 2015) e o aumento da densidade (CASTRO et al., 2017).

Para analisar os métodos da *TARG*, de Imersão em água (*MI*) e a *AIE* e suas variáveis foi realizada a análise de variância (ANOVA) para determinar a eficiência dos métodos para garantir a assertividade dos resultados. As variáveis: densidade pontual (ρ_l), densidade obtida com o percentual de 50% do disco ($\rho_{1/2}$), primeiro terço do disco - medula ($\rho_{1/3}$), segundo terço dos discos – centro ($\rho_{2/3}$), terço final – próximo a periferia ($\rho_{3/3}$), densidade aparente ou ponderada (ρ_a), densidade média aritmética (ρ_m), razão isotópica com percentual estimado de 50% dos discos ($\delta^{13}C_{50\%}$) e razão isotópica ponderada dos discos ($\delta^{13}C_{pond}$), a razão isotópica ($\delta^{13}C$) dos discos foi obtida utilizando 1/8 dos discos para correlacionar com a ρ_a das árvores na tentativa de obter uma amostra parcial que caracterize a árvore.

Para analisar o perfil radial da densidade dos discos (*TARG*) foi inserida uma regressão polinomial de 2º grau ($y = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2x^2$) e a de 3º grau ($y = \beta_0 + \beta_1x + \beta_2x^2 + \beta_3x^3$) na análise do perfil radial da razão isotópica. Ambas as regressões foram realizadas para verificar visualmente a tendência de aumento do perfil radial das amostras na região inferior. A regressão escolhida foi a que se ajustou melhor ao perfil radial médio. Foram realizadas regressões lineares ($y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x$) para a correlação entre a densidade e razão isotópica para obtenção do coeficiente de determinação e a tendência de ambas variáveis.

Para analisar o perfil radial isotópico foram realizadas perfurações a cada 5 milímetros, na direção radial, utilizando um equipamento de baixa rotação para coletar amostras pontuais. Nas perfurações foi utilizada uma broca comercial específica para

madeira. Foi coletada a localização das perfurações no perfil radial e convertidas em raio para ajustar ao perfil de densidade das amostras.

A análise de correlação utilizando o Coeficiente de Correlação de Pearson permite identificar, através de métodos matemáticos, qual o grau de influência ou de similaridade no comportamento entre duas variáveis. O coeficiente varia entre $-1 \leq r \leq +1$. Nesse intervalo, a correlação varia de sentido negativo para positivo, e de força, sendo fraca quando se aproxima de zero (à esquerda ou à direita), e moderada ou forte aproximando-se de -1 ou +1.

2.3 RESULTADOS

2.3.1 Densidade entre os tratamentos

Quanto aos métodos *MI* e *TARG* utilizados para determinar a ρ_a ou a ponderada não apresentaram diferenças significativas a 5% de probabilidade, e os respectivos métodos apresentaram os valores de 603 ± 25 e 599 ± 33 kg.m⁻³. A variação de densidade entre os tratamentos e as procedências não apresentaram diferenças significativas a 5% de probabilidade (Figura 5). O tratamento *CN* e *SN* apresentaram as ρ_a respectivamente de $^{A}585 \pm 40$ e $^{A}606 \pm 20$ kg.m⁻³ e o tratamentos *CD* e *SD* os valores de $^{A}593 \pm 19$ e $^{A}613 \pm 41$ kg.m⁻³.

Quanto às variações entre os tratamentos, as árvores de *Eucalyptus grandis* submetidas ao déficit hídrico (*CD* e *SD*), as análises envolvendo as áreas da região inferior a 12,5% da *ac*, apresentaram dimensões com diferenças significativas, com média inferior a 50%. Os mesmos resultados foram evidentes quando analisados os resultados envolvendo as amostras de 12,5 a 87,5% da *at*, conforme Figura 6.

Figura 5 - Análise das árvores de *Eucalyptus grandis* submetidas ao tratamento convencional e com déficit hídrico. Dados: tratamento convencional de procedência clonal com déficit hídrico (CD); clonal convencional (CN), seminal com déficit hídrico (SD) e o seminal convencional (SN), submetidas aos métodos de imersão (MI) e a Técnica de Atenuação da Radiação Gama (TARG). Letras minúsculas (a) iguais na linha não se diferem pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$)

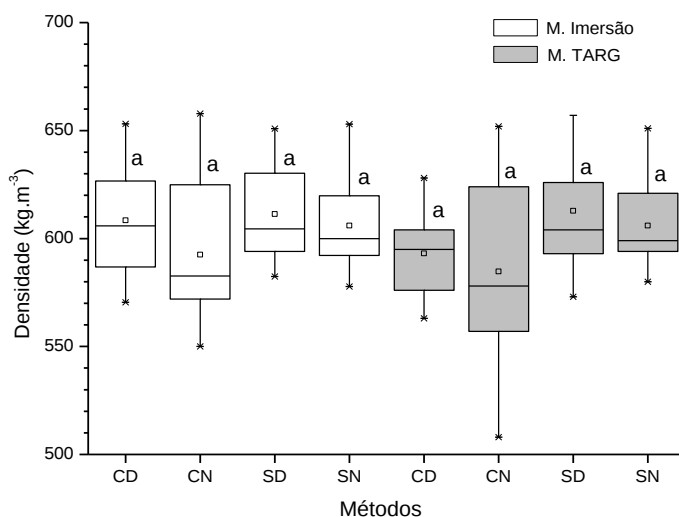
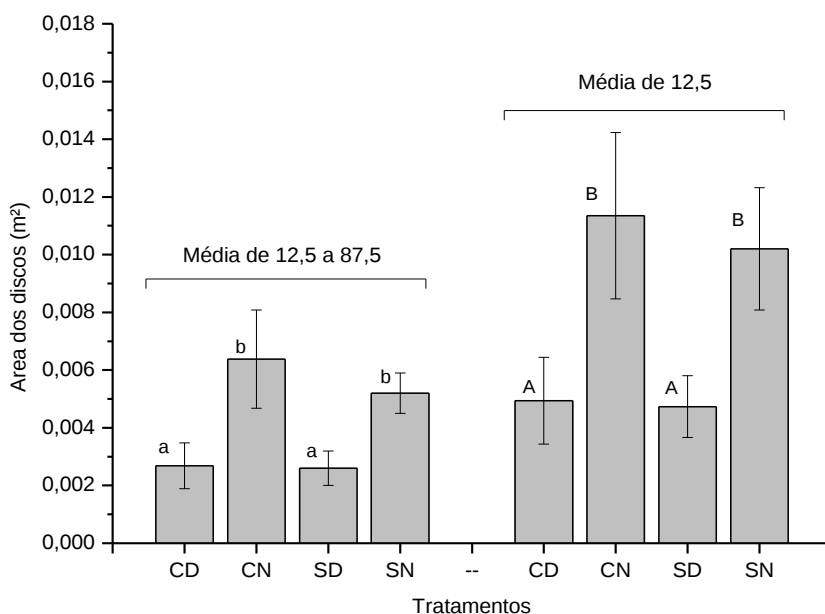


Figura 6 - Representa a variação média diametral dos discos (m^2) e os valores dos tratamentos com déficit hídrico (CD e SD) são relativos ao tratamento convencional (CN e SN). Dados: as letras em minúsculo foram para as análises realizadas para as amostras de 12,5 a 87,5% da altura comercial; e as letras maiúsculas foram utilizadas para as análises realizadas para as amostras a 12,5% da altura comercial. Letras minúsculas (a e b) e minúsculas (A e B) iguais não se diferem pela análise das médias pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$)



A variação da AIE da $\delta^{13}\text{C}$ realizadas entre os tratamentos (D e N) entre a região inferior e superior apresentaram diferenças significativas a 5% de probabilidade e apresentaram a variação média de aproximadamente 0,5‰, conforme Tabela 1. As amostras da região inferior, entre as procedências e os tratamentos, apresentaram diferenças significativas a 5% de probabilidade. As mesmas análises foram realizadas para as amostras da região superior e a diferença foi apenas entre os tratamentos. Os tratamentos (CN, SN) e (CD, SD) da região inferior, apresentaram valores médios respectivamente de -28,6 e -28,6‰, e as amostras da região superior os valores de -28,5 e -27,8‰.

O $\delta^{13}\text{C}$ das regiões apresentaram isótopos diferentes, a variação de forma pontual (mínimo e máximo) entre os tratamentos foi de aproximadamente -1,4‰. As variações entre os tratamentos das regiões inferior e superior não caracterizaram de forma clara a diferença $\delta^{13}\text{C}$ devido à alta variabilidade.

Tabela 1 - Variação da razão isotópica média ($\delta^{13}\text{C}$) e desvios dos tratamentos de *Eucalyptus grandis* das regiões inferiores e superiores. Dados: CD e SD amostras submetidas ao regime de déficit hídrico; as amostras CN e SN submetidas ao tratamento convencional

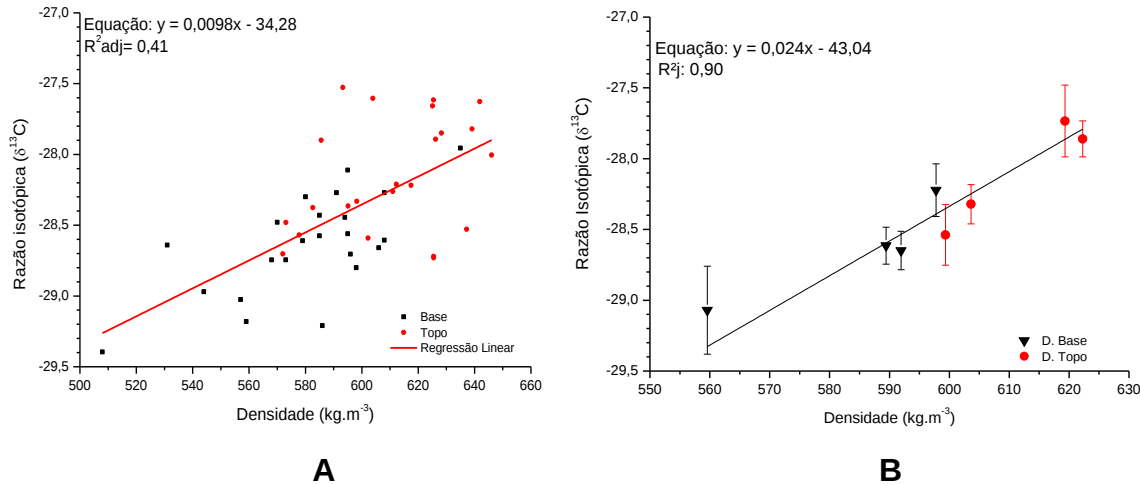
Tratamento	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)		Densidade (kg.m ⁻³)	
	Inferior	Superior	Inferior	Superior
CN	-29,1±0,3 ^{dA}	-28,5±0,2 ^{bA}	560±11	603±26
SN	-28,2±0,2 ^{cA}	-28,3±0,1 ^{bB}	598±18	604±20
CD	-28,6±0,2 ^{aA}	-27,9±0,1 ^{aB}	592±14	622±22
SD	-28,6±0,1 ^{aA}	-27,7±0,2 ^{aB}	589±07	619±19
Média	-28,6±0,2 ^A	-28,146±0,2 ^B	585±12	612±22

Dados: Letras minúsculas iguais na coluna não se diferem e letra maiúsculas iguais na linha não se diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$)

2.3.2 Relação entre densidade (ρ_a) e razão isotópica ($\delta^{13}\text{C}$)

A variação dos $\delta^{13}\text{C}$ em função da ρ_a do disco das procedências e dos tratamentos, da região inferior e superior, evidenciou a variação e a discriminação dos isótopos de carbono em função da altura, ou do material recentemente formado, conforme Figura 7A e B.

Figura 7 - Análise da Razão Isotópica ($\delta^{13}\text{C}$) em função da densidade (ρ_a - kg.m^{-3}). Dados: (A) Amostras da tratamentos utilizando as amostras da região inferior e superior; (B): Análise dos resultados médios e desvio padrão dos tratamentos utilizando a região inferior e superior



As correlações efetuadas entre $\delta^{13}\text{C}$ e a ρ dos tratamentos convencional e com déficit hídrico, envolvendo os discos separadamente da região superior e inferior, apresentaram um coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) insatisfatório, respectivamente de 0,44 e 0,08. Na Figura 7A, a análise de regressão utilizando ambas amostras apresentou baixa correlação e o R^2_{aj} de 0,41. A análise de regressão linear entre as variáveis utilizando os dados médios apresentou o R^2_{aj} de 0,90, conforme Figura 7B. Em ambas figuras foi caracterizado um aumento da $\delta^{13}\text{C}$ em função da ρ_a .

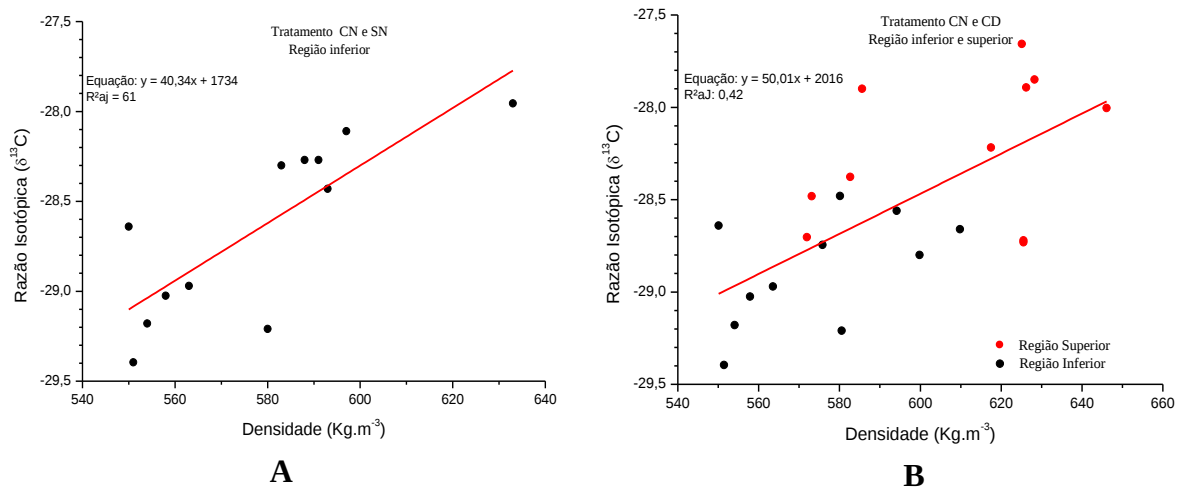
Na Tabela 2, os resultados do coeficiente de correlação de Pearson foram obtidos com dados médios entre a ρ_a e a $\delta^{13}\text{C}$ dos discos, entre os tratamentos CD, CN, SD e SN que apresentaram os respectivos resultados de 0,61, 0,51, 0,66 e 0,24. As correlações estimadas entre as procedências clonais (C) e as seminais (S) apresentaram respectivamente os valores de 0,67 e 0,53, também foram estimadas a correlação entre os tratamentos e o maior resultado foi estimado para o tratamento CD e SD de 0,63.

A correlação entre os tratamentos convencional (N) e clonal (C) é ilustrada na Figura 8A e B, pois foram as correlações que apresentaram os valores maiores. Foi determinado o R^2_{aj} pelas equações lineares entre a $\delta^{13}\text{C}$ e a ρ_a médios, e apresentou respectivamente os valores de 0,61 e 0,42, que evidenciaram também a tendência de aumento da $\delta^{13}\text{C}$ em função do aumento da ρ_a .

Tabela 2 - Correlação entre dos tratamentos (CD, CN, SD e SN) de *E. grandis*. Dados: Os resultados apresentados da correlação entre a Densidade Aparente (ρ_a) média das árvores (kg.m^{-3}) e a Razão Isotópica ($\delta^{13}\text{C}$) da região a Inferior, obtida pela análise de correlação de Pearson

ρ_a	$\delta^{13}\text{C}$			
	CD	CN	SD	SN
CD	0,613			
CN	0,740	0,504		
SD	0,582	0,289	0,665	
SN	0,155	0,394	0,273	0,245

Figura 8 - Análise de regressão dos discos das árvores de *Eucalyptus grandis* submetidas ao tratamento convencional e com déficit hídrico. Dados: (A) Análise da Razão Isotópica ($\delta^{13}\text{C}$) em função da densidade (ρ_a) dos resultados médios dos tratamentos convencional (CN e SN) com discos da região inferior (12,5% da ac); (B): Análise da Razão Isotópica ($\delta^{13}\text{C}$) em função da densidade (ρ_a) dos resultados médios das procedências clonais (CD e CN) da região inferior (12,5%) e superior (87,5% da ac)



2.3.3 Análise isotópica ($\delta^{13}\text{C}$) e a em função da densidade (ρ_a)

A AIE da $\delta^{13}\text{C}$ em função da ρ_a foi realizada para identificar a região radial (1/3, 2/3 e 3/3) conforme a Figura 2, compatível com as variáveis da ρ (ρ_m , ρ_a e ρ_{md}) dos discos e as análises não apresentaram resultados significativos e as correlações foram insatisfatórias. Na tentativa de identificar um ponto radial que represente a média do disco, foi obtida as correlações entre o $\delta^{13}\text{C}$ e a ρ_a utilizando os resultados

radial (3/3) dos discos da região inferior, conforme Tabela 3. As análises das variáveis da região 3/3 ($\delta^{13}\text{C}$ e a ρ_a) para os tratamentos convencionais (CN, SN) as variáveis apresentaram resultados satisfatórios de 0,73 e 0,66 e para o tratamento CD e SD o maior valor foi de 0,64.

Tabela 3 - Correlações entre a variação isotópica ($\delta^{13}\text{C}$) e a densidade aparente (ρ_a) dos tratamentos de *Eucalyptus grandis*. Dados: correlação entre as variáveis (ρ_m , ρ_a e ρ_{md}) médias dos discos e a $\delta^{13}\text{C}$ somente da região de coleta (3/3) dos discos da região inferior, obtida pela análise de correlação de Pearson

Tratamento (CN, SN)	Média Região de coleta (3/3)		
	Média (ρ_m)	Aparente (ρ_a)	Mediana (ρ_{md})
Correlação	0,73	-0,27	0,66
Tratamento (CD, SD)			
Correlação	0,64	0,02	0,35

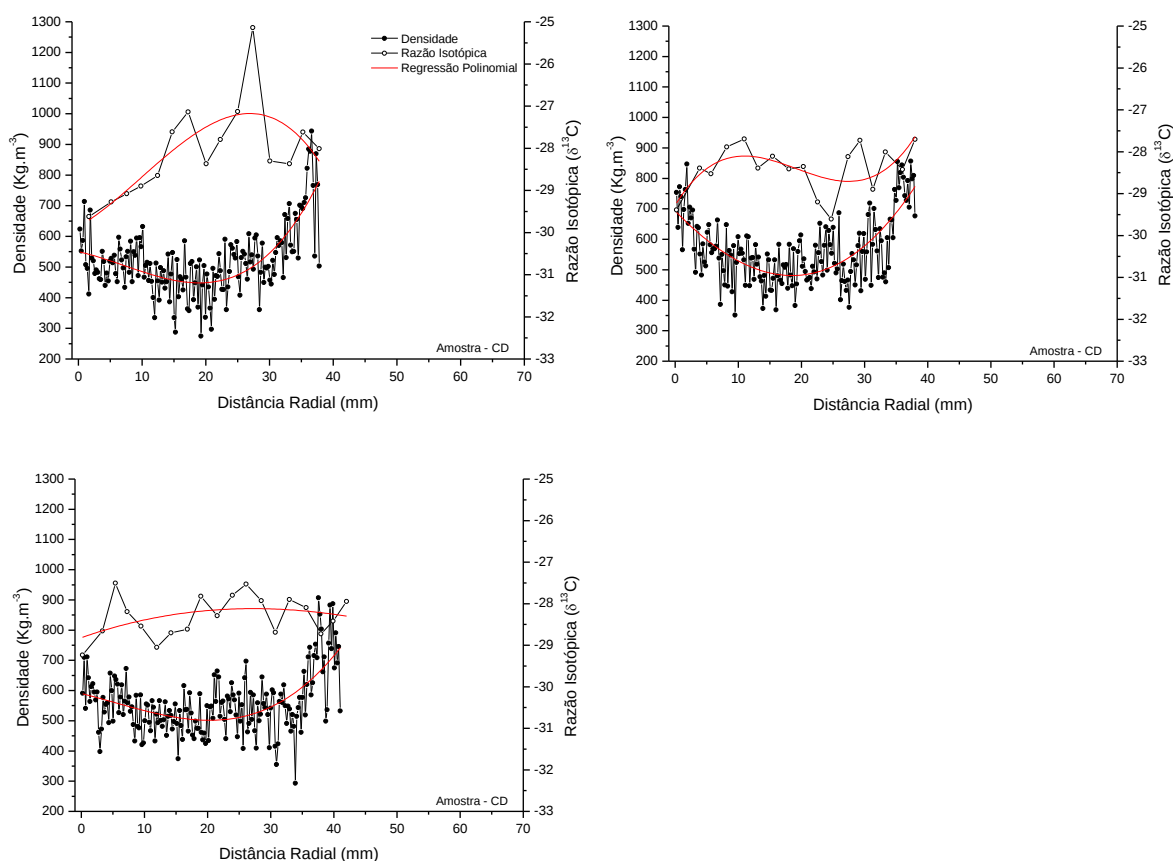
A análise evidenciou a correlação média entre $\delta^{13}\text{C}$ e a ρ do final de cada disco (3/3). O terço final (3/3), representa proporcionalmente mais que 50% do disco e proporciona a caracterizar o disco, portanto, a correlação entre as variáveis apresentou evidência que poderá ajudar a correlacionar a $\delta^{13}\text{C}$ e a ρ .

2.3.4 Variação isotópica ($\delta^{13}\text{C}$) radial

A variação radial da $\delta^{13}\text{C}$ e da ρ_a das procedências e dos tratamentos apresentaram diferenças quanto ao perfil radial. Os clones de *Eucalyptus* submetidos ao déficit hídrico (CD) apresentaram diferenças quanto a variação radial (Figura 9), o tratamento apresentou um perfil heterogêneo e distinto dos demais tratamentos. Os clones do tratamento convencional (CN) apresentaram um perfil semelhante entre as árvores (Figura 10). O perfil do seminal convencional (SN) e com déficit hídrico (SD) foram semelhantes (Figura 11 e 12). Ambos os tratamentos apresentaram um

aumento $\delta^{13}\text{C}$ no centro do disco (medula) e em seguida um decréscimo acentuado que apresentou tendência de estabilização, para a maior parte das amostras.

Figura 9 - Perfil radial da Razão Isotópica de Carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e da densidade (ρ_a - kg.m^{-3}) do tratamento clonal com déficit hídrico (CD) de *Eucalyptus grandis*. Dados: Perfil radial obtido da região da inferior pelo Técnica de Atenuação da Radiação Gama – TARG



Nos tratamentos (*D*, *N*) a variação da razão isotópica ($\delta^{13}\text{C}$) apresentou um comportamento inversamente proporcional a tendência de aumento da densidade ao longo do perfil radial. A $\delta^{13}\text{C}$ ao longo do sentido radial apresentou pouca variabilidade, a maior variação determinada foi para amostras *CN*, *SN* de $-1,14\text{‰}$, e a menor para a amostra *CD* de $-0,50\text{‰}$ e a média determinada para os tratamentos foi de $-28,2 \pm 0,8\text{‰}$. A variação isotópica não apresentou diferenças significativas, ou seja, apresentaram o mesmo perfil de variação ao longo do sentido radial, com algumas exceções.

**Figura 10 - Perfil radial da Razão Isotópica de Carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e da densidade (ρ_a - kg.m^{-3}) do tratamento clonal convencional (CN) de *Eucalyptus grandis*.
Dados: Perfil radial obtido da região da inferior pelo Técnica de Atenuação da Radiação Gama – TARG**

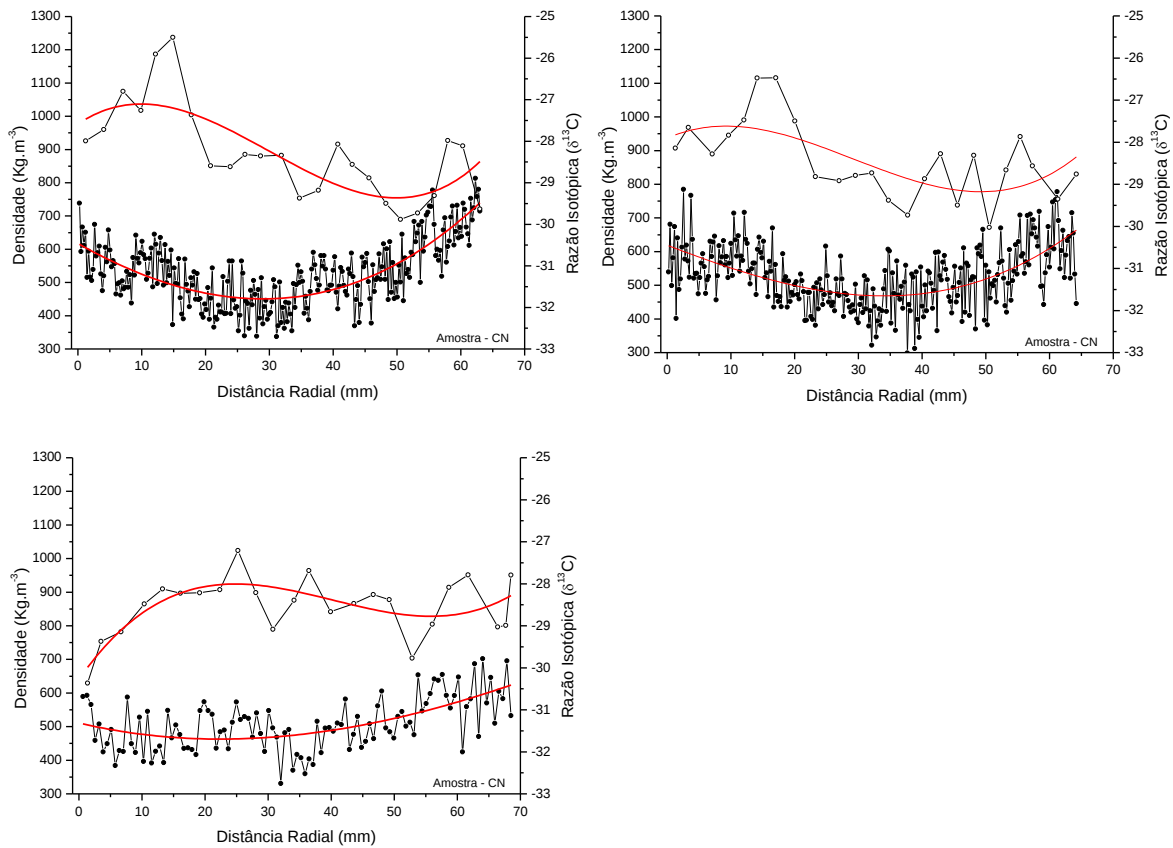


Figura 11 - Perfil radial da Razão Isotópica de Carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e da densidade (ρ_a - kg.m^{-3}) do tratamento seminal com déficit hídrico (CD, SD) de *Eucalyptus grandis*. Dados: Perfil radial obtido da região da inferior pelo Técnica de Atenuação da Radiação Gama – TARG

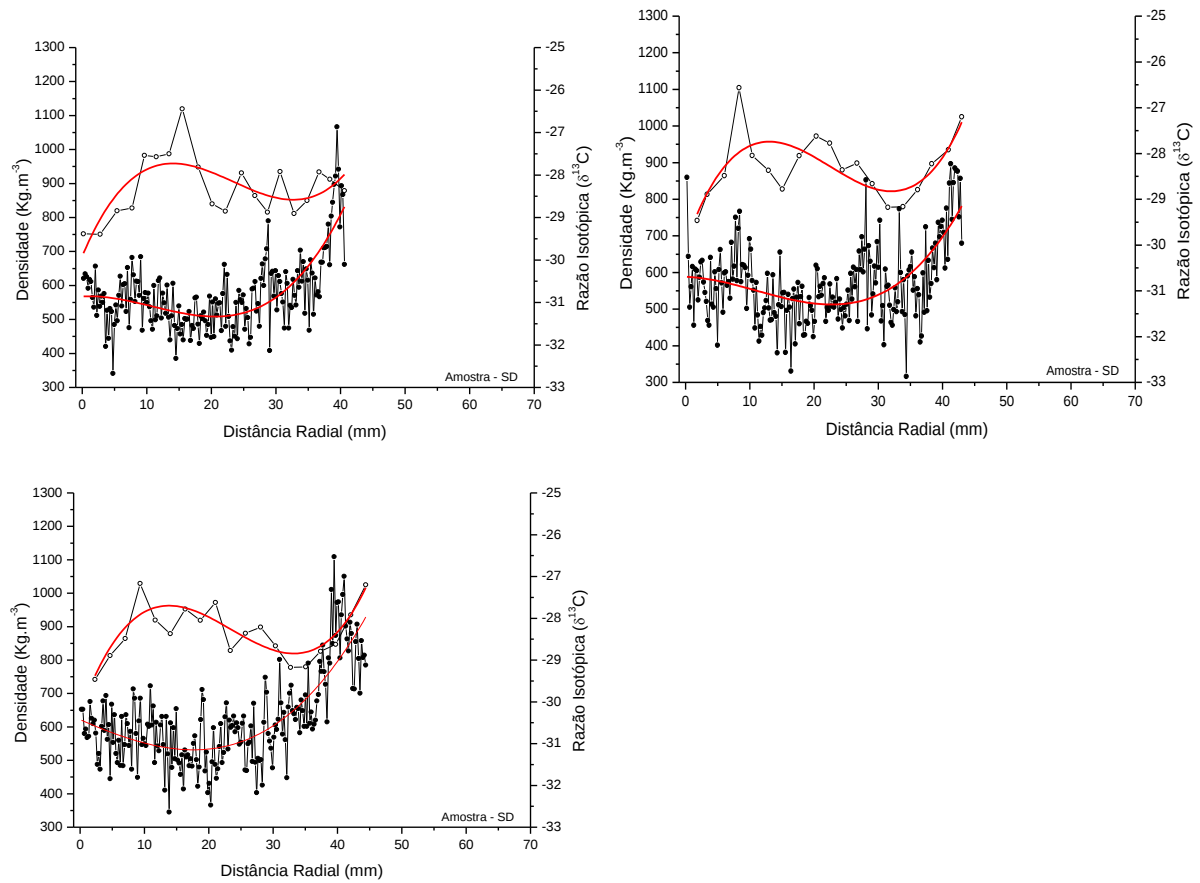
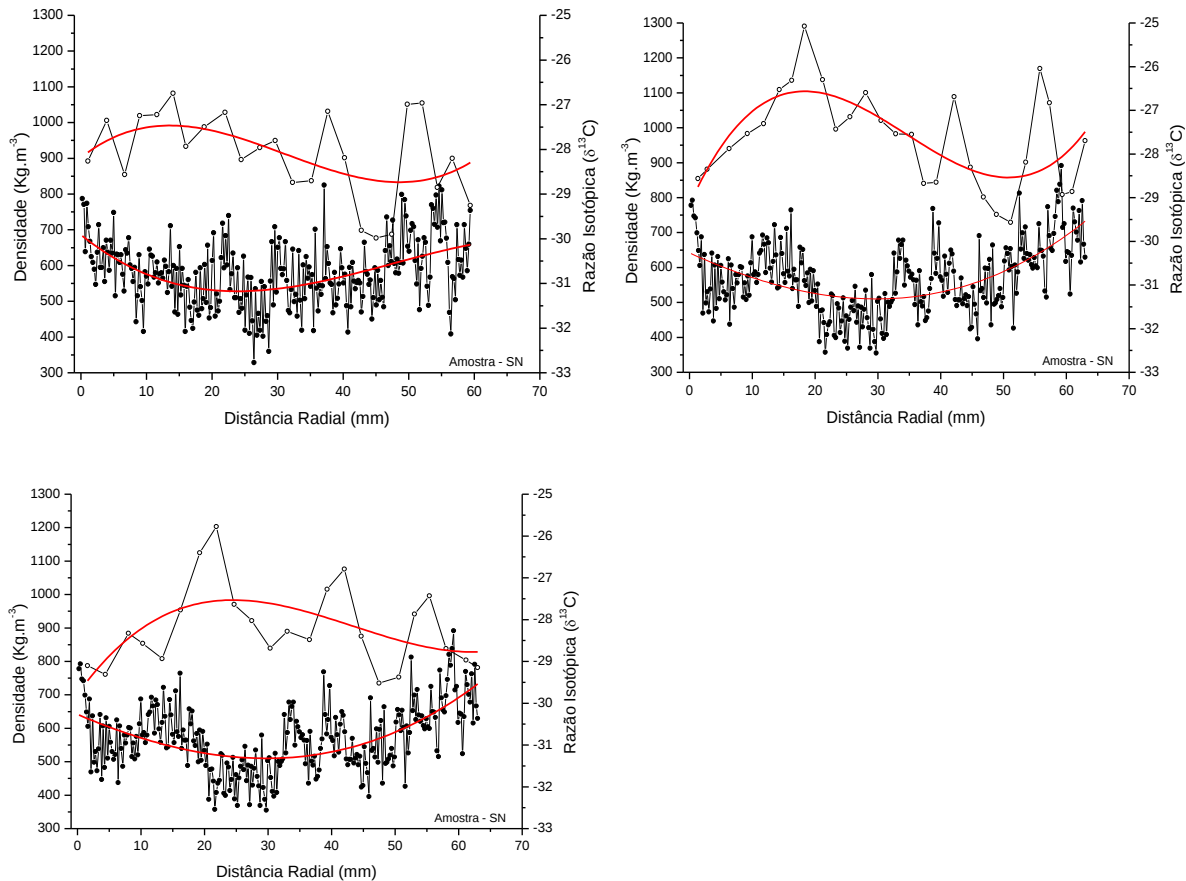


Figura 12 - Perfil radial da Razão Isotópica de Carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e da densidade (ρ_a - kg.m^{-3}) do tratamento seminal convencional (SN) de *Eucalyptus grandis*. Dados: Perfil radial obtido da região da inferior pelo Técnica de Atenuação da Radiação Gama – TARG



2.3.5 Valor isotópico ponderado ($\delta^{13}\text{C}$)

A AIE de $\delta^{13}\text{C}$ deve ser realizada com material coletado de forma homogênea para apresentar um resultado médio dos discos. Com os resultados radiais pontuais foi possível obter os dados médios dos 50% finais dos discos ($\delta^{13}\text{C}_{50\%}$) e a ponderação isotópica dos discos ($\delta^{13}\text{C}_{pond}$) pela Equação 3, realizada dividindo o raio em três partes equidistantes, conforme ilustrado na Figura 2.

$$\delta^{13}\text{C}_{pond} = \frac{0,11(\delta_{C3}) + 0,33(\delta_{C2}) + 0,56(\delta_{C1})}{(\delta_{C3} + \delta_{C2} + \delta_{C1})} \quad (3)$$

onde:

$\delta^{13}\text{C}_3$: refere-se ao 1º terço, porcentagem da área de ($\delta^{13}\text{C} \cdot 11\%$) inicial próximo a medula;

$\delta^{13}\text{C}_2$: refere-se ao 2º terço, porcentagem da área de ($\delta^{13}\text{C} \cdot 33\%$) intermediário;

$\delta^{13}\text{C}_1$: refere-se ao 3º terço, porcentagem da área de ($\delta^{13}\text{C} \cdot 56\%$) final;

Com a análise de ponderação dos discos foram realizadas as correlações entre as variáveis, o $\delta^{13}\text{C}$ médio dos discos, $\delta^{13}\text{C}_{\text{pond}}$ e a $\delta^{13}\text{C}_{50\%}$. As análises resultaram em valores muito próximos e não apresentaram resultados significativos. A $\delta^{13}\text{C}$ e a $\delta^{13}\text{C}_{\text{pond}}$ apresentaram respectivamente os valores de $-28,6 \pm 0,4$ e $-28,3 \pm 0,3\text{‰}$, e entre $\delta^{13}\text{C}_{\text{pond}}$ e a $\delta^{13}\text{C}_{50\%}$ os valores respectivos foram $-28,3 \pm 0,3$ e $-28,4 \pm 0,39\text{‰}$.

A análise entre a $\delta^{13}\text{C}_{50\%}$ e a proporção $\delta^{13}\text{C}_1$ apresentou diferenças significativas a 5% de probabilidade e apresentaram correlações de 0,94, com um coeficiente de determinação de 0,89, e apresentou uma diferença entre os valores médios inferiores à 0,1‰. As análises envolvendo o $\delta^{13}\text{C}_2$ e o $\delta^{13}\text{C}_3$ dos discos apresentaram resultados significativos, com as respectivas correlações de 0,78 e -0,60. No $\delta^{13}\text{C}_3$ a correlação negativa evidenciou a formação de madeira diferenciada do $\delta^{13}\text{C}_1$ e consequentemente dos 50% final dos discos.

A análise de correlação da ρ_a entre as $\delta^{13}\text{C}_{50\%}$ e $\delta^{13}\text{C}_1$ apresentaram correlações baixas inferiores a 0,3, mas apresentaram tendência de aumento da razão isotópica em função da densidade aparente.

2.4 DISCUSSÃO

Quanto aos resultados da densidade, em específico o perfil radial das amostras submetidas ao déficit hídrico, apresentaram madeira mais homogênea com menor variabilidade radial. O resultado foi devido as circunstância que envolveram o tratamento, fazendo o melhor uso da água e o incremento radial aumentado de forma lenta e mais uniforme (JALEEL et al., 2008; MENDES et al., 2013).

Os métodos *MI* e *TARG* utilizados para determinar a ρ_a (REZENDE, 1997; COSTA, 2006) foram eficientes na determinação da densidade, que apresentaram resultado muito próximo e um baixo desvio padrão, resultados semelhantes foram determinados por Bruder, Rezende e Costa (2016) obtendo densidade da madeira por diferentes métodos. O conhecimento das propriedades e das características é um fator importante para a qualificação e quantificação da madeira, que apresenta como objetivo a destinação da matéria-prima e outras aplicações (BRUDER, 2012; GUERRA; EUFRATE JUNIOR, 2019), como a busca por métodos e não destrutivo (GOUVÊA et al., 2011; GONÇALVES et al., 2018) para obter de forma prática e rápidas a caracterização da madeira (COUTO et al., 2013).

A análise da densidade entre o tratamento convencional (CN e SN) e com déficit hídrico (CD e SD) não apresentaram diferenças significativas. Os pressupostos que o déficit hídrico afetaria a ρ_a não foi confirmado, diferente do resultado determinado por Castro et al., (2017), avaliando árvores do gêneros *Eucalyptus* sob as mesmas condições e suplementadas com potássio (KCl) e sódio (NaCl), portanto, árvores submetidas ao estresse hídrico apresentam como resposta a adaptação, o fechando dos estômatos em suas folhas para diminuir a demanda de transpiração (SPARKS, 1998; SCHIFMAN et al., 2012). Embora, esta resposta ao déficit, seja uma estratégia de proteção a curto prazo, o fechamento do estômatos de forma prolongada reduzirá o crescimento das plantas (JALEEL et al., 2008), devido à limitação do suprimento de CO_2 para fixação de carbono (PITA et al., 2005; MENDES et al., 2013).

A ocorrência do déficit hídrico de forma momentânea faz com que os mecanismos fisiológicos das plantas sejam severamente afetados (PITA et al., 2005) e necessitam de adaptação e quando submetidas a um déficit hídrico gradual, a adaptação ao estresse ocorre mais facilmente (SANTOS; CARLESSO, 1998). A tolerância ao déficit hídrico parece ser um importante mecanismo de resistência, para a manutenção do processo produtivo em condições de baixa disponibilidade de água (SANTOS; CARLESSO, 1998; KERBAUY, 2004).

Quanto à variação radial e longitudinal da densidade a expectativa era obter perfis diferenciados, devido aos tratamentos submetidos, e os pressupostos se concretizaram em partes. O perfil longitudinal não apresentou grandes alterações entre os tratamentos, mas no perfil radial foi observado alterações, um aumento nas amostras submetidas ao déficit hídrico. Os resultados foram semelhantes aos determinados por Soares et al. (2018), que apresentaram aumento da densidade no perfil radial e baixas variações obtidas na direção longitudinal em árvores de 60 anos. O tratamento CN e SN apresentaram a maior variabilidade de ρ_a radial e resultados semelhantes foram obtidos por Castro et al. (2017). Com o déficit hídrico a planta se adaptou e utilizou a água de forma eficiente, o que promoveu menor variabilidade da densidade radial (MENDES et al., 2013; HAKAMADA et al., 2020), e a menor assimilação de CO_2 (PEEVA; CORNIC, 2009; MENDES et al., 2013) consequentemente menor crescimento, este resultado também foi determinado por Castro et al. (2017) em amostras do grupo controle. Em geral, os tratamentos apresentaram um aumento da ρ_a no terço final do disco (30% próximo à periferia)

(SOARES et al., 2018) e esta região apresenta influência direta sobre a característica da madeira, portanto, uma análise somente nesta região poderá caracterizar o disco (WILLIAMSON; WIEMANN, 2010; WIEMANN; WILLIAMSON, 2012;).

A alteração no perfil radial da ρ_a (CD e SD) foi devido a alteração dos processos ecofisiológicos das plantas ocorridos durante o estresse hídrico. Há diversos ajustes fisiológicos que ocorrem em respostas adaptativas de caráter anatômico e morfológico (KERBAUY, 2004), no entanto, as respostas sofrem variações de acordo com a espécie (PITA et al., 2005; MENDES et al., 2013;), o cultivar, o estado de desenvolvimento e duração da intensidade do estresse hídrico. As plantas apresentam a capacidade de resistir a períodos de déficit hídrico (KERBAUY, 2004; SANTOS; CARLESSO, 1998) e como consequência alteram os processos metabólicos (SANTOS; CARLESSO, 1998; JALEEL et al., 2008) que promovem efeitos complexos (FERNANDES; CAIRO; NOVAES, 2015), que respondem essa condição por meio de processos adaptativos (CHAVES; MAROCO; PEREIRA, 2003; KERBAUY, 2004), a capacidade de redução o potencial hídrico (DREW; DOWNES; EVANS, 2011), aliada as adaptações (MENDES et al., 2013). As plantas foram submetidas a um déficit hídrico (CD e SD) por um longo período, porém, o déficit não foi o suficiente para que as plantas do gênero *Eucalyptus grandis* deixasse de realizar seus processos metabólicos e adaptou-se ao uso da água, promovendo um crescimento lento e uniforme. Obviamente, mesmo sob condições de seca, a parede secundária em desenvolvimento ainda desempenhará um papel crítico nas mudanças da densidade da madeira (DREW; DOWNES; EVANS, 2011).

2.4.1 Variação isotópica na madeira

As análises dos discos de forma integral (madeira) apresentaram dados isotópicos com alto índice de repetibilidade e com baixo desvio padrão, que proporcionaram metodologicamente resultados precisos, aplicabilidade e praticidade no uso convencional para a caracterização isotópica. Nas AIE de $\delta^{13}C$ optou-se por utilizar amostras de madeira total, pois, a obtenção da celulose apresenta um trabalho moroso, dependendo da escolha da metodologia para extração (KAGAWA et al., 2015) e devido altas correlações estimadas entre os sinais isotópicos da celulose e da madeira (SCHLESER et al., 2015). Quanto ao uso da madeira, há questionamentos, quanto a interferência dos extrativos da madeira no sinal isotópico,

principalmente em espécies de clima temperado e tropical que apresentam entre 8 e 20% de seu peso seco. Os extrativos compreendem grande variedade de compostos, no entanto, contribuem de forma insignificante no sinal $\delta^{13}\text{C}$ (SCHLESER et al., 2015).

2.4.2 Variação da razão isotópica na direção longitudinal (Inferior e Superior)

A AIE apresentou um comportamento semelhante entre os tratamentos, mas com resultados distintos nas regiões inferiores e superiores. Ao analisar de forma geral a variação média dos tratamentos nas regiões não houve uma evidência clara da caracterização isotópica e não foi possível considerar uma resposta da planta ao déficit hídrico. Porém, ao analisar somente o tratamento sob estresse hídrico (CD e SD) a variação entre a região inferior e superior foi maior que o tratamento convencional, que caracterizou a discriminação isotópica devido ao estresse, apresentando valores da região inferior menores e da região superior maiores que o tratamento convencional. As variações determinadas do $\delta^{13}\text{C}$ corroboram com as determinadas por Pflug et al., (2015) que encontraram variações de -1,0‰, entre as árvores submetidas ao estresse hídrico. A variabilidade dos tratamentos foram semelhante às obtidas por Weigt et al. (2015), comparando os isótopos de carbono em período de 10 anos, em cinco espécies e dois locais diferentes, apresentou variações $\delta^{13}\text{C}$ ‰ de 1,6‰. Ainda segundo o autor, o déficit hídrico severo foi fortemente refletido nos valores $\delta^{13}\text{C}$ da celulose, resultando em valores menores para as coníferas do que para as espécies decíduas. Nas árvores, de forma geral, ocorrem variações dos valores isotópicos, que foi evidenciada na análise utilizando a média das regiões (Tabela 1). A região inferior apresenta todas as características (anéis crescimento) do decorrer da vida da árvore, por se tratar de madeira formada em época e idade diferentes e ambiente variável, diferente da parte superior que é composta por madeira momentânea, formada devido a certas circunstâncias, como a necessidade de madeira com maior resistência para sustentação (SETTE JR et al., 2012; GIL et al., 2018).

Com a análise de regressão, o tratamento convencional (Figura 7B) utilizando os dados médios dos discos, apresentaram um resultado satisfatório para a caracterização da madeira em função de uma das variáveis. As estimativas são

importantes, pois poderão promover facilidade ou a determinação de um índice que proporcione agilidade na obtenção do resultado final (GONÇALVES et al., 2018).

Quanto à variação isotópica $\delta^{13}C$ (Figura 7A) a expectativa foi obter uma correlação diretamente proporcional à ρ_a , em parte a afirmação foi confirmada, mas não de forma evidente. Os dados médios da região superior e inferior apresentaram uma variação com tendência de aumento da $\delta^{13}C$ em função do aumento da ρ_a e o coeficiente de determinação para ambas regiões de forma individual e coletiva foram baixas, o que evidenciou a discriminação isotópica da madeira recentemente formada e a alta variabilidade dos dados. Lembrando que na formação de madeira, os anéis de crescimento dependem de inúmeros fatores (KERBAUY, 2004; JALEEL et al., 2008), e sua maior atividade é no início da formação da planta onde o crescimento é acelerado (PALERMO et al., 2013).

Na Figura 8A e B, o tratamento convencional (CN e SN) e o tratamento clonal (CN e CD) apresentaram as mesmas características da correlação obtida com os dados gerais (Tabela 1 e Figura 7A e B), ou seja, um aumento da $\delta^{13}C$ em função da ρ_a . O interesse em especial foi no tratamento convencional (CN e SN), pois apresentam as características das plantações comerciais convencionais de *Eucalyptus*. A espécie clonal apresentou o melhor ajuste de regressão utilizando as amostras da região superior e inferior (Figura 8B). A maior correlação estimada foi nas amostras submetidas ao estresse hídrico (Tabela 2), cuja a possível causa foi o déficit contínuo e padronizado que promoveu aumento do incremento radial lento e uniforme, primordial para a variação de densidade (DREW; DOWNES; EVANS, 2011) promovida pelos processos metabólicos.

A AIE pode ser empregada na substituição de metodologia que apresentam características como: pouca eficiência, trabalhosas ou quando utilizados métodos destrutivos para qualificação da madeira (GOUVÊA et al., 2011; GONÇALVES et al., 2018). A problemática em torno desta metodologia envolvendo isótopos é o custeio, a tecnologia envolvida pode apresentar um custo elevado (SAUER et al., 2004; KAGAWA; LEAVITT, 2010; BATTIPAGLIA et al., 2013; KAGAWA et al., 2015; PFLUG, 2015; WEIGT, 2015; LIMA, 2018) e eficiência.

A correlação entre a $\delta^{13}C$ entre as variáveis médias radiais (ρ_m , ρ_a e ρ_{md}) (Tabela 3) foram eficientes. Os resultados obtidos pela AIE trouxeram alguns problemas, pois o resultado da correlação esperada seria com a ρ_a , mas a maior

correlação foi estimada com a ρ_m dos discos, obtida pela TARG, que necessita de amostras específicas e fornece resultados distintos. Os pesquisadores utilizam a ρ_m como parâmetro para qualificar a madeira, mas a análise entre a ρ_a a ρ_m apresentou diferenças significativas e podem subestimar a densidade da madeira. O intuito da correlação foi obter um resultado satisfatório com a densidade ρ_a por ser a densidade estabelecida e utilizada globalmente.

A AIE evidenciou a possibilidade de caracterizar radialmente os discos, da região inferior, utilizando 1/2 (50%) ou o 1/3 final próximo à periferia (Figura 2), representando mais que 60% do disco, que apresenta a característica de formação de madeira mais uniforme e com o crescimento lento, distintas dos primeiros anéis (LIMA; GARCIA, 2010; VIDAURRE et al., 2011; PELOZZI et al., 2012; PALERMO et al., 2013). O resultado proporcionou caracterizar os discos de madeira utilizando uma amostragem na região inferior, podendo optar em utilizar 50% ou 1/3 dos discos para a caracterização isotópica da amostra, que apresenta alta correlação com a densidade aparente.

A variação radial $\delta^{13}C$ e da ρ_a entre os tratamentos convencional e com déficit hídrico apresentaram um mesmo padrão de variação (Figuras 9 a 12). Os tratamentos foram caracterizados pela $\delta^{13}C$ com um aumento radial até aproximadamente 1/3 dos discos que coincide com a formação de madeira juvenil com característica distintas do lenho adulto (VIDAURRE et al., 2011; PALERMO et al., 2013). O perfil da $\delta^{13}C$ coincide com a formação da madeira com característica inversamente proporcional à densidade. A formação radial da madeira é caracterizada como lenho juvenil e adulto (PALERMO et al., 2013) e a mudança de um lenho para outro é caracterizado por mudanças progressivas no câmbio e, conseqüentemente, apresentam mudanças nas dimensões das células, o que influenciam nas propriedades da madeira, como densidade e o sinal isotópico (BALLARIN; PALMA, 2003). A madeira adulta apresenta variações no comprimento de traqueídes (BALLARIN; PALMA, 2003) e na fibra (RIBEIRO; MORI; MENDES, 2010), na espessura da parede celular (SETTE JR et al., 2012) e no conteúdo de celulose (SILVA; OLIVEIRA, 2003), ou seja, madeiras diferentes ao longo dos anos, podem apresentar uma influência direta na discriminação isotópica, proporcionando a variação isotópica no sentido radial e longitudinal. Ao analisar o perfil radial, o fracionamento radial (em terços) coincide com a formação dos lenhos e a variação média obtida entre os lenhos foi de

aproximadamente $1,0\delta^{13}\text{C}\text{‰}$. Portanto, nos primeiros anos a formação de madeira é acelerada e a assimilação de carbono por parte da planta é indiscriminada, a partir da transição do lenho, com a formação mais lenta, há uma nova formação de madeira promovendo uma discriminação isotópica.

As análises obtidas entre a $\delta^{13}\text{C}$ em função ρ_a poderiam apresentar melhores resultados, pois o fator limitante foi a forma de coleta de amostras, para a inserção no *IRMS*. Para o estudo não foi possível coletar amostras com frações de milímetros, que ocasionaria no valor da densidade com a respectiva razão isotópica. Um outro fator limitante para a determinação da densidade em função da razão isotópica foi a variabilidade da $\delta^{13}\text{C}$, que apresentou valores inversamente proporcional ao valor da ρ_a no perfil radial, pois há uma variação individual que dificulta a correlação precisa, mesmo analisando somente uma fração dos discos. Com este perfil radial, uma possível caracterização regional, somente com o isótopo de carbono, será uma tarefa complexa. A assimilação de carbono de forma diferenciada ao longo do perfil radial é uma limitação que terá que ser avaliada para tentar correlacionar a densidade do disco com a razão isotópica.

A variação radial da $\delta^{13}\text{C}$ foi heterogênea, apresentando valores maiores próximo à medula ($\delta^{13}\text{C}_3$), mas possui pouca representatividade no disco, portanto foi realizada a ponderação, que caracterizou as amostras utilizando os $\delta^{13}\text{C}_{pond}$ e o $\delta^{13}\text{C}_{50\%}$, cujos resultados médios apresentaram a máxima variação de $0,3\text{‰}$ e a mínima de $0,1\text{‰}$. Portanto, a análise realizada com as amostras retiradas de forma ponderada dos discos, foram eficientes para analisar a média dos discos.

2.5 CONCLUSÃO

A correlação entre densidade e a razão isotópica é uma abordagem importante para os estudos florestais e para monitoramento do ciclo de carbono. O estudo, envolvendo árvores da espécie *E. grandis* submetidas a déficit hídrico foi uma abordagem que permitiu em partes verificar o comportamento isotópico da direção radial associada à densidade da madeira. Com o estudo, foi possível concluir que árvores localizadas em um mesmo sítio, sob as mesmas características como, edafoclimáticas e idades, apresentam um comportamento semelhante quanto à densidade e o sinal isotópico. Ao analisar a densidade das árvores quanto aos

tratamentos, foi identificado que não sofreram alterações, portanto, o percentual de déficit hídrico a que foram submetidas não foi o suficiente para afetar tal característica. A análise de isótopos estáveis possibilitou caracterizar isotopicamente os discos, utilizando apenas uma amostra ou uma fração dos discos. As análises realizadas entre a densidade e a razão isotópica possibilitou em algumas ocasiões estimar a densidade em função da razão isotópica e vice versa.

REFERÊNCIAS

- BAHAR, B. *et al.* Effect of canopy temperature depression on grain yield and yield components in bread and durum wheat. **Notulae botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**, Romania, v. 36, p. 34-37, 2008.
- BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. L. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 371–380, 2003.
- BARBOUR, M. M. Stable oxygen isotope composition of plant tissue: a review. **Functional Plant Biology**, Collingwood, v. 34, n. 8, p. 83–94, 2007.
- BATISTA, D. C.; KLITZKE, R. J.; SANTOS, C. V. T. Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 4, p. 665–674, 2010.
- BATTIPAGLIA, G. *et al.* Elevated CO₂ increases tree-level intrinsic water use efficiency: insights from carbon and oxygen isotope analyses in tree rings across three forest FACE sites. **New Phytologist**, London, v. 197, n. 2, p. 544-554, 2013.
- BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução RDC nº 5, de 15 de janeiro de 2007**. Aprova o Regulamento Técnico sobre “Atribuição de Aditivos e seus Limites Máximos para a Categoria de Alimentos. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 17 jan. 2007. Disponível em: <http://portal.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/RDC_02_2007_COMP.pdf/c966caff-1c19-4a2f-87a6-05f7a09e940b>. Acesso em: 26 mar. 2020.
- BRUDER, E. M. **Métodos de determinação da densidade básica e aparente da madeira de *Eucalyptus* sp.** 2012. 99 f. Dissertação (Mestrado Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2012.
- BRUDER, E. M.; REZENDE, M. A.; COSTA, V. E. Densidade de *Eucalyptus* sp. próxima a umidade de equilíbrio estimado pelo método de imersão. **Energia Na Agricultura**, Botucatu, v. 31, n. 1, p. 38, 2016.
- CADEMARTORI, P. H. G. *et al.* Uso de herbicida na redução das tensões de crescimento na madeira serrada de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 3, p. 801–808, 2015.
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies florestais brasileiras**: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira. Colombo: EMBRAPA-CNPQ, Brasília: EMBRAPA SPI, 1994. p. 344-347.

CASTRO, V. R. *et al.* Efeito da aplicação do potássio, do sódio e da disponibilidade hídrica na densidade aparente a 12% de umidade do lenho juvenil de árvores de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 3, p. 1017, 2017.

CHAVES, M. M.; MAROCO, J. P.; PEREIRA, J. S. Understanding plant responses to drought - From genes to the whole plant. **Functional Plant Biology**, Collingwood, v. 30, n. 3, p. 239–264, 2003.

COSTA, V. E. **Caracterização físico-energética da madeira e produtividade de reflorestamentos de clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla***. 2006. 99 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.

COUTO, A. M. *et al.* Modeling of basic density of wood from *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus urophylla* using nondestructive methods. **CERNE**, Lavras, v. 19, n. 1, p. 27–34, 2013.

CUNTZ, M. *et al.* A comprehensive global 3D model of $\delta^{18}\text{O}$ in atmospheric CO_2 : 2. Mapping the atmospheric signal. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, Washington, v. 108, p. 1–24, 2003.

DEL MENEZZI, C. H. S.; NAHUZ, M. A. R. Comportamento de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden no Desdobro. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 563–571, 1998.

DREW, D. M.; DOWNES, G. M.; EVANS, R. Short-term growth responses and associated wood density fluctuations in variously irrigated *Eucalyptus globulus*. **Trees**, Santa Monica, v. 25, n. 2, p. 153–161, 2011.

DUCATTI, C. **Isótopos estáveis ambientais**. Curso de Pós-graduação. Disciplina: Aplicação de Isótopos Estáveis Ambientais. Programa de Pós-graduação em Zootecnia. Botucatu: FMVZ/ UNESP, 2007. 204 p. Apostila.

DUCATTI, C. *et al.* Utilização de isótopos estáveis em ruminantes. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 40, p. 68–75, 2011. Suplemento especial. FARQUHAR, G. D.; CERNUSAK, L. A. On the isotopic composition of leaf water in the non-steady state. **Functional Plant Biology**, Collingwood, v. 32, p. 293–303, 2005.

FARQUHAR, G. D.; O'LEARY M, H.; BERRY, J. A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves. **Australian Journal of Plant Physiology**, Collingwood, v. 9, p. 121–137, 1982.

FERNANDES, E. T.; CAIRO, P. A. R.; NOVAES, A. B. Respostas fisiológicas de clones de eucalipto cultivados em casa de vegetação sob deficiência hídrica. **Ciencia Rural**, Santa Maria, v. 45, n. 1, p. 29–34, 2015.

GESSLER A. *et al.* Oxygen isotope enrichment of organic matter in *Ricinus communis* during the diel course and as affected by assimilate transport. **New Phytologist**, London, v. 174, p. 600–613, 2007.

GESSLER, A. *et al.* Stable isotopes in tree rings: Towards a mechanistic understanding of isotope fractionation and mixing processes from the leaves to the wood. **Tree Physiology**, Oxford, v. 34, n. 8, p. 796–818, 2014.

GIL, J. L. R. A. *et al.* Características físicas e anatômicas da madeira de *Tectona grandis* L.f. aos 7 anos de idade. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 41, n. 2, p. 529–538, 2018.

GILLON, J. S.; GRIFFITHS, H. The influence of (photo) respiration on carbon isotope discrimination in plants. **Plant Cell Environment**, Oxford, v. 20, p. 1217-1230, 1997.

GONÇALEZ, J. C. *et al.* Relações entre dimensões de fibras e de densidade da madeira ao longo do tronco de *Eucalyptus urograndis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 101, p. 81–89, 2014.

GONÇALVES, F. G. *et al.* Densitometria de raios x na avaliação da densidade em painéis de partículas. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 3, p. 1151, 2018.

GOUVÊA, A. F. G. *et al.* Determinação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* por diferentes métodos não destrutivos. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 349–358, abr. 2011.

GUERRA, S. P. S.; EUFRATE JUNIOR, H. J. **Recuperação energética da biomassa de tocos e raízes de florestas plantadas**. Botucatu: FEPAF, 2019. 176 p.

HAKAMADA, R. E. *et al.* Influence of stand density on growth and water use efficiency in *Eucalyptus* clones. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 466, p. 118-125, 2020.

JALEEL, C. A. *et al.* Alterations in morphological parameters and photosynthetic pigment responses of *Catharanthus roseus* under soil water deficits. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, Amsterdam, v. 61, n. 2, p. 298–303, 2008.

KAGAWA, A.; LEAVITT, S.W. Stable carbon isotopes of tree rings as a tool to pinpoint the geographic origin of timber. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v. 56, p. 175–183, 2010.

KAGAWA, A.; NAKATSUKA, T. A novel method for extracting alpha-cellulose directly from tree-ring laths. In: BAKER, P. (ed.). **Proceedings for the 9th international conference on dendrochronology**. Melbourne: University of Melbourne, 2014. p. 61-61.

KAGAWA, A. *et al.* An optimized method for stable isotope analysis of tree rings by extracting cellulose directly from cross-sectional laths. **Chemical Geology**, Amsterdam, v. 393–394, p. 16–25, 2015.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2004.
KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Justus Perthes: Gotha, Germany, 1928.

LIMA, I. L.; GARCIA, J. N. Variação da densidade aparente e resistência à compressão paralela às fibras em função da intensidade de desbaste, adubação e posição radial em *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 551–559, 2010.

LIMA, V. L. F. **Isótopos estáveis de carbono e nitrogênio para identificação de cama de aviário na alimentação de bovinos** 2018. 72 f. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2018.

MCCARROLL, D.; LOADER, N. J. Stable isotopes in tree rings. **Quaternary Science Reviews**, Oxford, v. 23, n. 7–8, p. 771–801, 2004.

MENDES, H. S. J. *et al.* Respostas fisiológicas de genótipos de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* à disponibilidade hídrica e adubação potássica. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 4, p. 603–611, 2013.

PALERMO, G. P. M. *et al.* Delimitação entre os lenhos juvenil e adulto de *Pinus elliottii* engelm. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 1, p. 191–200, 2013.

PEEVA, V.; CORNIC, G. Leaf photosynthesis of *Haberlea rhodopensis* before and during drought. **Environmental and Experimental Botany**, Elmsford, v. 65, n. 2–3, p. 310–318, 2009.

PELOZZI, M. M. A. *et al.* Physical properties of the juvenile and mature wood of *Pinus elliottii* Engelm var. *elliottii* and *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 2, p. 305–313, 2012.

PFLUG, E. E. *et al.* Growth cessation uncouples isotopic signals in leaves and tree rings of drought-exposed oak trees. **Tree Physiology**, Oxford, v. 35, n. 10, p. 1095–1105, 2015.

PITA, P. *et al.* Use of physiological traits in tree breeding for improved yield in drought-prone environments. The case of *Eucalyptus globulus*. **Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales**, Madrid, v. 14, n. 3, p. 383, 2005.

REZENDE, M. A. **Uma abordagem não convencional sobre as principais características físicas da madeira, com ênfase para retratibilidade, massa específica e técnica de atenuação da radiação gama**. 1997. 138 f. Tese (Livre-

Docência) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1997.

RIBEIRO, A. O.; MORI, F. A.; MENDES, L. M. Características das dimensões das fibras e análise do ângulo microfibrilar de *Toona ciliata* cultivada em diferentes localidades. **Floresta**, Curitiba, v. 41, n. 1, p. 47–56, 2010.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 287–294, 1998.

SAURER, M.; SIEGWOLF, R. T. W.; SCHWEINGRUBER, F. H. Carbon isotope discrimination indicates improving water-use efficiency of trees in northern Eurasia over the last 100 years. **Global Change Biology**, Oxford, v. 10, n. 12, p. 2109–2120, 2004.

SCHIFMAN, L. A. *et al.* Carbon isotope variation in shrub willow (*Salix* spp.) ring-wood as an indicator of long-term water status, growth and survival. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 36, p. 316–326, 2012.

SCHLESER, G. H. *et al.* A remarkable relationship of the stable carbon isotopic compositions of wood and cellulose in tree-rings of the tropical species *Cariniana micrantha* (Ducke) from Brazil. **Chemical Geology**, Amsterdam, v. 401, p. 59–66, 2015.

SEIBT, U. *et al.* Carbon isotopes and water use efficiency: sense and sensitivity. **Oecologia**, Berlin, v. 155, p. 441–454, 2008.

SETTE JUNIOR, C. R. *et al.* Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1183–1190, 2012.

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

SOARES, N. S. *et al.* Competitividade da cadeia produtiva da madeira de eucalipto no Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 917–928, 2010.

SPARKS J. P.; BLACK, A. Regulation of water loss in populations of *Populus trichocarpa*: the role of stomatal control in preventing xylem cavitation JED. **Tree Physiology**, Oxford, v. 19, n. 3, p. 453–459, 1999.

VALE, R. S. *et al.* Efeito da desrama artificial na qualidade da madeira de clones de eucalipto em sistema agrossilvipastoril. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 285–297, 2002.

VIDAURRE, G. *et al.* Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 18, n. 4, p. 469–480, 2011.

WEIGT, R. B. *et al.* Comparison of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values between tree-ring whole wood and cellulose in five species growing under two different site conditions. **Rapid Communications in Mass Spectrometry**, Chichester, v. 29, n. 23, p. 2233–2244, 2015.

WIEMANN, M. C.; WILLIAMSON, G. B. Testing a novel method to approximate wood specific gravity of trees. **Forest Science**, Bethesda, v. 58, n. 6, p. 577–591, 2012.

WILLIAMSON, G. B.; WIEMANN, M. C. Measuring wood specific gravity...correctly. **American Journal of Botany**, Philadelphia, v. 97, n. 3, p. 519–524, 2010.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A densitometria radial do disco a 12,5% da altura comercial, identificou que no terço final do raio, a densidade é igual à média do disco, portanto somente uma análise nesta região servirá para a caracterização da madeira. A análise evidenciou que apenas a coleta de 1/3 do raio ou 1/6 do diâmetro das amostras, entre as regiões de 12 e 13% da altura comercial, poderá caracterizar a densidade média da árvore. A estimativa possibilitou obter a densidade média das árvores que poderá também ser estimada por métodos não destrutivos, ou seja, sem a necessidade de derrubada da árvore.

A *TARG* é um equipamento que utiliza acessórios, software e equações complexas para obtenção da densitometria da madeira ou de outro material, além de necessitar de um profissional qualificado. As estimativas determinadas pela metodologia poderão ser aplicadas por outros métodos, os não destrutivos, garantindo a densidade do povoamento e a conservação da árvore para análise futuras.

Foi possível estimar a densidade média da árvore sem a necessidade da amostragem na região a 87,5% da altura comercial, pois a região acima dos 87,5% da altura comercial não contribui com a variação da densidade média da árvore, devido à pouca representatividade no volume da árvore.

A análise de isótopos estáveis atualmente é utilizada como uma ferramenta qualitativa e quantitativa, em diversas áreas do conhecimento, e a busca por metodologias eficazes e rápidas é constante para a qualificação da madeira, portanto a análise isotópica poderá ser útil na caracterização da madeira, pois utiliza amostras sem a necessidade da derrubada da árvore.

A metodologia utilizando os isótopos estáveis pode ser empregada na substituição de metodologias que apresentam pouca eficiência, características muito trabalhosas e quando submetidas a métodos destrutivos.

A razão isotópica poderá ajudar na relação entre as variáveis de interesse, tais como as físicas, químicas e anatômicas, que são relacionadas com o intuito de caracterizar a matéria-prima em função de um método ou de uma variável para facilitar ou melhorar as estimativas e a determinação dos resultados.

REFERÊNCIAS

- ABREU, L. B. *et al.* Avaliação não destrutiva de estruturas de madeiras em edifício histórico de Tiradentes, MG. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 481-487, 2013.
- ALZATE, S. B. A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. grandis* x *E. urophylla***. 2004. 133 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Produtos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA. **Eucalipto**. Belo Horizonte: MAS, 2019. Disponível em: <http://www.silviminas.com.br>. Acesso em: 19 abr. 2019.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D2395-14**: Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Wood and Wood-Based Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2014.
- BABST, F. *et al.* Site - and species-specific responses of forest growth to climate across the European continent. **Global Ecology and Biogeography**, Oxford, v. 22, p. 706–717, 2013.
- BAHAR, B. *et al.* Effect of canopy temperature depression on grain yield and yield components in bread and durum wheat. **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**, Romania, v. 36, p. 34-37, 2008.
- BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ultra-som. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 19-28, 2005.
- BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. L. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 371-380, 2003.
- BARBOUR, M. M. Stable oxygen isotope composition of plant tissue: a review. **Functional Plant Biology**, Collingwood, v. 34, n. 8, p. 83–94, 2007.
- BARNARD, H. *et al.* Mixed results of seven methods for organic residue analysis applied to one vessel with the residue of a known foodstuff. **Journal of Archaeological Science**, New York, v. 34, n. 1, p. 28–37, 2007.
- BATISTA, D. C.; KLITZKE, R. J.; SANTOS, C. V. T. Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 4, p. 665-674, 2010.
- BATTIPAGLIA, G. *et al.* Climatic sensitivity of $\delta^{18}\text{O}$ in the wood and cellulose of tree rings: results from a mixed stand of *Acer pseudoplatanus* L. and *Fagus sylvatica* L. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, Amsterdam, v. 261, p. 193–202, 2008.

BEERLING, D. J. Ecophysiological responses of woody plants to past CO₂ concentrations. **Tree Physiology**, Oxford, v. 16, p. 389–396, 1996.

BELINI, L. U. *et al.* Propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF confeccionados com madeira de *Eucalyptus grandis*. In: EBRAMEM, 11., 2008, Londrina. **Anais** [...]. Londrina: UEL, Londrina, 2008.

BOERJAN, W. *et al.* Lignin biosynthesis. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 54, p. 519–546, 2003.

BORELLA, S. Analysis of $\delta^{18}\text{O}$ in tree rings: wood–cellulose comparison and method dependent sensitivity. **Journal of Geophysical Research**, Hoboken, v. 104, p. 19267–19273, 1999.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução **RDC nº 5, de 15 de janeiro de 2007**. Aprova o Regulamento Técnico sobre “Atribuição de Aditivos e seus Limites Máximos para a Categoria de Alimentos. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 17 jan. 2007. Disponível em: <http://portal.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/RDC_02_2007_COMP.pdf/c966caff-1c19-4a2f-87a6-05f7a09e940b>. Acesso em: 26 mar. 2020.

BRIFFA, K. R. *et al.* Tree-ring width and density data around the northern hemisphere: part 1, local and regional climate signals. **Holocene**, London, v. 12, p. 737–757, 2002.

BRUDER, E. M. **Densidade básica e aparente da madeira**: método para qualificação. Brasil: Novas Edições Acadêmicas, 2018. 100 p.

BRUDER, E. M.; REZENDE, M. A.; COSTA, V. E. Densidade de *Eucalyptus* sp. Próxima a umidade de equilíbrio estimado pelo método de imersão. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 31, n. 1, p. 38, 2016.

CARVALHO, A. M. **Valorização da madeira do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* através da produção conjunta de madeira serrada em pequenas dimensões, celulose e lenha**. 2000. 129 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2000.

CASTRO, V. R. *et al.* Efeito da aplicação do potássio, do sódio e da disponibilidade hídrica na densidade aparente a 12% de umidade do lenho juvenil de árvores de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 3, p. 1017-1027, 2017.

COPLIN, T. B.; QI, H. USGS42 and USGS43: human-hair stable hydrogen and oxygen isotopic reference materials and analytical methods for forensic science and implications for published measurement results: **Forensic Science International**, Lausanne, v. 214, p. 135-141, 2012.

COSTA, V. E. **Caracterização físico-energética da madeira e produtividade de reflorestamentos de clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla***.

2006. 99 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.

CUNTZ, M. *et al.* A comprehensive global 3D model of $\delta^{18}\text{O}$ in atmospheric CO_2 : 2. Mapping the atmospheric signal. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, Washington, v. 108, p. 1–24, 2003.

DIAS, D. C. *et al.* Uso da técnica de resistografia e de variáveis dendrométricas na modelagem da densidade básica de povoamentos clonais de *Eucalyptus*. **Ciênc. Florest.**, Santa Maria, v. 27, n. 2, p. 609-619, 2017.

DOWNES, G. M. *et al.* **Sampling plantation *Eucalyptus* for wood and fiber properties**. Melbourne: CSIRO Publishing, 1997. 132 p.

DUCATTI, C. *et al.* Utilização de isótopos estáveis em ruminantes. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 40, p. 68-75, 2011. Suplemento especial.

DUCATTI, C. **Isótopos estáveis ambientais**. Curso de Pós-graduação. Disciplina: Aplicação de Isótopos Estáveis Ambientais. Programa de Pós-graduação em Zootecnia. Botucatu: FMVZ/ UNESP, 2007. 204 p. Apostila.

FARQUHAR, G. D.; CERNUSAK, L. A. On the isotopic composition of leaf water in the non-steady state. **Functional Plant Biology**, Collingwood, v. 32, p. 293–303, 2005.

FARQUHAR, G. D.; O'LEARY M, H.; BERRY, J. A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves. **Australian Journal of Plant Physiology**, Collingwood, v. 9, p. 121-137, 1982.

FERNANDES, D. E. *et al.* Influência da produtividade de clones híbridos de eucalipto na densidade da madeira e na polpação Kraft. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 143-150, 2011.

FISCHER, A.; ZYLBERSZTAJN, D. O fomento florestal como alternativa de suprimento de matéria-prima na indústria brasileira de celulose. **REAd Revista Eletrônica de Administração**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 494-520, 2012.

FLANAGAN, L. B.; EHRLINGER, J. R. Ecosystem-atmosphere CO_2 exchange: interpreting signals of change using stable isotope ratios. **Trends in Ecology & Evolution**, Amsterdam, v. 13, p. 10-14, 1998.

FRANKS, P. J. *et al.* Sensitivity of plants to changing atmospheric CO_2 concentration: from the geological past to the next century. **New Phytologist**, London, v. 197, p. 1077–1094, 2013.

GAGEN, M. *et al.* Evidence of changing intrinsic water-use efficiency under rising atmospheric CO_2 concentrations in Boreal Fennoscandia from subfossil leaves and tree ring $\delta^{13}\text{C}$ ratios. **Global Change Biology**, Oxford, v. 17, p. 1064–1072, 2011.

GESSLER, A. *et al.* Tracing carbon and oxygen isotope signals from newly assimilated sugars in the leaves to the tree ring archive. **Plant Cell Environment**, Oxford, v. 32, p. 780–795, 2009.

GESSLER, A. *et al.* Stable isotopes in tree rings: towards a mechanistic understanding of isotope fractionation and mixing processes from the leaves to the wood. **Tree Physiology**, Oxford, v. 34, p. 796–818, 2014.

GESSLER, A. *et al.* Oxygen isotope enrichment of organic matter in *Ricinus communis* during the diel course and as affected by assimilate transport. **New Phytologist**, London, v. 174, p. 600–613, 2007.

GILLON, J. S.; GRIFFITHS, H. The influence of (photo) respiration on carbon isotope discrimination in plants. **Plant Cell Environment**, Oxford, v. 20, p. 1217–1230, 1997.

GOMIDE, J. L. *et al.* Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de *Eucalyptus* do Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 129–137, 2005.

GOMIDE, J. L.; FANTUZZI NETO, H.; REGAZZI, A. J. Análise de critérios de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose kraft. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 339–344, 2010.

GONÇALEZ, J. C. Relações entre dimensões de fibras e de densidade da madeira ao longo do tronco de *Eucalyptus urograndis* **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 101, p. 81–89, 2014.

GONÇALEZ, J. C. *et al.* Características tecnológicas das madeiras de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. **Revista Ciência Florestal**, v. 16, n. 3, p. 329–341, 2006.

GONÇALVES, C. A.; LELIS, R. C. C.; ABREU, H. S. Caracterização físico-química da madeira de sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth.). **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 23, n. 1, p. 54–62, 2010.

GONÇALVES, D. D. *et al.* Seroepidemiology and occupational and environmental variables for leptospirosis, brucellosis and toxoplasmosis in slaughterhouse workers in the Paraná State, Brazil. **Revista do Instituto de Medicina Tropical**, São Paulo, v. 48, n. 3, p. 135–140, 2006.

GONÇALVES, F. G. *et al.* Parâmetros dendrométricos e correlações com propriedades tecnológicas em um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 947–959, 2010.

GORI, Y. Carbon, hydrogen and oxygen stable isotope ratios of whole wood, cellulose and lignin methoxyl groups of *Picea abies* as climate proxies. **Rapid Communications in Mass Spectrometry**, Chichester, v. 27, p. 265–275, 2012.

GOUVÊA, A. F. G. *et al.* Determinação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* por diferentes métodos não destrutivos. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 349-358, 2011.

GRAY, J.; THOMPSON, P. Climatic information from $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ analysis of cellulose, lignin and whole wood from tree rings. **Nature**, London, v. 270, p. 708–709, 1977.

GRUBER, N. *et al.* Spatiotemporal patterns of carbon-13 in the global surface oceans and the oceanic Suess effect. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, v. 13, p. 307–335, 1999.

GUERRA, S. P. S.; EUFRADE JUNIOR, H. J. **Recuperação energética da biomassa de tocos e raízes de florestas plantadas**. Botucatu: FEPAF, 2019. 176 p.

HAKAMADA, R. E. *et al.* Influence of stand density on growth and water use efficiency in *Eucalyptus* clones. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 466, p. 118-125, 2020.

HARLOW, B. A.; MARSHALL, J. D.; ROBINSON, A. P. A multi-species comparison of $\delta^{13}\text{C}$ from whole wood, extractive-free wood and holocellulose. **Tree Physiology**, Oxford, v. 26, p. 767–774, 2006.

HERES, A. M. *et al.* Drought-induced mortality selectively affects Scots pine trees that show limited intrinsic water-use efficiency responsiveness to raising atmospheric CO_2 . **Functional Plant Biology**, Collingwood, v. 41, p. 244–256, 2013.

HSING, T. Y. *et al.* Características dendrométricas, químicas e densidade básica da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* X *Eucalyptus urophylla*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 1, p. 273-283, 2016.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Dados do Relatório Ibá 2018**. Brasília: IBA, 2018. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/digital-sumarioexecutivo-2018.pdf>. Acesso em: 12 maio 2019.

IGLESIAS-TRABADO, G.; WILSTERMANN, D. ***Eucalyptus universalis*. Global cultivated eucalypt forests map 2009**. [S. l.]: GIT Forestry Consulting's Eucalyptologics. Disponível em: <http://www.gifforestry.com>. Acesso em: 11 ago. 2019.

INDERMUHLE, A. *et al.* Holocene carbon-cycle dynamics based on CO_2 trapped in ice at Taylor Dome, Antarctica. **Nature**, London, v. 398, p. 121–126, 1999.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate change and land**. Genebra: IPCC, 2019. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/08/4.-SPM_Approved_Microsite_FINAL.pdf. Acesso em: 11 out. 2020.

KENNEDY, B. V.; KROUSE, H. R. Isotope fractionation by plants and animals: implications for nutrition research. **Canadian Journal Physiology and Pharmacology**, Ottawa, v. 68, p. 960-972, 1990.

KIRDYANOV, A. *et al.* The importance of early summer temperature and date of snow melt for tree growth in the Siberian Subarctic. **Trees**, Berlin, v. 17, p. 61–69, 2003.

KÖHLER, I. H. *et al.* Intrinsic water-use efficiency of temperate seminatural grassland has increased since 1857: an analysis of carbon isotope discrimination of herbage from the park grass experiment. **Global Change Biology**, Oxford, v. 16, p. 1531–1541, 2010.

LARA, W. *et al.* Modeling patterns between drought and tree biomass growth from dendrochronological data: a multilevel approach. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, p. 140–151, sept. 2013.

LIMA, I. L.; GARCIA J. N. Variação da densidade aparente e resistência à compressão paralela às fibras em função da intensidade de desbaste, adubação e posição radial em *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 551-559, 2010.

LIMA, V. L. F. **Isótopos estáveis de carbono e nitrogênio para identificação de cama de aviário na alimentação de bovinos** 2018. 72 f. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2018.

LOADER, N. J. *et al.* Comparison of stable carbon isotope ratios in the whole wood, cellulose and lignin of oak tree-rings. **Palaeogeograph Palaeoclimatol Palaeoecology**, Amsterdam, v. 196, p. 395–407, 2003.

LOPES, C. S. D. *et al.* Estudo da massa específica básica e da variação dimensional da madeira de três espécies de eucalipto para a indústria moveleira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 315-322, 2011.

MACEDO, R. L. G. *et al.* Desenvolvimento inicial de *Tectona grandis* L.f. (teca) em diferentes espaçamentos no município de Paracatu, MG. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 1, p. 61-69, 2005.

MAGALHAES, M. A. *et al.* Estimates of mass and energy of different genetic material *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 41, n. 3, p. e 410302, 2017.

MALONEY, T. M. **Modern particleboard & dry process fiberboard manufacturing**. San Francisco: Miller Freeman, 1989. 672 p.

MARSHALL, J.; MONSERUD, R. Homeostatic gas-exchange parameters inferred from $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ in tree rings of conifers. **Oecologia**, v. 105, p. 13–21, 1996.

MARSHALL, J. D.; MONSERUD, R.A. Co-occurring species differ in tree-ring delta O-18 trends. **Tree Physiology**, Oxford, v. 26, p. 1055–1066, 2006.

MIGLIORINI, A. J. **Variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill Ex. Maiden em função de diferentes níveis de produtividade da floresta.** 1986. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1986.

MOKFIENSKI, A. *et al.* A importância relativa da densidade da madeira e do teor de carboidratos no rendimento da polpa e na qualidade do produto. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, p. 401-413, 2008.

MOULIN, J. C. *et al.* Efeito do espaçamento, idade e irrigação no volume e densidade básica do eucalipto. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 24, p. 1-10, 2017.

OLIVEIRA, B. R. U. *et al.* Correlações dendroclimatológicas do *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden na região de Rio Claro, RJ. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 499-508, set. 2011.

OLIVEIRA, F. G. R. *et al.* Influência da seção transversal na velocidade ultra-sônica na madeira de *Eucalyptus citriodora*. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 197-203, 2005.

OLIVEIRA, J. G. L. *et al.* Parâmetros quantitativos da anatomia da madeira de eucalipto que cresceu em diferentes locais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 559-567, 2012.

OLIVEIRA, J. T. 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**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 115-127, 2005.

PALERMO, G. P. M. *et al.* Delimitação entre os lenhos juvenil e adulto de *Pinus elliottii* engelm. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 1, p. 191-200, 2013.

PAULA, M. H. *et al.* Utilização de métodos não destrutivos para caracterização simplificada da madeira de cumaru (*dipteryx odorata* willd). **Biodiversidade**, Rondonópolis, v. 15, n. 2, p. 136-149, 2016.

PEREIRA, B. L. C. *et al.* Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 545-557, 2016.

PFLUG, E. E. *et al.* Growth cessation uncouples isotopic signals in leaves and tree rings of drought-exposed oak trees. **Tree Physiology**, Oxford, v. 35, p. 1095-1105, 2015.

POLICY, H. W. *et al.* Increase in C3 plant water-use efficiency and biomass over glacial to present CO₂ concentrations. **Nature**, London, v. 361, p. 61-64, 1993.

QUEIROZ, E. C. *et al.* Determinação da razão isotópica delta ^{13}C em bebidas comerciais a base de laranja. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, p. 1085-1094, 2009.

RATCLIFFE, R. G.; SHACHAR-HILL, Y. Measuring multiple fluxes through plant metabolic networks. **The Plant Journal**, Oxford, v. 45, n. 4, p. 490–511, 2006.

REMADE. **Origens**: o eucalipto e suas origens. REMADE, 2002. Disponível em: http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=20. Acesso em: 18 jun. 2019.

REZENDE, M. A. **Uma abordagem não convencional sobre as principais características físicas da madeira, com ênfase para retratibilidade, massa específica e técnica de atenuação da radiação gama**. 1997. 138 f. Tese (Livre-Docência) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1997.

RINNE K. T. *et al.* Investigating the influence of sulphur dioxide (SO_2) on the stable isotope ratios (^{13}C and ^{18}O) of tree rings. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, Oxford, v. 74, p. 2327–2339, 2010.

ROBERTSON, I. *et al.* $\delta^{13}\text{C}$ of tree-ring lignin as an indirect measure of climate change. **Water Air Soil Pollution**, Dordrecht, v. 4, p. 531–544. 2004.

SANTOS, L. C. *et al.* 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.

SANTOS, S. R. **Influência da qualidade da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e do processo kraft de polpação na qualidade da polpa branqueada**. 2005. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SAURER, M. *et al.* Correlating delta C-13 and delta O-18 in cellulose of trees. **Plant Cell Environment**, Oxford, v. 20, p. 1543–1550, 1997.

SCHIFMAN, L. A. *et al.* Carbon isotope variation in shrub willow (*Salix* spp.) ring-wood as an indicator of long-term water status, growth and survival. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 36, p. 316–326, 2012.

SEIBT, U. *et al.* Carbon isotopes and water use efficiency: sense and sensitivity. **Oecologia**, Berlin, v. 155, p. 441–454, 2008.

SETTE JUNIOR, C. R. *et al.* Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1183–1190, 2012.

SETTE JUNIOR, C. R. *et al.* Relationship between climate variables, trunk growth

rate and wood density of *Eucalyptus grandis* W. Mill ex Maiden trees. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 40, n. 2, p. 337–346, 2016.

SHI, R. *et al.* Towards a systems approach for lignin biosynthesis in *Populus trichocarpa*: transcript abundance and specificity of the monolignol biosynthetic genes. **Plant Cell Physiology**, Tokyo, v. 51, p. 144–163, 2010.

SOARES, N. S. *et al.* Competitividade da cadeia produtiva da madeira de eucalipto no Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 917–928, 2010.

TARGA, L. A.; BALLARIN, A. W.; BIAGGIONI, M. A. M. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 291–299, 2005.

VALE, R. S. *et al.* Efeito da desrama artificial na qualidade da madeira de clones de eucalipto em sistema agrossilvipastoril. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 285–297, 2002.

VIDAL, J. M. *et al.* Preservação de madeiras no brasil: histórico, cenário atual e tendências. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 257–271, 2015.

VIDAURRE, G. *et al.* Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 18, n. 4, p. 469–480, 2011.

VOLTAS, J. A. retrospective, dual-isotope approach reveals individual predispositions to winter-drought induced tree dieback in the southernmost distribution limit of Scots pine. **Plant Cell Environment**, Oxford, v. 36, p. 1435–1448, 2013.

APÊNDICE A - Variabilidade da densitometria radial das procedências clonais (C) e seminais (S), submetidas ao déficit hídrico, pelo Método de Atenuação da Radiação Gama – (TARG) do gênero *Eucalyptus*. Dado: Foram utilizadas as amostras submetidas ao déficit hídrico (CD e SD) e ao tratamento convencional (CN e SN), utilizando as amostras a 12,5; 37,5 e 62,5% da altura comercial

Figura - Variação densitométrica das amostras CD de *Eucalyptus*. Dados – A figura nomeada com o a letra (A) corresponde à porcentagem da altura comercial de 12,5%, (B) corresponde a 37,5% e a (C) corresponde a 62,5% da altura comercial

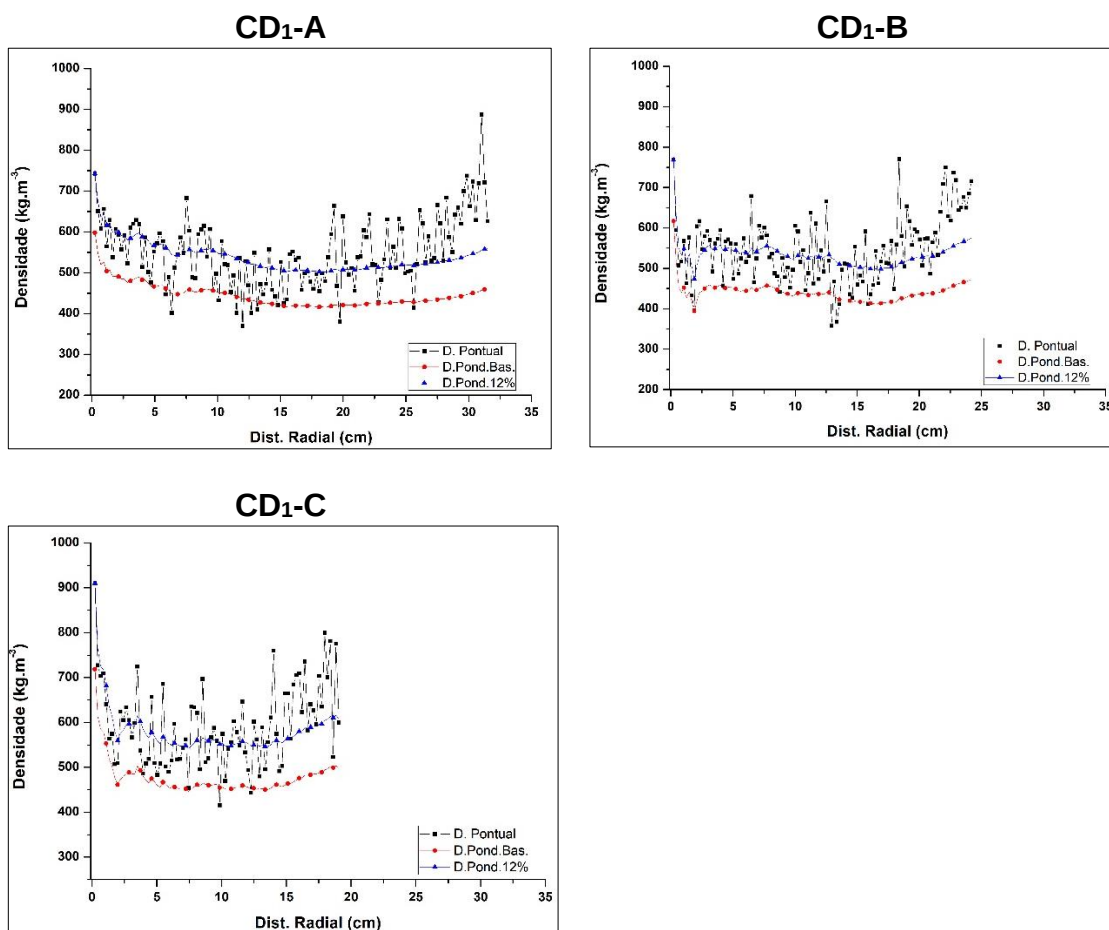


Figura - Variação densitométrica das amostras *CD* de *Eucalyptus*. Dados – A figura nomeada com o a letra (A) corresponde à porcentagem da altura comercial de 12,5%, (B) corresponde a 37,5% e a (C) corresponde a 62,5% da altura comercial

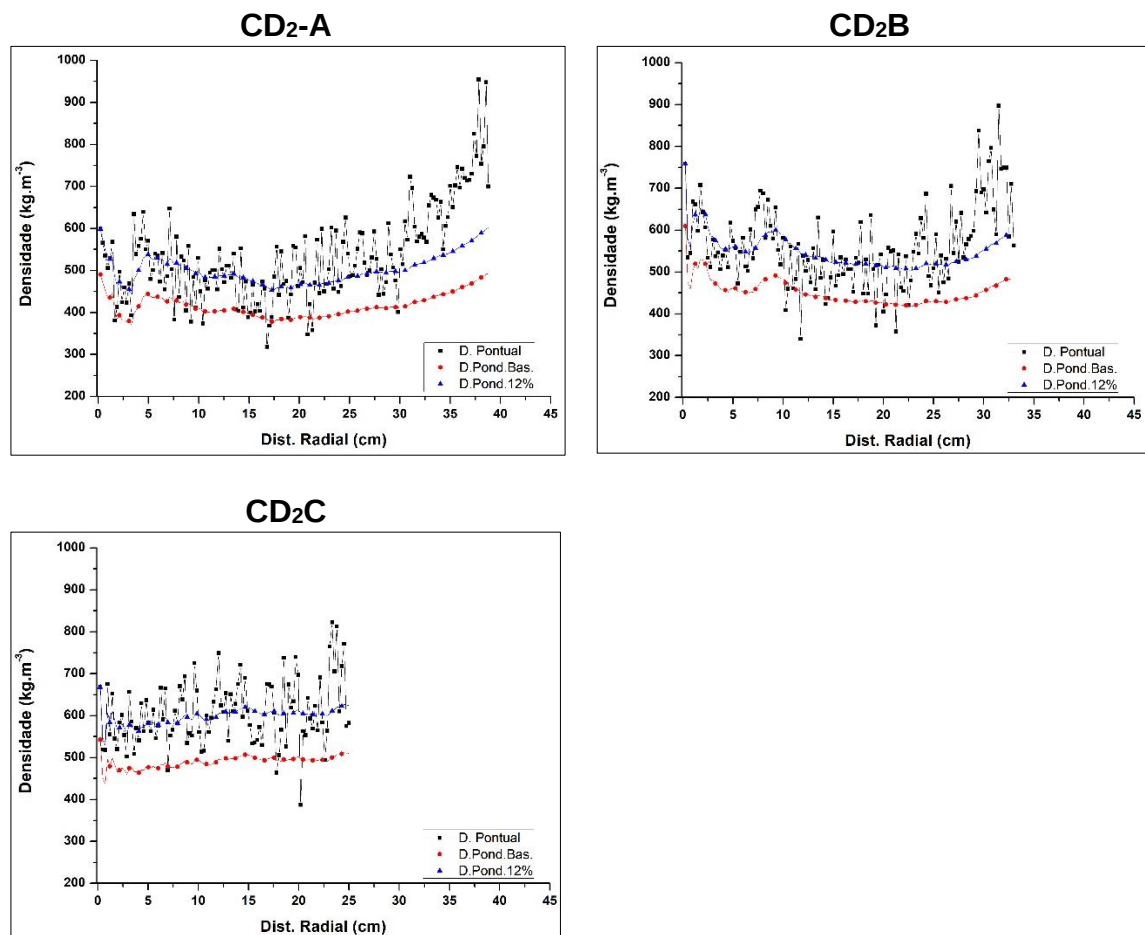


Figura - Variação densitométrica das amostras CD de *Eucalyptus*. Dados – A figura nomeada com o a letra (A) corresponde à porcentagem da altura comercial de 12,5%, (B) corresponde a 37,5% e a (C) corresponde a 62,5% da altura comercial

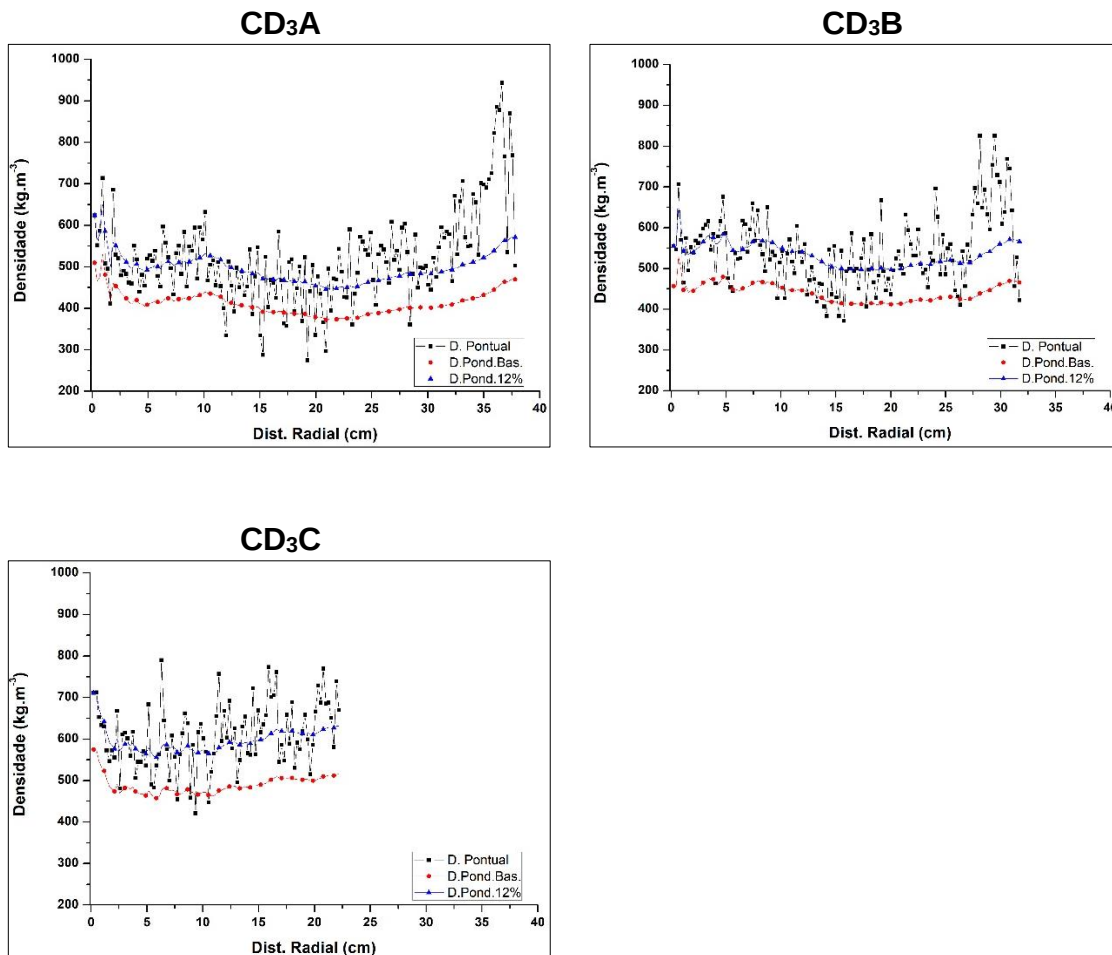


Figura - Variação densitométrica das amostras CD de *Eucalyptus*. Dados – A figura nomeada com o a letra (A) corresponde à porcentagem da altura comercial de 12,5%, (B) corresponde a 37,5% e a (C) corresponde a 62,5% da altura comercial

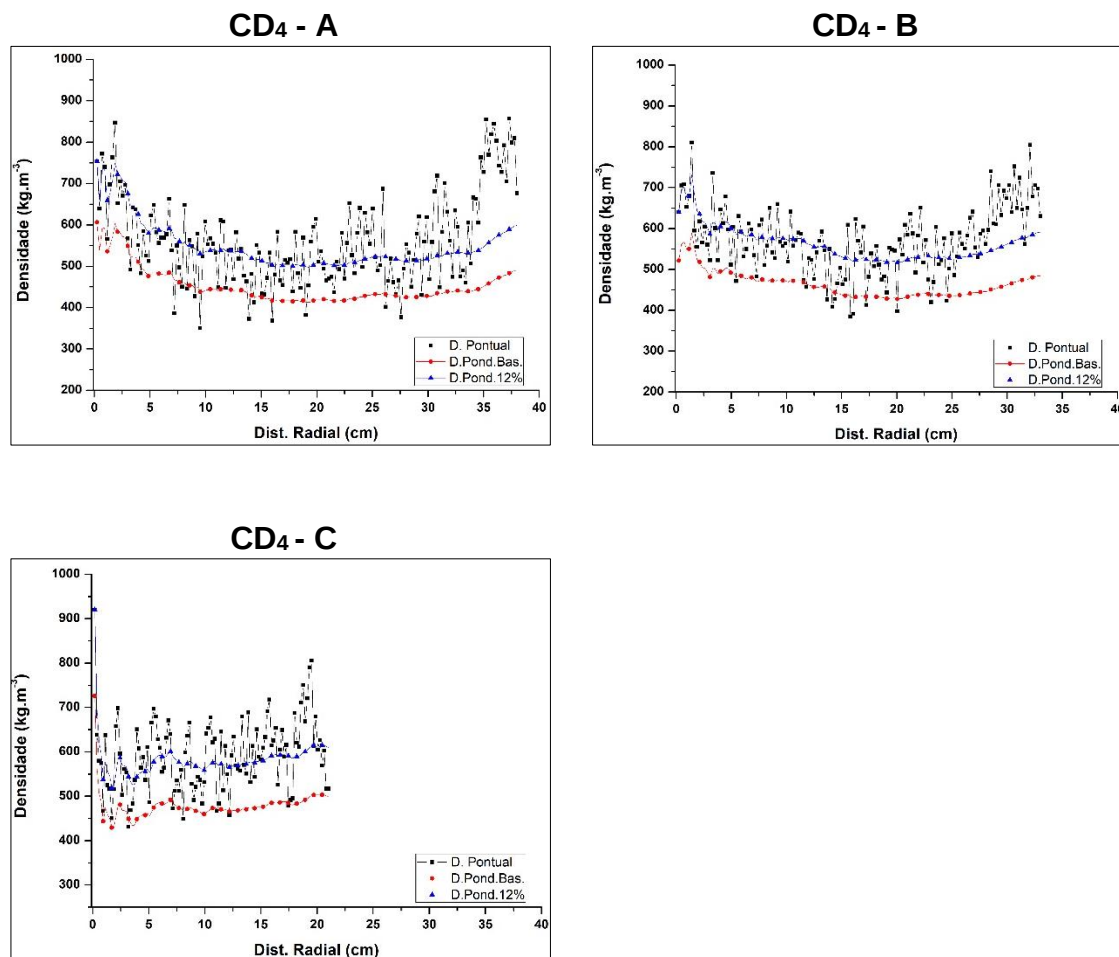


Figura - Variação densitométrica das amostras CD de *Eucalyptus*. Dados – A figura nomeada com o a letra (A) corresponde à porcentagem da altura comercial de 12,5%, (B) corresponde a 37,5% e a (C) corresponde a 62,5% da altura comercial

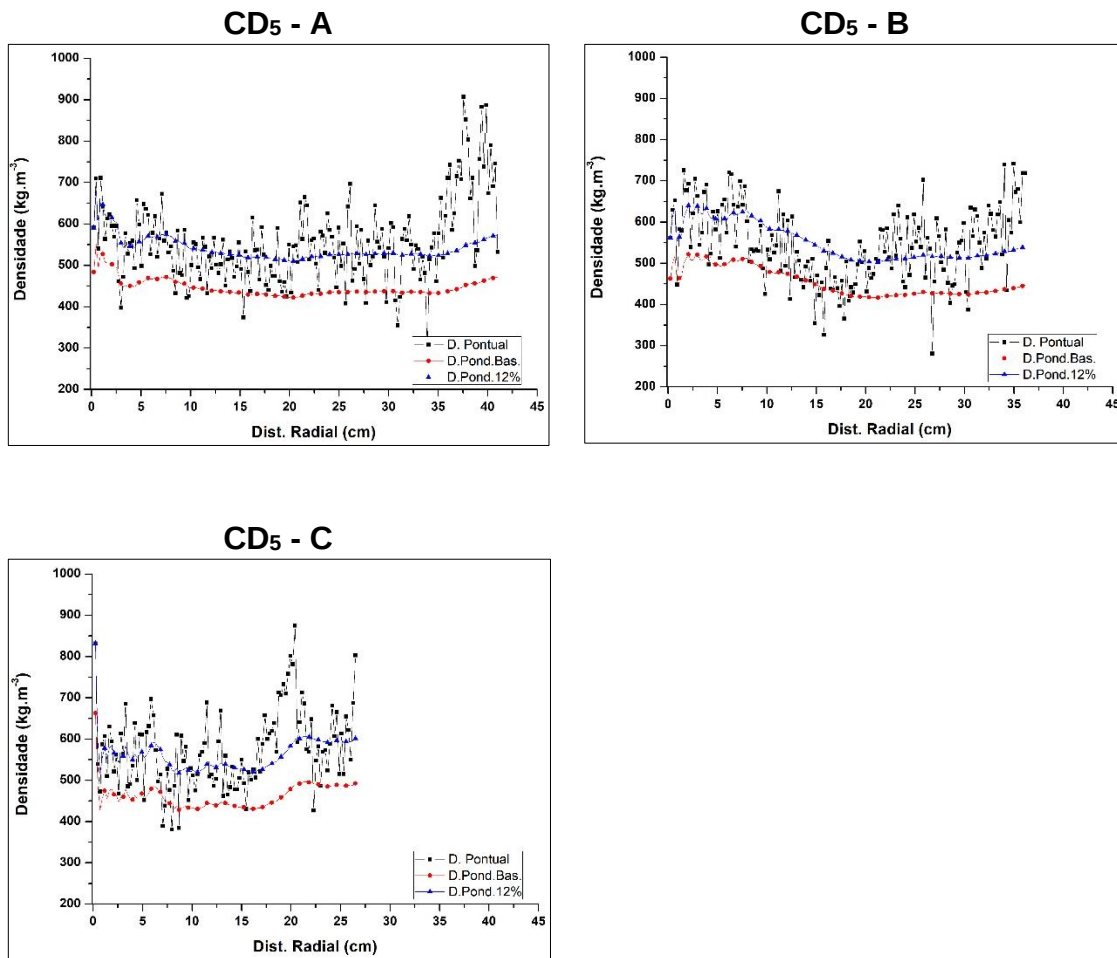


Figura - Variação densitométrica das amostras CN de *Eucalyptus*. Dados – A figura nomeada com o a letra (A) corresponde à porcentagem da altura comercial de 12,5%, (B) corresponde a 37,5% e a (C) corresponde a 62,5% da altura comercial

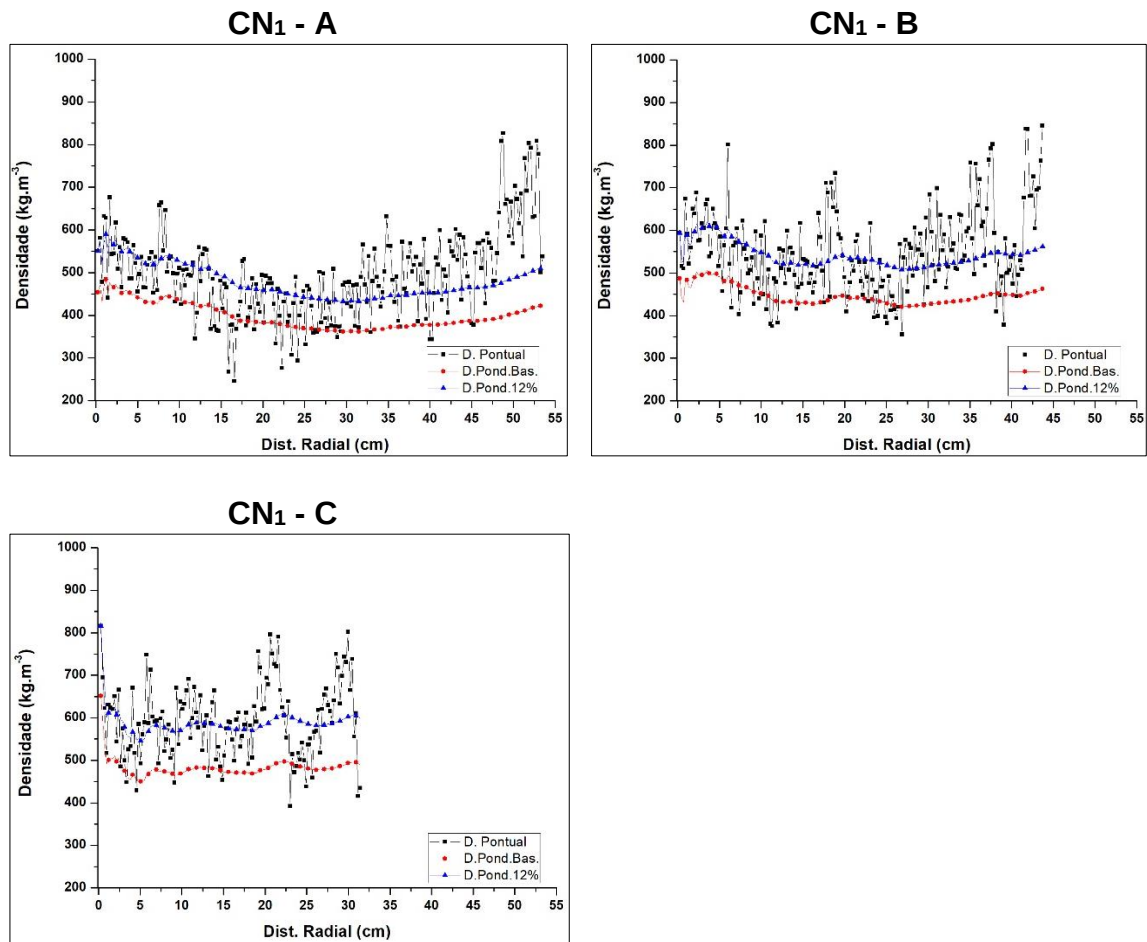


Figura - Variação densitométrica das amostras CN de *Eucalyptus*. Dados – A figura nomeada com o a letra (A) corresponde à porcentagem da altura comercial de 12,5%, (B) corresponde a 37,5% e a (C) corresponde a 62,5% da altura comercial

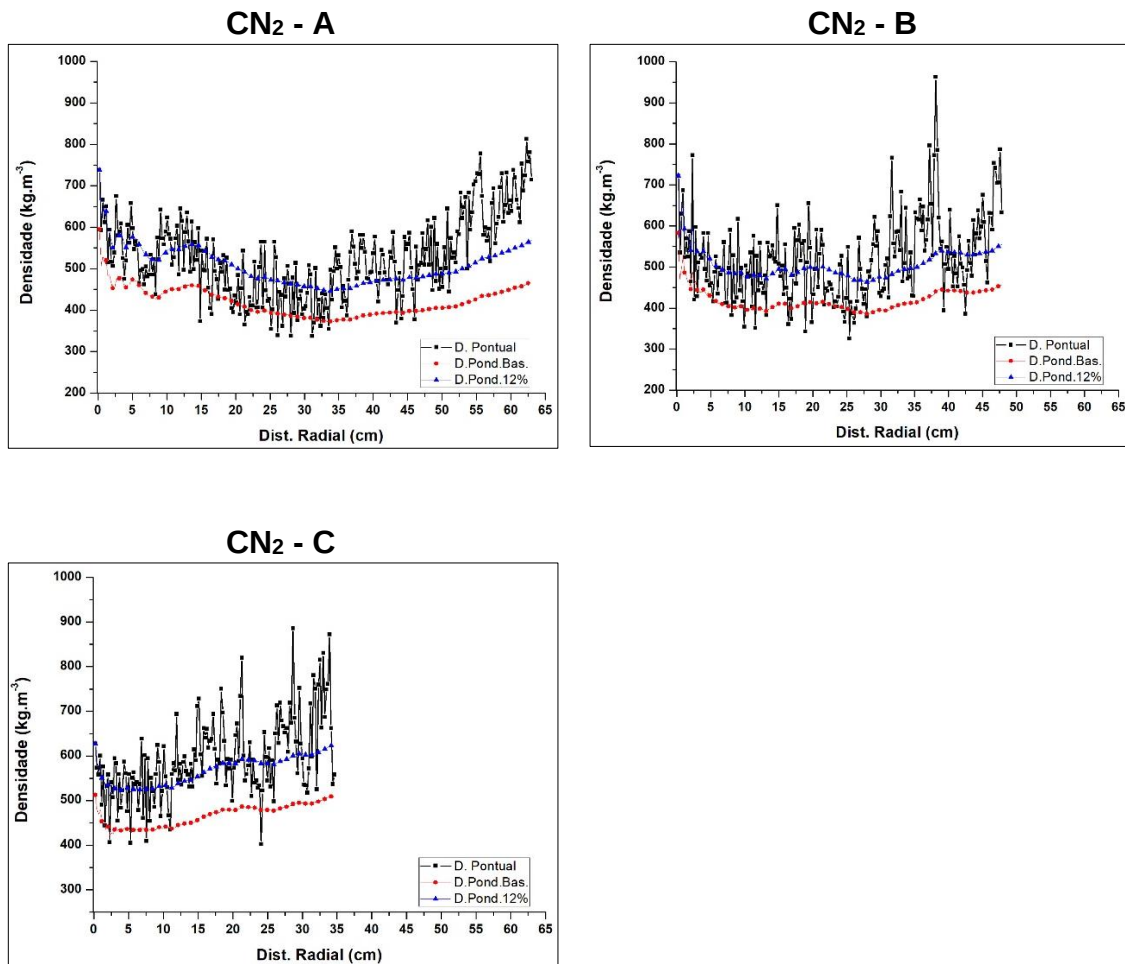


Figura - Variação densitométrica das amostras CN de *Eucalyptus*. Dados – A figura nomeada com o a letra (A) corresponde à porcentagem da altura comercial de 12,5%, (B) corresponde a 37,5% e a (C) corresponde a 62,5% da altura comercial

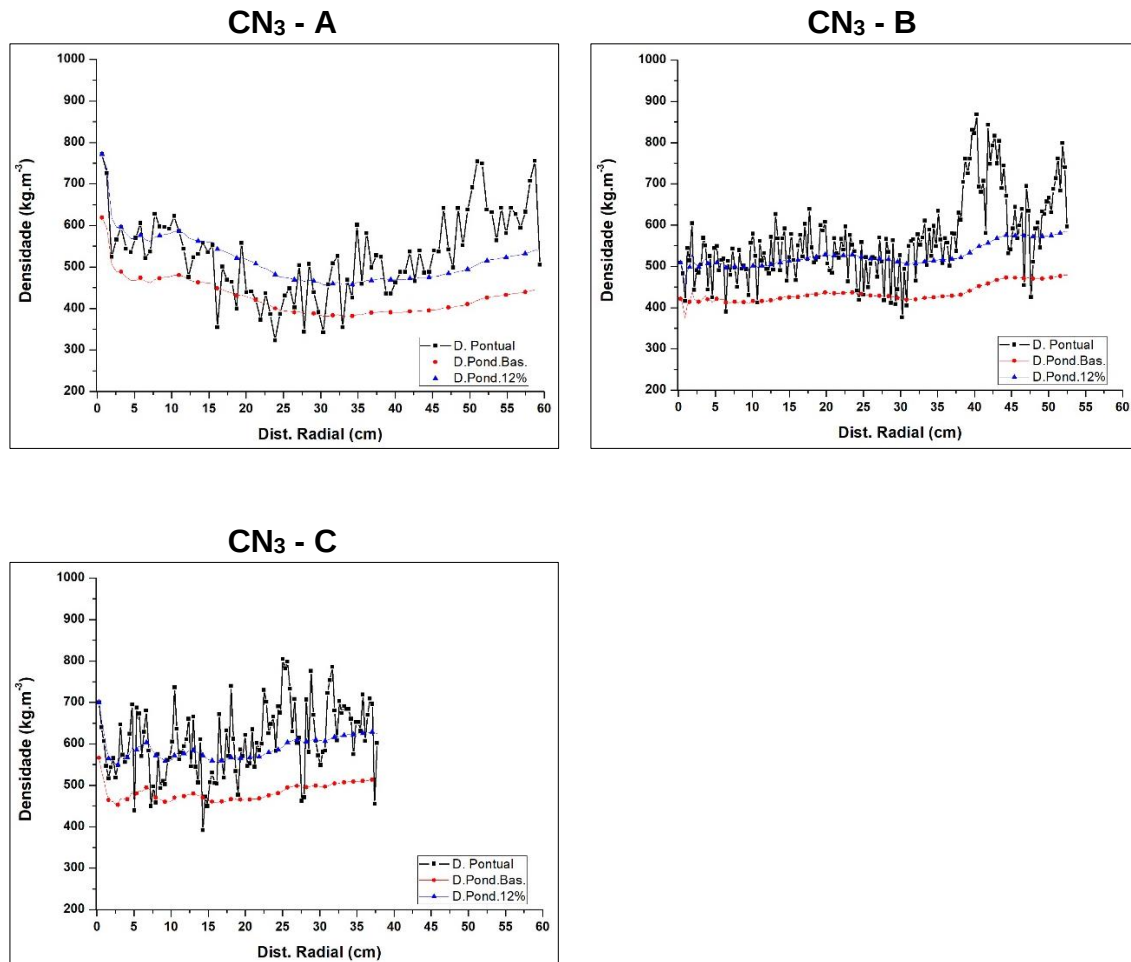


Figura - Variação densitométrica das amostras CN de *Eucalyptus*. Dados – A figura nomeada com o a letra (A) corresponde à porcentagem da altura comercial de 12,5%, (B) corresponde a 37,5% e a (C) corresponde a 62,5% da altura comercial

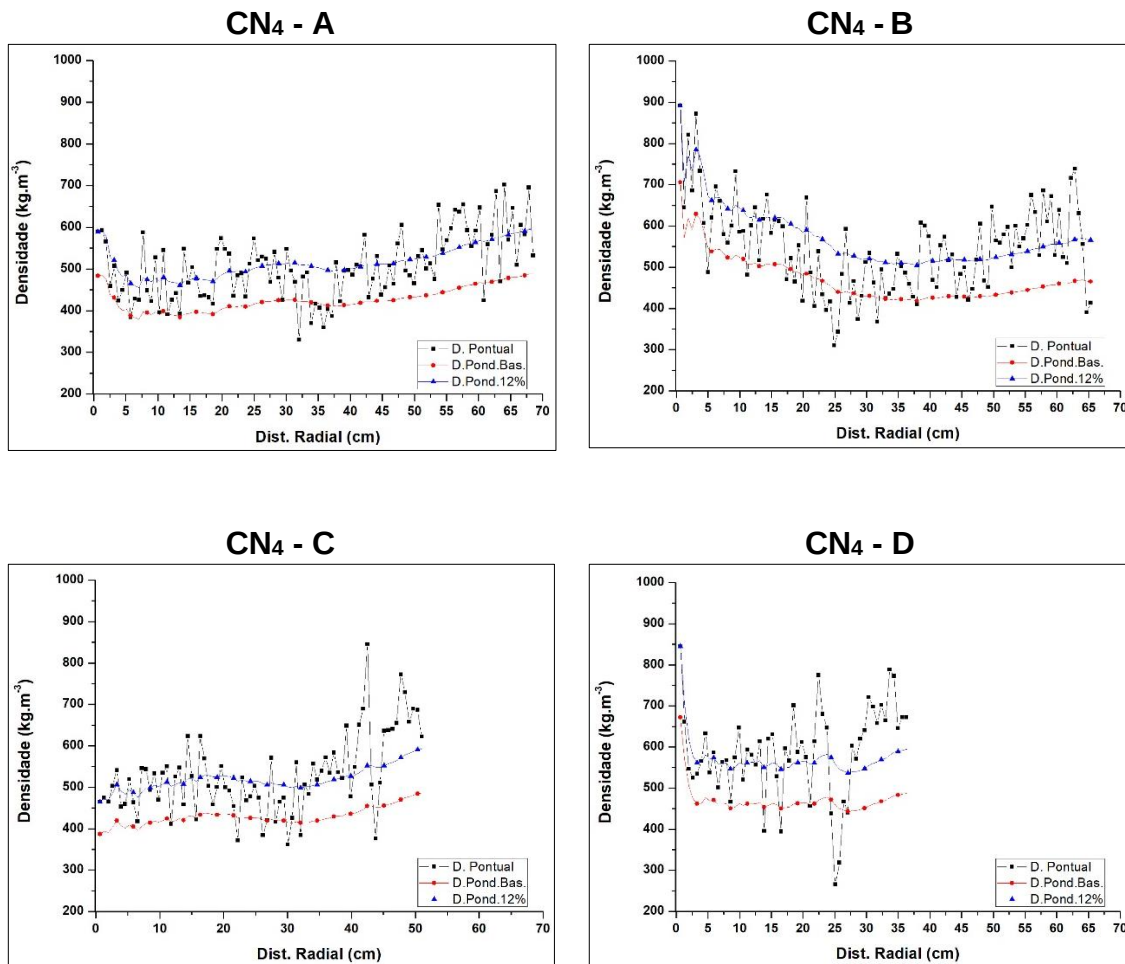


Figura - Variação densitométrica das amostras CN de *Eucalyptus*. Dados – A figura nomeada com o a letra (A) corresponde à porcentagem da altura comercial de 12,5%, (B) corresponde a 37,5% e a (C) corresponde a 62,5% da altura comercial

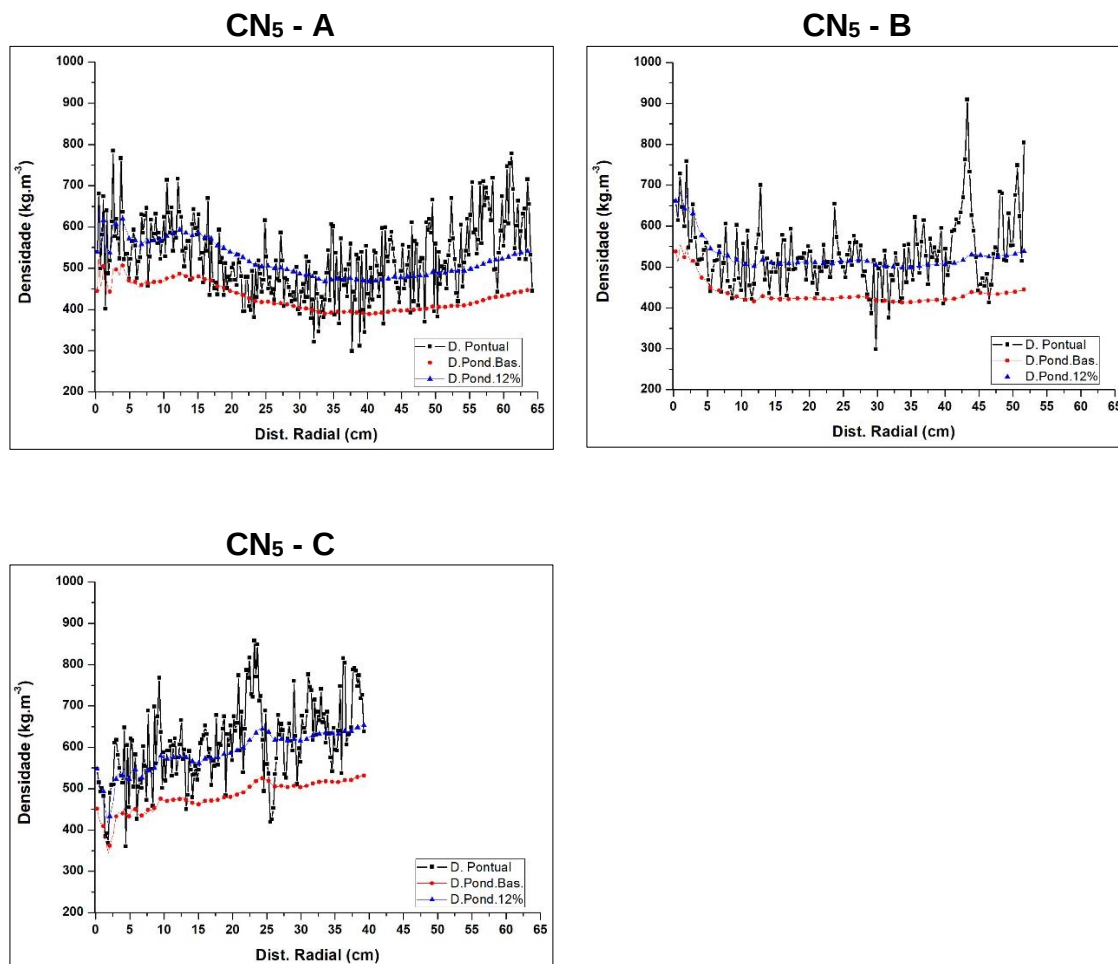


Figura - Variação densitométrica das amostras SD de *Eucalyptus*. Dados – A
figura nomeada com o a letra (A) corresponde à porcentagem da altura
comercial de 12,5%, (B) corresponde a 37,5% e a (C) corresponde a 62,5% da
altura comercial

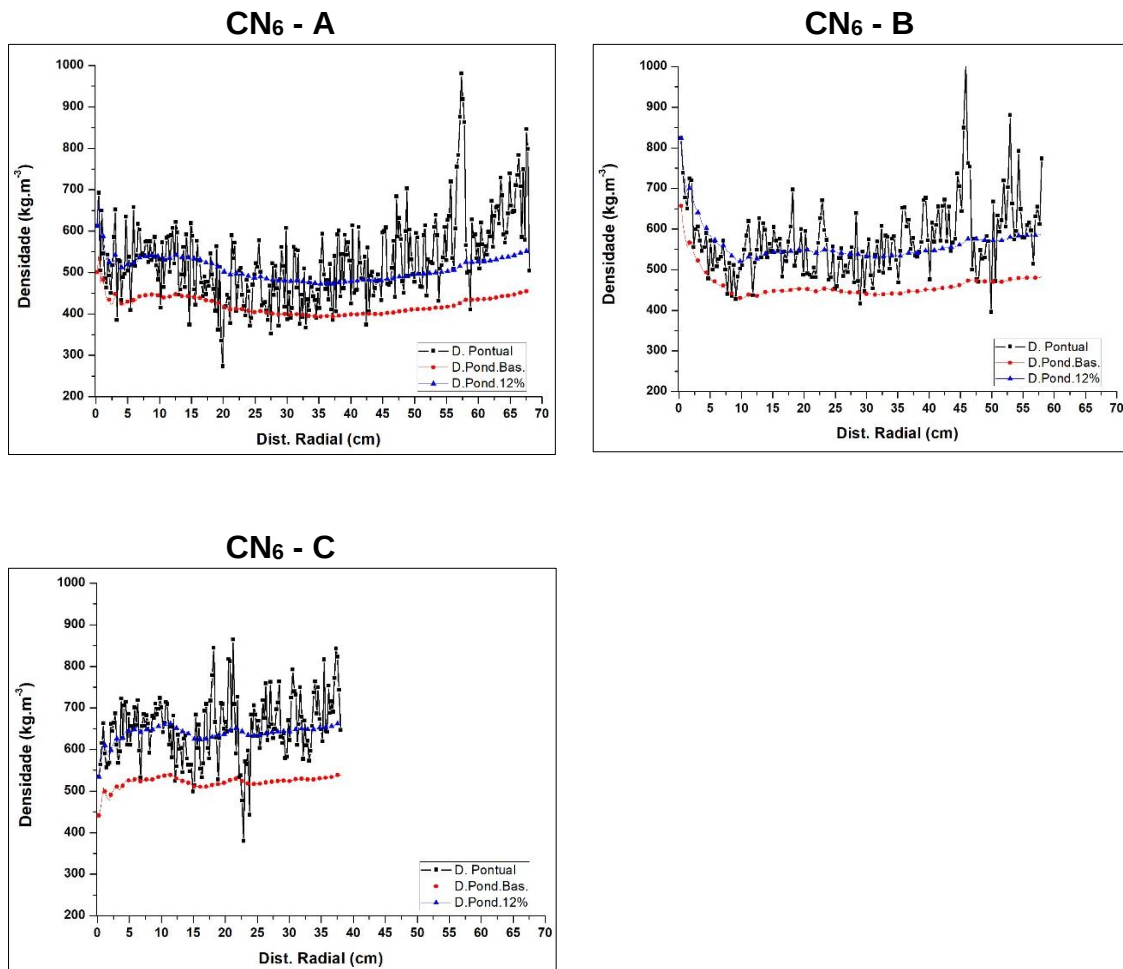


Figura - Variação densitométrica das amostras SD de *Eucalyptus*. Dados – A figura nomeada com o a letra (A) corresponde à porcentagem da altura comercial de 12,5%, (B) corresponde a 37,5% e a (C) corresponde a 62,5% da altura comercial

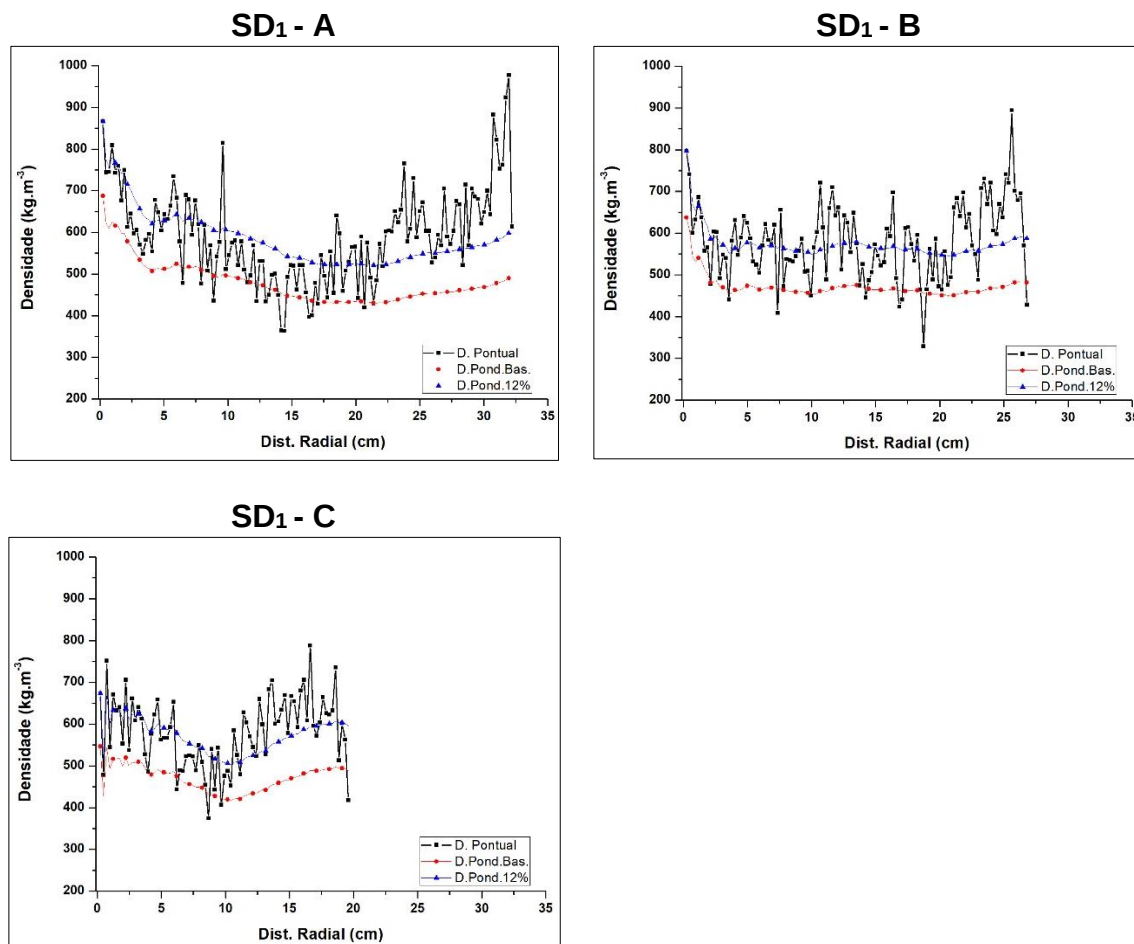


Figura - Variação densitométrica das amostras SD de *Eucalyptus*. Dados – A figura nomeada com o a letra (A) corresponde à porcentagem da altura comercial de 12,5%, (B) corresponde a 37,5% e a (C) corresponde a 62,5% da altura comercial

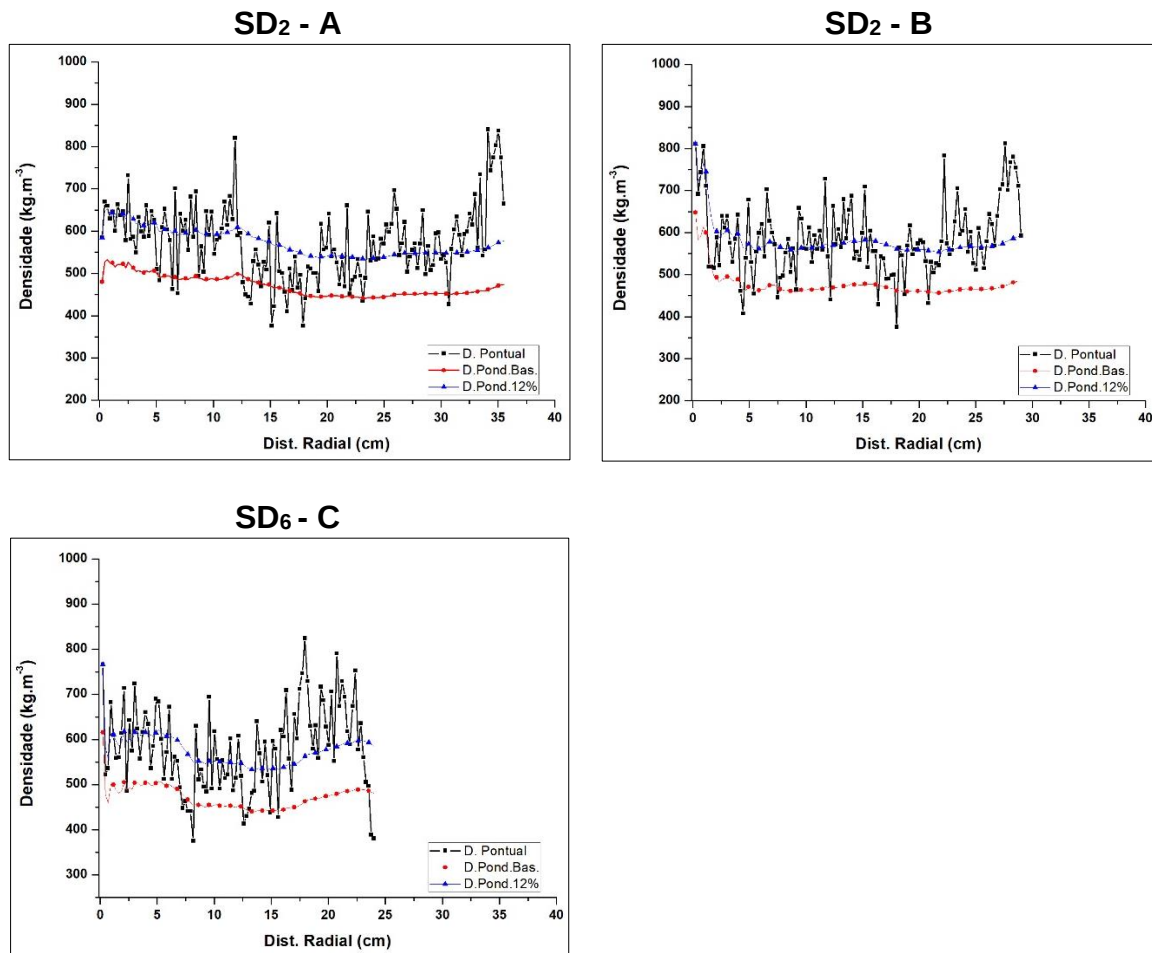


Figura - Variação densitométrica das amostras SD de *Eucalyptus*. Dados – A figura nomeada com o a letra (A) corresponde à porcentagem da altura comercial de 12,5%, (B) corresponde a 37,5% e a (C) corresponde a 62,5% da altura comercial

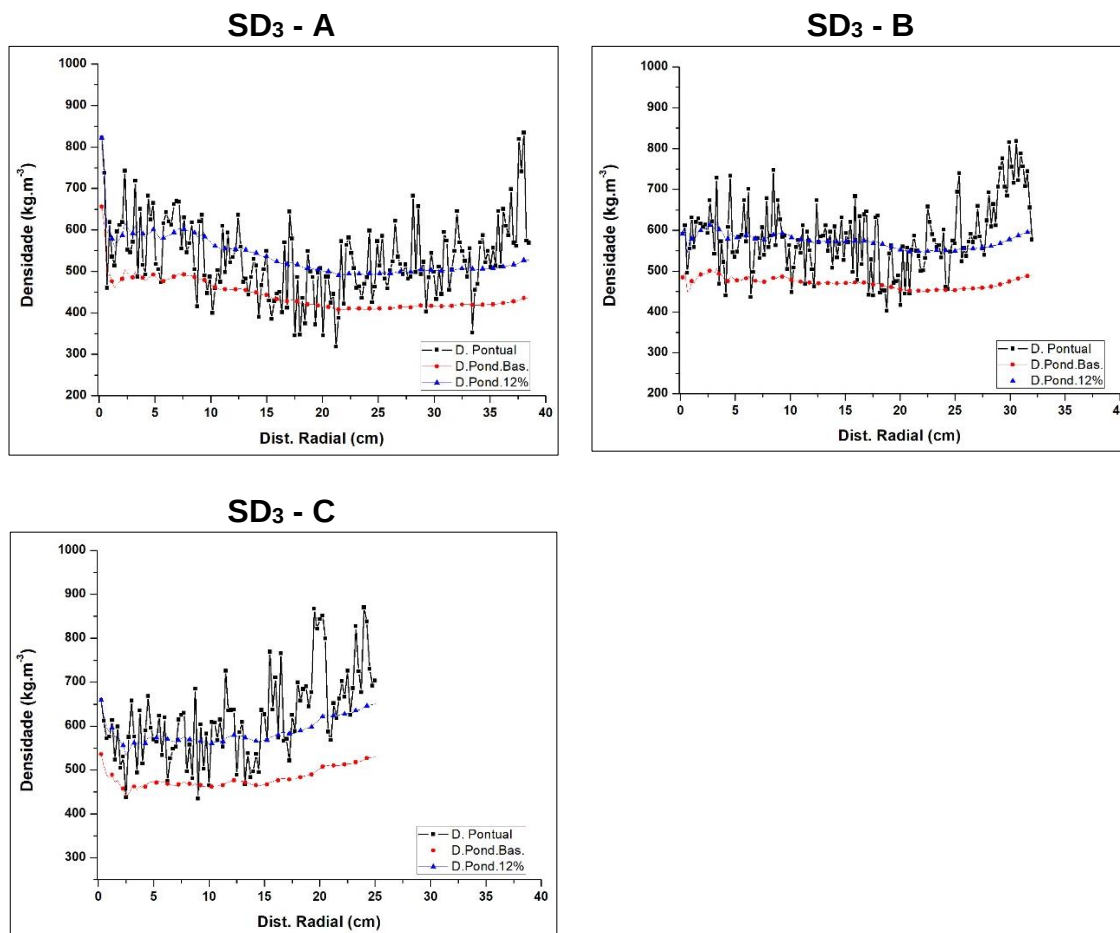


Figura - Variação densitométrica das amostras SD de *Eucalyptus*. Dados – A figura nomeada com o a letra (A) corresponde à porcentagem da altura comercial de 12,5%, (B) corresponde a 37,5% e a (C) corresponde a 62,5% da altura comercial

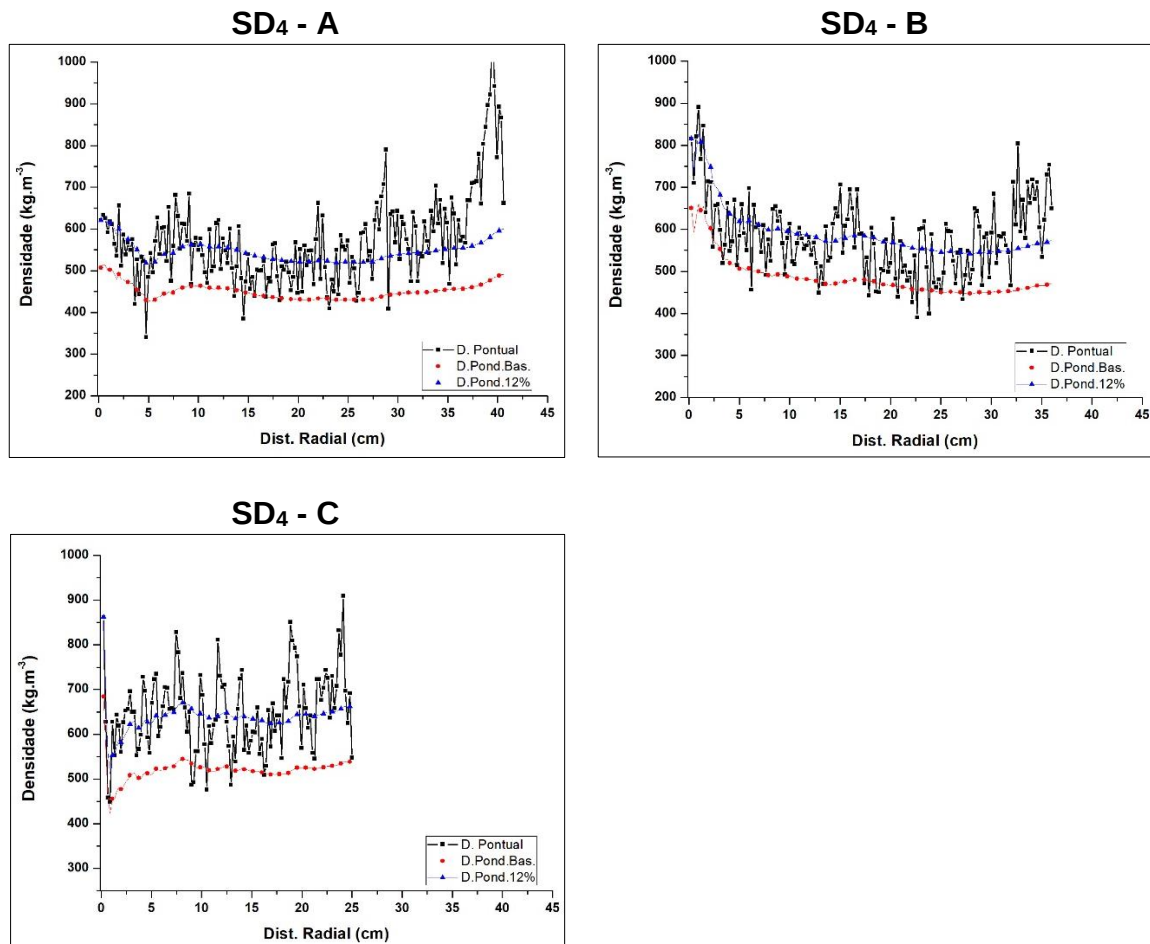


Figura - Variação densitométrica das amostras SD de *Eucalyptus*. Dados – A figura nomeada com o a letra (A) corresponde à porcentagem da altura comercial de 12,5%, (B) corresponde a 37,5% e a (C) corresponde a 62,5% da altura comercial

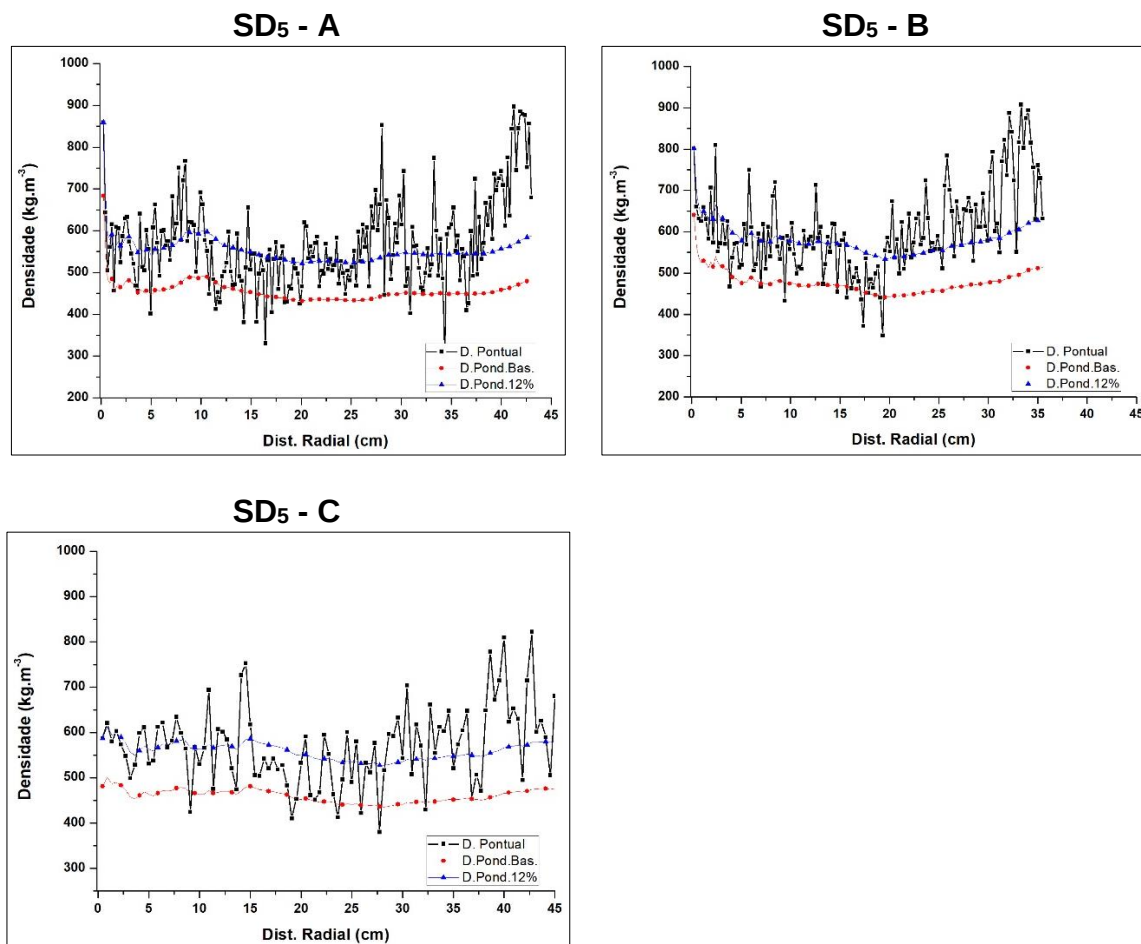


Figura - Variação densitométrica das amostras SD de *Eucalyptus*. Dados – A figura nomeada com o a letra (A) corresponde à porcentagem da altura comercial de 12,5%, (B) corresponde a 37,5% e a (C) corresponde a 62,5% da altura comercial

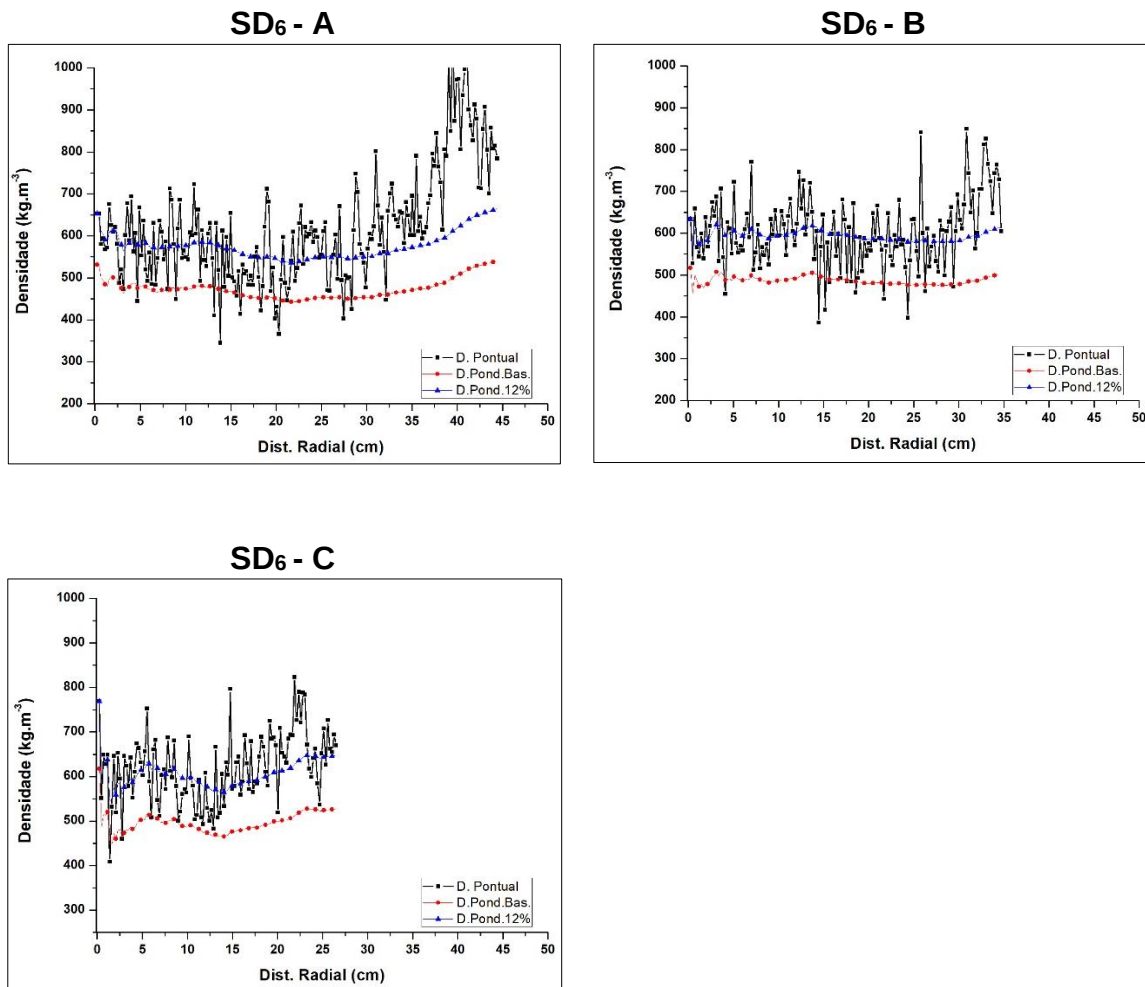


Figura - Variação densitométrica das amostras SN de *Eucalyptus*. Dados – A figura nomeada com o a letra (A) corresponde à percentagem da altura comercial de 12,5%, (B) corresponde a 37,5% e a (C) corresponde a 62,5% da altura comercial

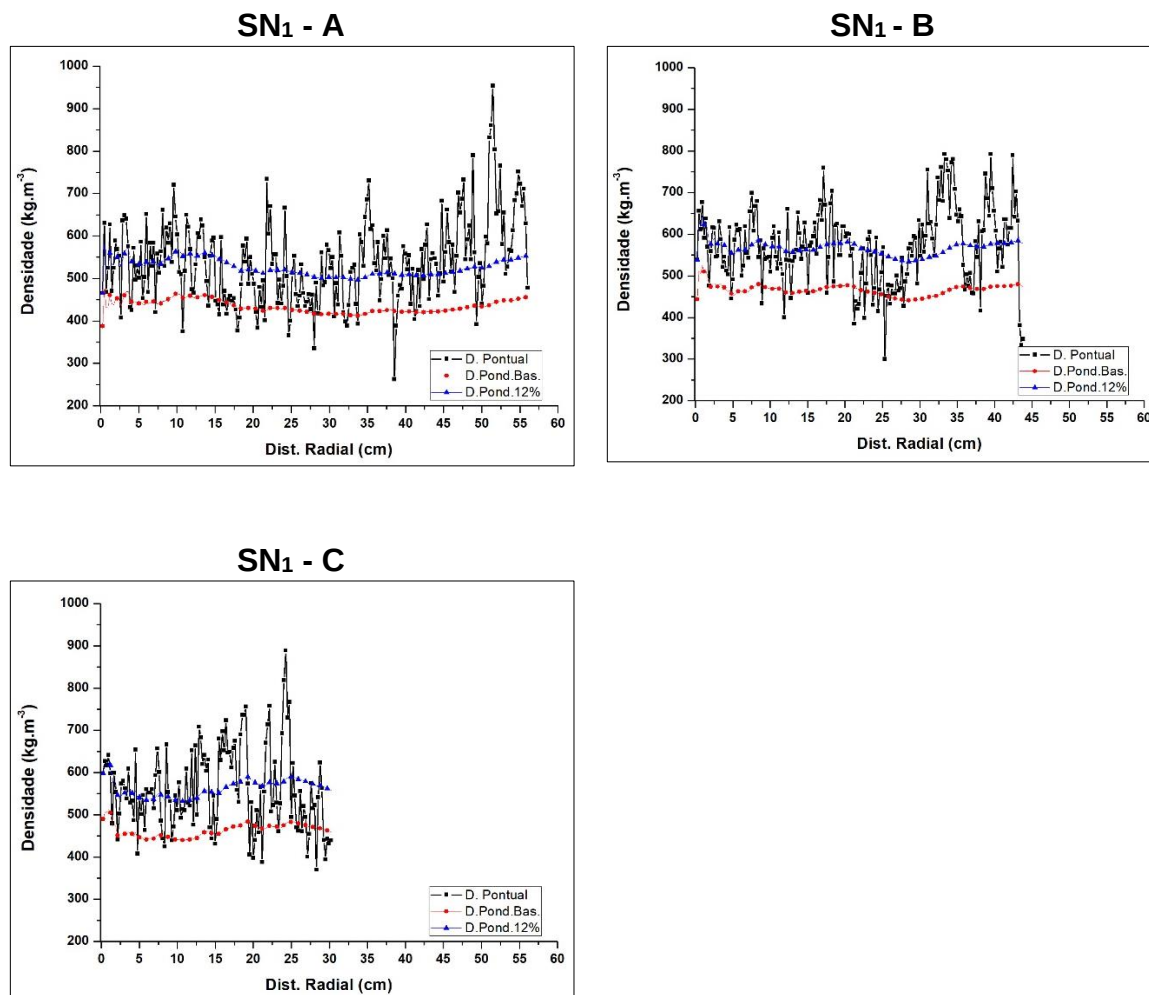


Figura - Variação densitométrica das amostras SN de *Eucalyptus*. Dados – A figura nomeada com o a letra (A) corresponde à porcentagem da altura comercial de 12,5%, (B) corresponde a 37,5% e a (C) corresponde a 62,5% da altura comercial

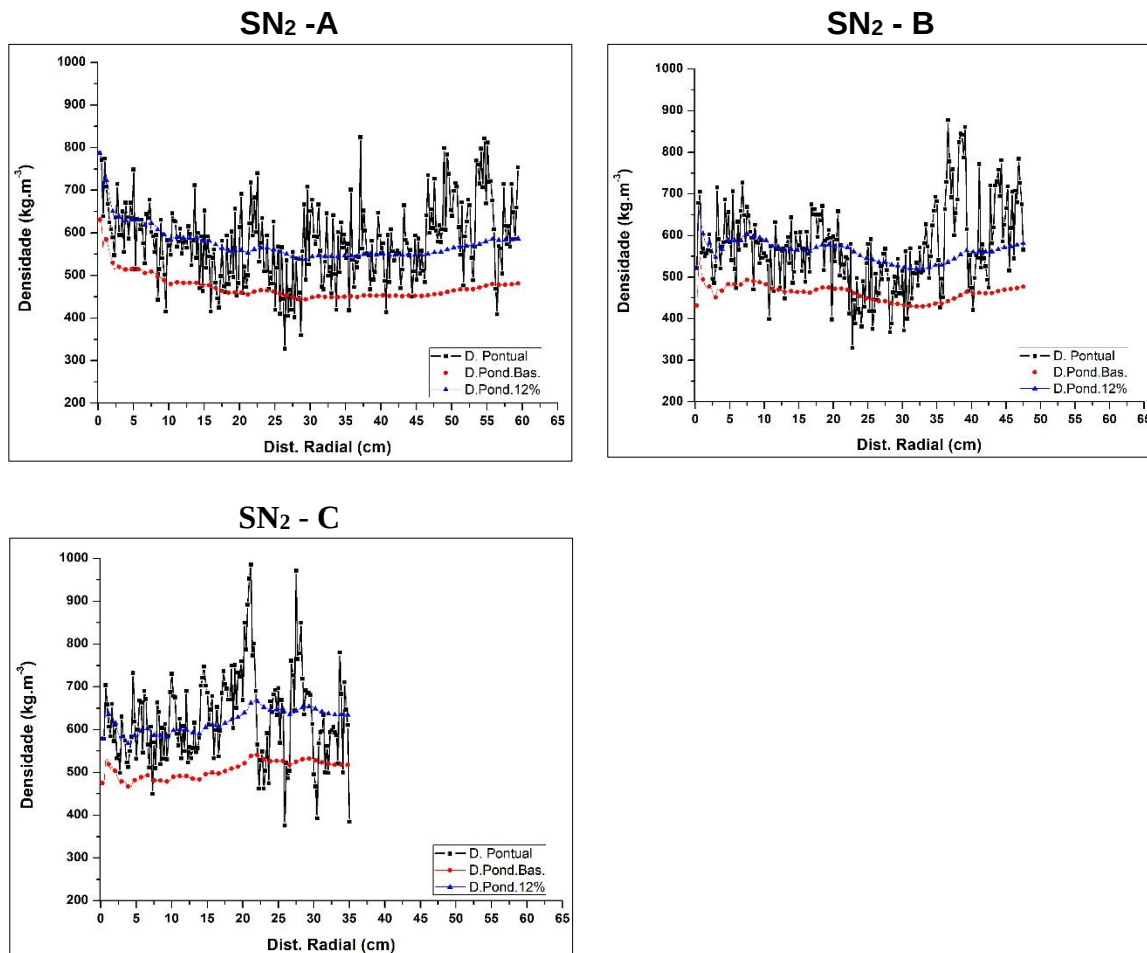


Figura - Variação densitométrica das amostras SN de *Eucalyptus*. Dados – A figura nomeada com o a letra (A) corresponde à porcentagem da altura comercial de 12,5%, (B) corresponde a 37,5% e a (C) corresponde a 62,5% da altura comercial

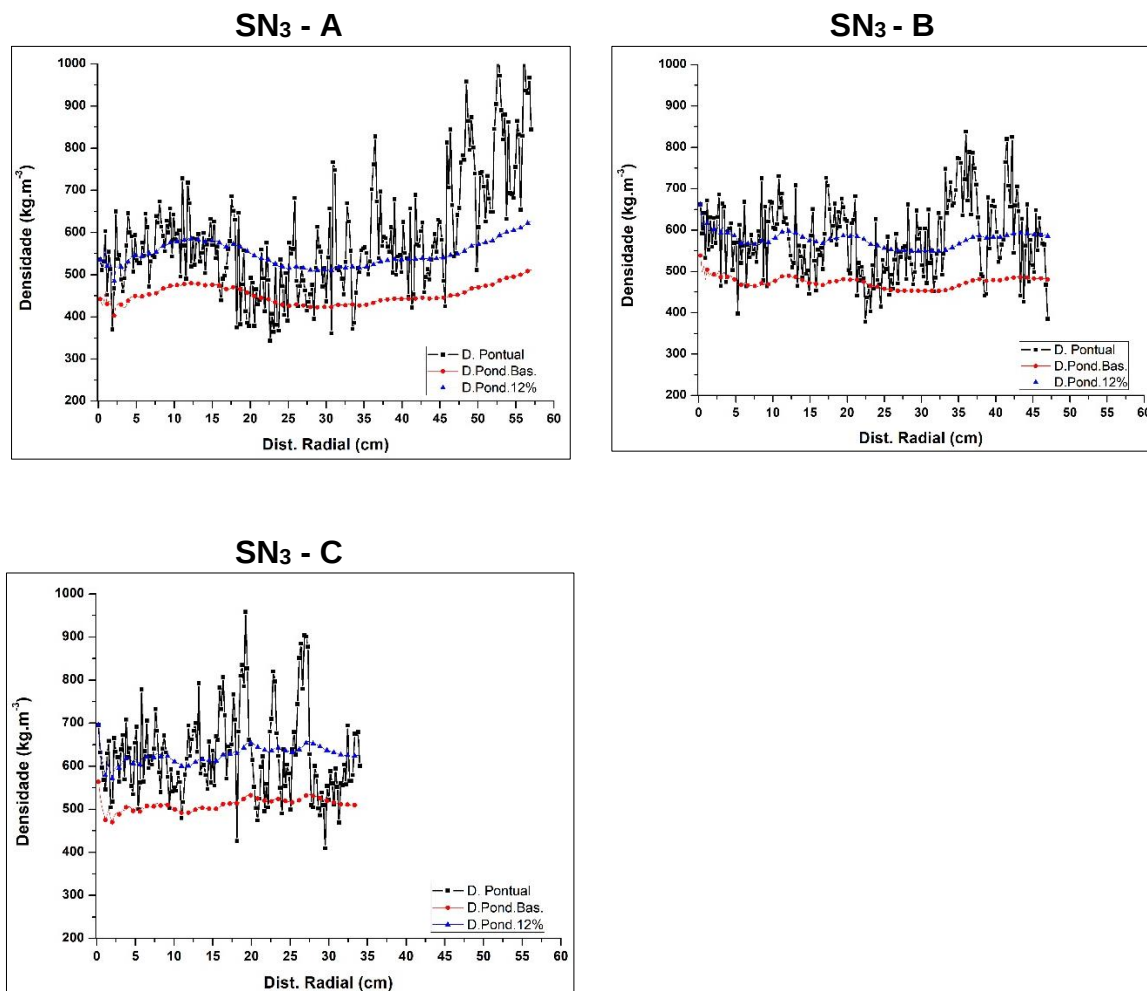


Figura - Variação densitométrica das amostras SN de *Eucalyptus*. Dados – A figura nomeada com o a letra (A) corresponde à porcentagem da altura comercial de 12,5%, (B) corresponde a 37,5% e a (C) corresponde a 62,5% da altura comercial

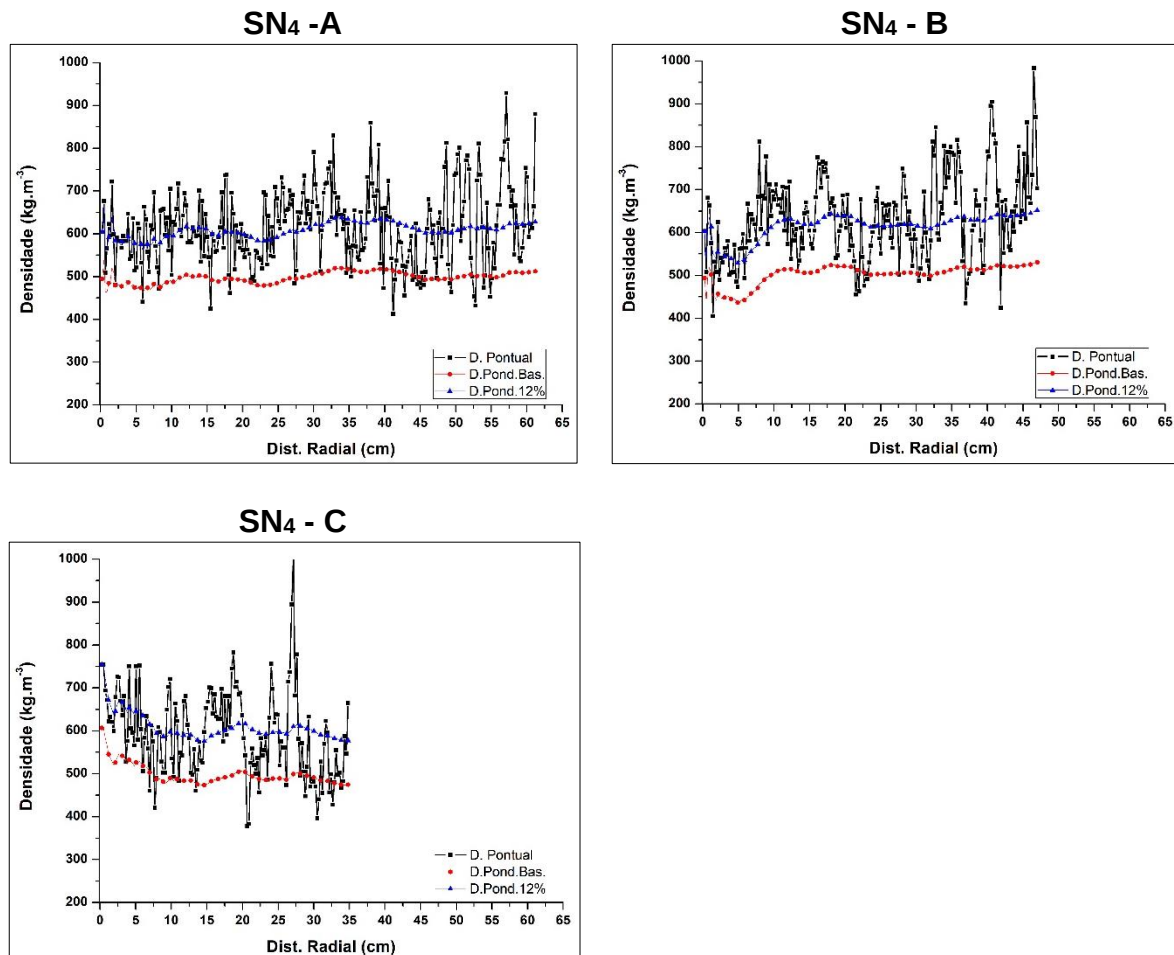


Figura - Variação densitométrica das amostras SN de *Eucalyptus*. Dados – A figura nomeada com o a letra (A) corresponde à porcentagem da altura comercial de 12,5%, (B) corresponde a 37,5% e a (C) corresponde a 62,5% da altura comercial

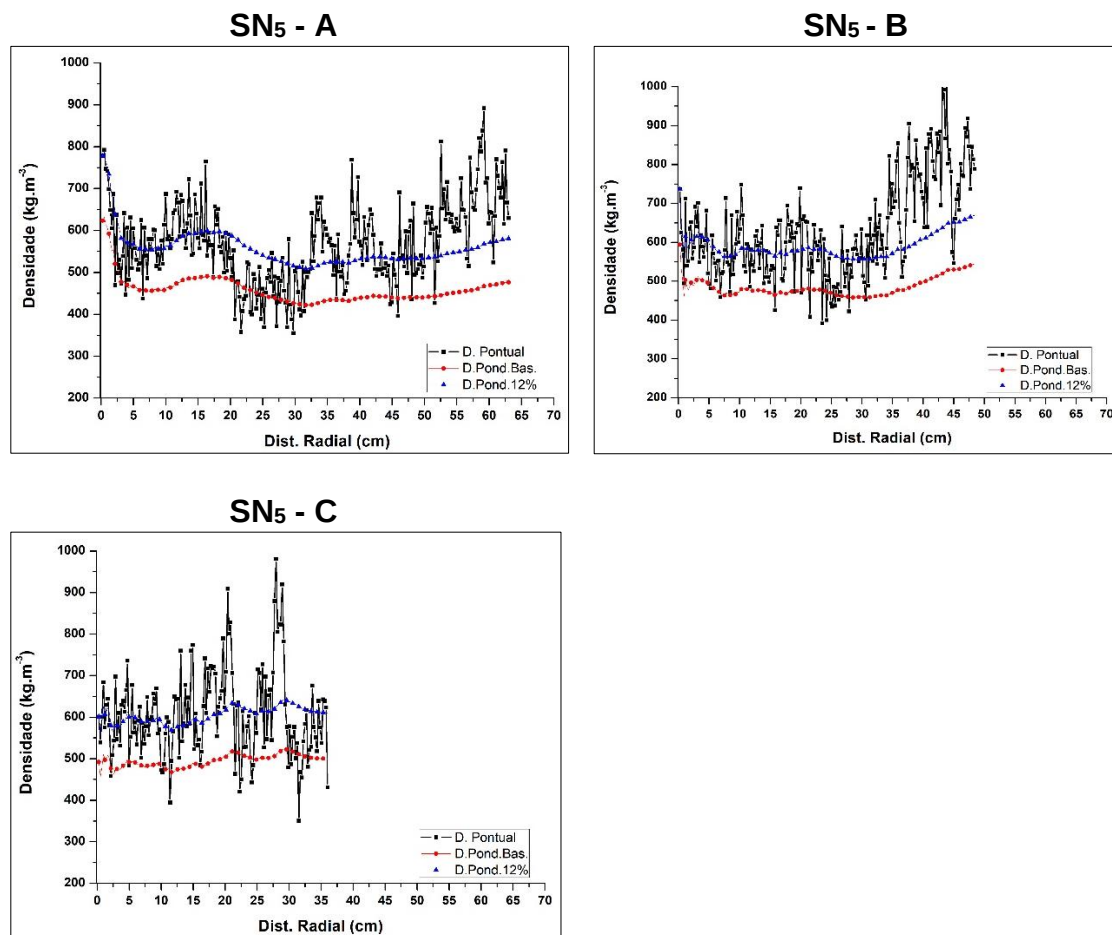
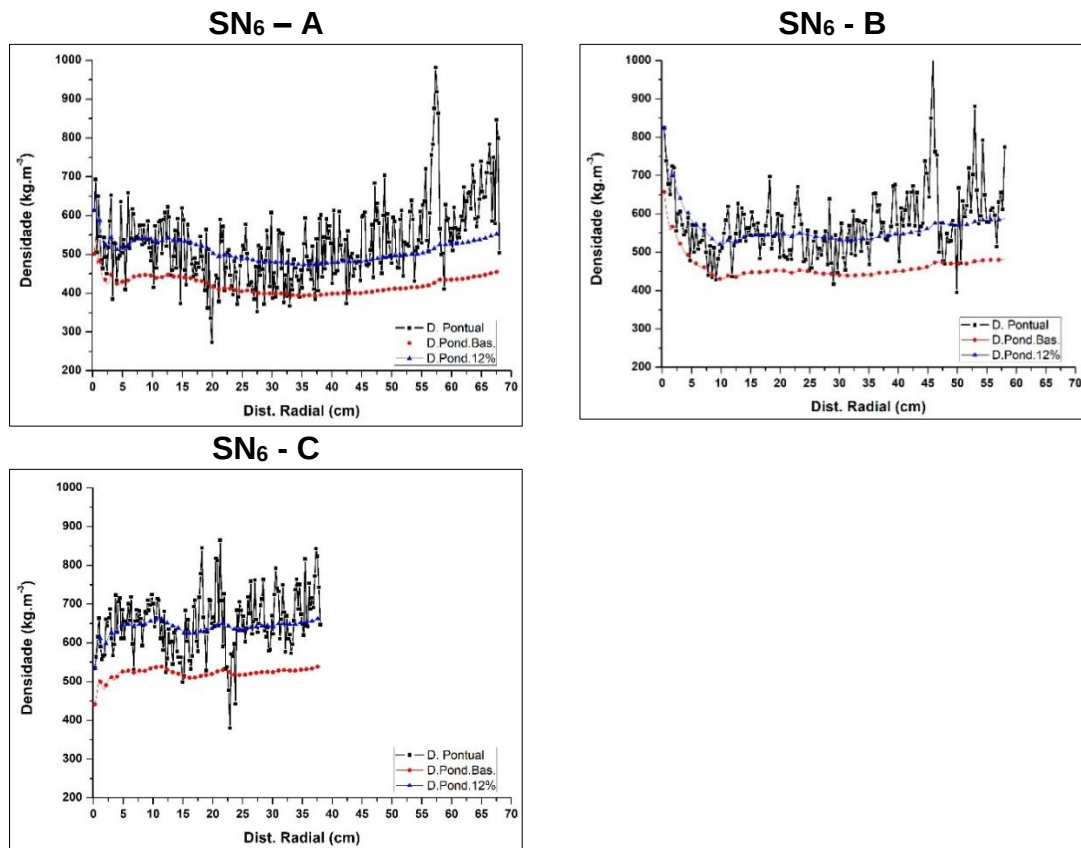


Figura - Variação densitométrica das amostras SN de *Eucalyptus*. Dados – A figura nomeada com o a letra (A) corresponde à porcentagem da altura comercial de 12,5%, (B) corresponde a 37,5% e a (C) corresponde a 62,5% da altura comercial



APÊNDICE B - Resultados obtidos pelos métodos de determinação de densidade (kg.m^{-3}) a 12% de umidade, dos discos direção longitudinal das procedências do gênero *Eucalyptus*. Dados: Foram utilizadas as amostras submetidas ao déficit hídrico (CD e SD) e ao tratamento convencional (CN e SM), utilizando as amostras a 12,5 a 87,5% da altura comercial

Densidade (kg.m^{-3})						
Método TARG						
Amostra	Imersão	MPB	Gama	Média aritmética	Mediana	Área do disco (cm^2)
CD _{1A}	610	635	599	549	538	25,52
CD _{1B}	597	583	576	548	547	18,55
CD _{1C}	624	617	604	590	575	11,10
CD _{1D}	586	583	-----	-----	-----	4,20
CD _{2A}	600	598	598	534	517	48,03
CD _{2B}	588	601	588	562	546	32,07
CD _{2C}	627	646	621	607	596	18,86
CD _{2D}	626	648	-----	-----	-----	6,79
CD _{3A}	576	571	568	521	512	48,03
CD _{3B}	570	561	563	544	538	31,57
CD _{3C}	636	624	628	609	603	15,34
CD _{3D}	646	620	-----	-----	-----	4,99
CD _{4A}	594	584	595	566	553	48,77
CD _{4B}	584	585	588	572	570	31,77
CD _{4C}	611	601	607	592	594	18,25
CD _{4D}	625	635	-----	-----	-----	5,64
CD _{5A}	580	566	570	557	549	53,59
CD _{5B}	600	592	594	546	539	37,39
CD _{5C}	611	591	598	574	570	22,56
CD _{5D}	628	651	----	----	----	3,87
CD _{6A}	584	560	----	----	----	72,62
CD _{6B}	602	605	----	----	----	48,67
CD _{6C}	642	649	----	----	----	29,61
CD _{6D}	653	661	----	----	----	6,83
CN _{1A}	550	543	531	495	490	92,63
CN _{1B}	587	579	585	552	539	59,45
CN _{1C}	625	604	624	594	591	32,17
CN _{1D}	573	584	----	----	----	8,35
CN _{2A}	554	564	559	528	517	108,25
CN _{2B}	576	573	578	522	513	67,93
CN _{2C}	658	682	647	594	583	36,96
CN _{2D}	572	571	----	----	----	10,64
CN _{3A}	551	531	508	529	530	112,72
CN _{3B}	576	551	575	565	549	77,60
CN _{3C}	627	627	624	608	605	38,48
CN _{3D}	626	608	----	----	----	10,75
CN _{4A}	581	555	586	506	501	137,26
CN _{4B}	555	564	556	547	538	116,06
CN _{4C}	587	584	583	529	519	72,08
CN _{4D}	617	612	619	589	593	37,39
CN _{4E}	602	584	----	----	----	
CN _{5A}	558	555	557	511	515	126,68
CN _{5B}	578	567	561	532	519	81,39
CN _{5C}	642	648	642	609	608	40,26
CN _{5D}	626	564	----	----	----	7,66
CN _{6A}	564	552	544	530	523	143,56
CN _{6B}	590	572	578	575	569	94,34
CN _{6C}	658	659	652	651	654	51,28
CN _{6D}	583	583	----	----	----	9,51

Continuação – APÊNDICE B - Resultados obtidos pelos métodos de determinação de densidade (kg.m^{-3}) a 12% de umidade, dos discos direção longitudinal das procedências clonais (C) e seminais (S) do gênero *Eucalyptus*. Dados: Foram utilizadas as amostras submetidas ao déficit hídrico (CD e SD) e ao tratamento convencional (CN e SN), utilizando as amostras a 12,5 a 87,5% da altura comercial

Densidade (kg.m^{-3})						
Método TARG						Área do disco (cm^2)
Amostras	Imersão	MPB	Gama	Média aritmética	Mediana	
SD _{1A}	585	576	579	539	533	30,78
SD _{1B}	603	616	603	581	576	20,43
SD _{1C}	635	631	609	580	585	12,32
SD _{1D}	612	616	----	----	----	2,90
SD _{2A}	585	588	573	575	571	40,26
SD _{2B}	597	598	595	586	572	27,15
SD _{2C}	595	601	585	581	578	17,20
SD _{2D}	642	436	----	----	----	4,15
SD _{3A}	590	594	757	533	518	45,36
SD _{3B}	614	617	596	584	576	32,13
SD _{3C}	624	649	629	619	613	18,25
SD _{3D}	639	631	----	----	----	4,15
SD _{4A}	601	600	596	573	561	52,04
SD _{4B}	605	591	605	582	580	36,32
SD _{4C}	651	643	657	649	650	20,03
SD _{4D}	593	566	----	----	----	7,83
SD _{5A}	593	583	585	571	561	57,55
SD _{5B}	618	615	608	605	585	38,40
SD _{5C}	636	649	627	580	580	23,41
SD _{5D}	625	633	----	----	----	4,89
SD _{6A}	582	596	608	619	604	58,09
SD _{6B}	603	608	593	604	600	39,82
SD _{6C}	637	640	626	620	624	22,56
SD _{6D}	604	615	----	----	----	8,55
SN _{1A}	593	568	585	539	533	91,61
SN _{1B}	602	581	594	572	571	59,17
SN _{1C}	606	548	600	561	547	31,99
SN _{1D}	602	602	----	----	----	5,23
SN _{2A}	584	583	580	580	580	107,15
SN _{2B}	596	641	598	571	566	67,29
SN _{2C}	618	641	614	625	611	37,18
SN _{2D}	595	606	----	----	----	8,28
SN _{3A}	591	582	608	586	561	99,58
SN _{3B}	621	626	621	581	574	65,81
SN _{3C}	589	525	582	625	617	38,26
SN _{3D}	578	566	----	----	----	6,27
SN _{4A}	588	601	591	615	612	111,22
SN _{4B}	608	604	607	633	625	75,12
SN _{4C}	596	597	595	593	584	36,75
SN _{4D}	637	621	----	----	----	8,48
SN _{5A}	634	690	635	570	565	128,28
SN _{5B}	653	613	651	630	607	81,07
SN _{5C}	627	631	628	607	597	36,75
SN _{5D}	611	485	----	----	----	7,55
SN _{6A}	597	606	595	573	567	114,23
SN _{6B}	591	602	594	580	567	67,93
SN _{6C}	629	641	629	617	601	37,18
SN _{6D}	598	583	----	----	----	6,47

APÊNDICE C - Densidade aparente (ρ_a) apresentada com média aritmética das amostras de 12,5 a 62,5% da altura comercial, obtidas pela variação pontual das procedências clonais (C) e seminais (S), determinada pelo Método de Atenuação da Radiação Gama (TARG) do gênero *Eucalyptus*. Dados: Foram utilizadas as amostras submetidas ao déficit hídrico (CD e SD) e ao tratamento convencional (CN e SN), utilizando as amostras a 12,5 a 87,5% da altura comercial

Nº	CD	ρ_a	CN	ρ_a	SD	ρ_a	SN	ρ_a
01	1A	549±69	1A	495±78	1A	592±87	1A	539±78
02	1B	548±66	1B	552±79	1B	581±71	1B	572±73
03	1C	590±75	1C	594±70	1C	580±68	1C	561±79
04	2A	534±85	2A	528±79	2A	575±69	2A	580±72
05	2B	562±73	2B	522±78	2B	586±66	2B	571±79
06	2C	607±61	2C	594±69	2C	581±78	2C	625±82
07	3A	521±79	3A	529±78	3A	533±73	3A	586±103
08	3B	544±68	3B	565±74	3B	584±66	3B	581±76
09	3C	609±63	3C	608±70	3C	619±75	3C	625±78
10	4A	566±87	4A	506±63	4A	573±78	4A	615±72
11	4B	572±65	4B	547±87	4B	582±71	4B	633±81
12	4C	592±66	4C	529±71	4C	649±69	4C	593±81
13	----	-----	4D	589±82	-----	-----	-----	-----
14	5A	557±74	5A	511±67	5A	571±82	5A	570±81
15	5B	546±74	5B	532±63	5B	605±81	5B	630±101
16	5C	574±75	5C	609±77	5C	580±70	5C	607±81
17			6A	530±77	6A	619±101	6A	573±81
18			6B	575±66	6B	604±65	6B	580±86
19			6C	651±60	6C	620±63	6C	617±77
Média Arit.		565±72		556±73		591±74		592±81

APÊNDICE D - Resultados da densidade aparente (ρ_a) e média aritmética dos discos obtida pelos Métodos de Imersão e o paquímetro das procedências clonais (C) e seminais (S) do gênero *Eucalyptus*. Dados: Foram utilizadas amostras submetidas ao déficit hídrico (CD e SD) e ao tratamento convencional (CN e SN), utilizando as amostras a 12,5 a 87,5% da altura comercial

Densidade Ponderada (kg.m^{-3})				
Amostra (árvores)	Método de Imersão		Método do Paquímetro	
	Densidade aparente (ρ_a)	Média Aritmética (ρ_{art})	Densidade aparente (ρ_a)	Média Aritmética (ρ_{art})
<i>CD</i> ₁	607	604	611	604
<i>CD</i> ₂	603	610	610	623
<i>CD</i> ₃	587	607	578	594
<i>CD</i> ₄	596	603	590	601
<i>CD</i> ₅	594	605	582	600
<i>CD</i> ₆	602	620	592	619
<i>CN</i> ₁	574	584	565	578
<i>CN</i> ₂	578	590	586	598
<i>CN</i> ₃	574	595	555	579
<i>CN</i> ₄	577	588	569	586
<i>CN</i> ₅	580	601	573	583
<i>CN</i> ₆	588	598	577	591
<i>SD</i> ₁	601	609	600	609
<i>SD</i> ₂	592	604	586	556
<i>SD</i> ₃	606	617	613	623
<i>SD</i> ₄	610	613	602	600
<i>SD</i> ₅	611	618	607	620
<i>SD</i> ₆	600	607	609	615
<i>SN</i> ₁	598	601	570	575
<i>SN</i> ₂	594	598	611	618
<i>SN</i> ₃	600	595	585	575
<i>SN</i> ₄	597	607	559	485
<i>SN</i> ₅	638	631	650	605
<i>SN</i> ₆	600	604	610	608

**APÊNDICE E - Resultado da Área basal e Área média dos discos do gênero *Eucalyptus*.
 Dados: Área basal (cm²) da região a 12,5% da altura comercial, Área média dos discos das regiões de 12,5 a 87,5% da altura comercial as procedências *CD*, *CN*, *SD* e *SN* à 12% de umidade obtida pelo método do paquímetro**

Área basal (12,5%)				Área média dos discos (12,5 a 87,5%)			
Amostras	Área (cm ²)	Amostras	Área (cm ²)	Trata- mentos	Área Média Discos	Trata- mentos	Área Média Discos
<i>CD</i> _{1a}	25,5	<i>SD</i> _{1a}	30,8	<i>CD</i> ₁	14,8±9	<i>SD</i> ₁	16,6±36
<i>CD</i> _{2a}	48,0	<i>SD</i> _{2a}	40,3	<i>CD</i> ₂	26,4±18	<i>SD</i> ₂	22,2±42
<i>CD</i> _{3a}	48,0	<i>SD</i> _{3a}	45,4	<i>CD</i> ₃	25,0±19	<i>SD</i> ₃	25,0±45
<i>CD</i> _{4a}	48,8	<i>SD</i> _{4a}	52,0	<i>CD</i> ₄	26,1±18	<i>SD</i> ₄	29,1±45
<i>CD</i> _{5a}	53,6	<i>SD</i> _{5a}	57,5	<i>CD</i> ₅	29,4±21	<i>SD</i> ₅	31,1±51
<i>CD</i> _{6a}	72,6	<i>SD</i> _{6a}	58,1	<i>CD</i> ₆	39,4±28	<i>SD</i> ₆	32,3±57
MÉDIA	49±15		47±11		27±17		26±17
<i>CN</i> _{1a}	93,6	<i>SN</i> _{1a}	91,6	<i>CN</i> ₁	48,15±36	<i>SN</i> ₁	47,00±37
<i>CN</i> _{2a}	108,2	<i>SN</i> _{2a}	107,1	<i>CN</i> ₂	55,94±42	<i>SN</i> ₂	54,97±42
<i>CN</i> _{3a}	112,7	<i>SN</i> _{3a}	99,6	<i>CN</i> ₃	59,89±45	<i>SN</i> ₃	52,48±40
<i>CN</i> _{4a}	137,3	<i>SN</i> _{4a}	111,2	<i>CN</i> ₄	90,70±45	<i>SN</i> ₄	57,89±45
<i>CN</i> _{5a}	126,7	<i>SN</i> _{5a}	128,3	<i>CN</i> ₅	64,00±51	<i>SN</i> ₅	63,41±53
<i>CN</i> _{6a}	143,6	<i>SN</i> _{6a}	114,2	<i>CN</i> ₆	74,67±57	<i>SN</i> ₆	56,45±46
MÉDIA	113±19		102±13		65,6±43		55±39

APÊNDICE F - Resultado da variação isotópica ($\delta^{13}\text{C}$) em por mil (‰) em duplicata das procedências clonal (C) e seminal (S) submetidas ao déficit hídrico do gênero *Eucalyptus*. Dados: Amostras dos tratamentos submetidos ao déficit (CD e SD) e ao tratamento convencional (CN e SN), da Base (12,5%) e do Topo (87,5%) da obtidas pelo método IRMS

Amostras (Base - A)	Razão isotópica $\delta^{13}\text{C}$ (‰)	Amostras (Top - D)	Razão isotópica $\delta^{13}\text{C}$ (‰)
CD _{1A}	-28,7	CD _{1D}	-27,9
CD _{1A}	-28,6	CD _{1D}	-27,9
CD _{2A}	-28,8	CD _{2D}	-27,9
CD _{2A}	-28,8	CD _{2D}	-27,9
CD _{3A}	-28,7	CD _{3D}	-28,1
CD _{3A}	-28,8	CD _{3D}	-27,9
CD _{4A}	-28,5	CD _{4D}	-27,6
CD _{4A}	-28,6	CD _{4D}	-27,7
CD _{5A}	-28,5	CD _{5D}	-27,8
CD _{5A}	-28,5	CD _{5D}	-27,9
CD _{6A}	-----	CD _{6D}	-27,9
CD _{6A}	-----	CD _{6D}	-28,0
CN _{1A}	-28,7	CN _{1D}	-28,4
CN _{1A}	-28,6	CN _{1D}	-28,5
CN _{2A}	-29,1	CN _{2D}	-28,6
CN _{2A}	-29,2	CN _{2D}	-28,8
CN _{3A}	-29,8	CN _{3D}	-28,7
CN _{3A}	-29,0	CN _{3D}	-28,8
CN _{4A}	-29,3	CN _{4D}	-28,2
CN _{4A}	-29,2	CN _{4D}	-28,3
CN _{5A}	-29,0	CN _{5D}	-28,7
CN _{5A}	-29,0	CN _{5D}	-28,7
CN _{6A}	-28,9	CN _{6D}	-28,5
CN _{6A}	-29,0	CN _{6D}	-28,3
SD _{1A}	-28,7	SD _{1D}	-28,3
SD _{1A}	-28,6	SD _{1D}	-28,1
SD _{2A}	-28,8	SD _{2D}	-27,6
SD _{2A}	-28,7	SD _{2D}	-27,6
SD _{3A}	-28,3	SD _{3D}	-27,8
SD _{3A}	-28,6	SD _{3D}	-27,8
SD _{4A}	-28,6	SD _{4D}	-27,6
SD _{4A}	-28,8	SD _{4D}	-27,5
SD _{5A}	-28,5	SD _{5D}	-27,7
SD _{5A}	-28,6	SD _{5D}	-27,6
SD _{6A}	-28,6	SD _{6D}	-27,6
SD _{6A}	-28,6	SD _{6D}	-27,6
SN _{1A}	-28,4	SN _{1D}	-28,6
SN _{1A}	-28,4	SN _{1D}	-28,6
SN _{2A}	-28,3	SN _{2D}	-28,3
SN _{2A}	-28,3	SN _{2D}	-28,4
SN _{3A}	-28,2	SN _{3D}	-28,5
SN _{3A}	-28,4	SN _{3D}	-28,6
SN _{4A}	-28,3	SN _{4D}	-28,5
SN _{4A}	-28,2	SN _{4D}	-28,6
SN _{5A}	-27,8	SN _{5D}	-28,2
SN _{5A}	-28,1	SN _{5D}	-28,3
SN _{6A}	-28,0	SN _{6D}	-28,3
SN _{6A}	-28,2	SN _{6D}	-28,3
Média	-28,6±0,37		-28,1±0,40