



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

MARIA NARUNA FELIX DE ALMEIDA

**EFEITO DO CLIMA NAS CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DA MADEIRA
DE UM CLONE DE *Eucalyptus urophylla***

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2021

MARIA NARUNA FELIX DE ALMEIDA

**EFEITO DO CLIMA NAS CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DA
MADEIRA DE UM CLONE DE *Eucalyptus urophylla***

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Ciências Florestais na área de concentração Produtos Florestais.
Orientador: Graziela Baptista Vidaurre.
Coorientador: José Eduardo Macedo Pezzopane.
Coorientador: José Luis P. C. Louzada.

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2021

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

A447e Almeida, Maria Naruna Felix de, 1991-
Efeito do clima nas características e propriedades da madeira
de um clone de *Eucalyptus urophylla* / Maria Naruna Felix de
Almeida. - 2021.
117 f. : il.

Orientadora: Graziela Baptista Vidaurre,
Coorientadores: José Eduardo Macedo Pezzopane, José
Luis P. C. Louzada.

Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e
Engenharias.

1. Eucalipto. 2. Madeira - Química. 3. Madeira - Anatomia.
4. Zonas climáticas. I. Vidaurre, Graziela Baptista. II.
Pezzopane, José Eduardo Macedo. III. Louzada, José Luis P.
C.. IV. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de
Ciências Agrárias e Engenharias. V. Título.

CDU: 630*38

**EFEITO DO CLIMA NAS CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DA
MADEIRA DE UM CLONE DE *Eucalyptus urophylla***

Maria Naruna Felix de Almeida

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

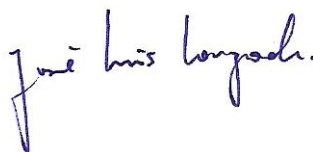
Aprovada em 25 de janeiro de 2021.



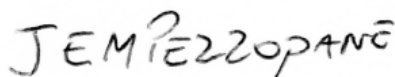
Dr. Clayton Alcarde Alvares (Examinador externo)
Suzano



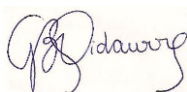
Profa. Dra. Maria Emilia Calvão Moreira Silva (Examinadora externa)
Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro



Prof. Dr. José Luis Penetra Cerveira Louzada (Coorientador)
Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro



Prof. Dr. José Eduardo Macedo Pezzopane (Coorientador)
Universidade Federal do Espírito Santo



Profa. Dra. Graziela Baptista Vidaurre Dambroz (Orientadora)
Universidade Federal do Espírito Santo

*À Francolina, Antônia, Odele, Cândida, Dionísia, Marinalva, Márcia,
dedico.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que possibilitaram a realização dessa tese e me apoiaram durante a concretização desse doutorado.

Ao departamento de Ciências Florestais e da Madeira e a Pós-graduação em Ciências Florestais da UFES pela infraestrutura disponibilizada. À FAPES e CAPES pelo auxílio financeiro, que permitiram meu custeio e a condução desta pesquisa.

Ao Projeto TECHS – Tolerância de Eucalyptus Clonais aos Estresses Hídrico e Térmico, conduzido pelo IPEF em parceria com as empresas Arauco; Cenibra; Comigo; Duratex; Fibria, GMR; Suzano; Vallourec e Veracel, agradeço na pessoa do professor Otávio Campoe e do Clayton Alvares por possibilitarem a realização de uma pesquisa tão ampla e rica. Ao Centro de Estudos Florestais, Instituto Superior de Agronomia (Lisboa/Portugal) e ao Fundo Nacional da FCT - Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia por viabilizarem parte das análises, e ao Laboratório de Anatomia, Identificação e Densitometria de Raios X em Madeira (LAIM-ESALq), na pessoa do professor Mário Tomazello, por sempre disponibilizar os equipamentos e nos receber de portas abertas.

Numa área de trabalho ainda muito masculina fui honrada por ser orientada por uma mulher. Muito obrigada à professora Graziela, por todo apoio, toda confiança e direcionamento. Eu aprendi muito com você e levo bons exemplos para minha vida.

Durante meu 1 ano de doutorado sanduíche fui acolhida pelo departamento de Ciências Florestais e Arquitetura Paisagística da UTAD. Ao professor José Lousada sou imensamente grata por me aceitar como coorientada e pela oportunidade de conhecer uma pessoa tão inteligente e profissional e ao mesmo tempo tão humana. Sempre lembrarei com carinho da professora Emília, do Francisco, do senhor Armindo que tornaram o convívio diário mais rico, e das queridas Teresa, Nazareth e Thayanne que se tornaram minhas amigas.

Conheci o professor Pezzopane por uma demanda do trabalho e com isso tive oportunidade de aprender mais sobre uma área que descobri que adoraria trabalhar, e de conviver com uma pessoa que me instigou com perguntas muitas vezes, aparentemente, impossíveis de responder, mas que sempre me fizeram ir para frente. Alguns professores nos dão balões de ensinamentos para levar para vida, a professora Graziela, o professor Pezzopane e o professor José Tarcísio me presentearam com alguns.

Ao NUQMAD pela parceria e apoio nos trabalhos. João Gabriel, Ana Paula, Sofia, Jean Carlos, Daniela Minini, Alexa e Ramon, especialmente, pela troca de ideias, discas e risadas no café. Ao José Geraldo e Sr. Elecy por todo apoio e prontidão em me ajudar. À Elizangela Almeida, Caleb Pereira e Vanessa Firmino pela disponibilidade em resolver quaisquer problemas.

Às queridas Isáira, Anny, Sofia Maria, Lourdes, Rita, Quinny e Natália, a convivência com vocês com certeza me fez uma pessoa melhor. Quétila, foi um prazer passar esses quatro anos discutindo as maravilhas e terrores de se fazer um doutorado e escrever uma tese com você. Evandro, seu apoio material e emocional foi fundamental em cada momento.

Sem minha família eu não teria feito um doutorado. Sem o apoio deles para que eu vivesse meus objetivos e o custeio do meu primeiro ano sem bolsa eu não estaria hoje aqui. Sem a torcida incansável da minha mãe, Marinalva, meu pai, Juscelino, minha avó, Odete, e meus dois irmãos, Arnold e Andrew, mesmo sem entender muito bem o que eu estava fazendo, essa tese não teria sido escrita.

Com o coração feliz por ter conhecido tantas pessoas queridas, espero que eu tenha mostrado meu amor, amizade e gratidão no convívio diário e real.

Sei que uma força divina me acompanha desde o dia que nasci, ela esteve ao meu lado todos os dias, e sei que não vai embora.

O melhor está por vir.

Muito obrigada!

*“Chamo-lhe flores e árvores e montes e sol e luar;
Porque, se ele se fez, para eu o ver,
Sol e luar e flores e árvores e montes,
Se ele me aparece como sendo árvores e montes
E luar e sol e flores,
É que ele quer que eu o conheça
Como árvores e montes e flores e luar e sol.
E por isso eu obedeço-lhe,
(Que mais sei eu de Deus que Deus de si próprio?),
Obedeço-lhe a viver, espontaneamente,
Como quem abre os olhos e vê,
E chamo-lhe luar e sol e flores e árvores e montes,
E amo-o sem pensar nele,
E penso-o vendo e ouvindo,
E ando com ele a toda a hora.”*

Há metafísica bastante em não pensar em nada.
Poemas de Alberto Caeiro. Fernando Pessoa.

RESUMO

ALMEIDA, Maria Naruna Felix de. **Efeito do clima nas características e propriedades da madeira de um clone de *Eucalyptus urophylla***. 2021. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Prof^a. Dr^a. Graziela Baptista Vidaurre. Coorientadores: Prof. Dr. José Eduardo Macedo Pezzopane e Prof. Dr. José Luis P. C. Louzada.

O clima contribui para crescimento e desenvolvimento das células da madeira, pois interfere na ecofisiologia da planta, seu crescimento e acúmulo de biomassa. Considerando a extensão do território brasileiro, com diferenças edafoclimáticas marcantes, a expansão das fronteiras florestais e a diversidade de resultados sobre a influência das variáveis climáticas nas propriedades da madeira de eucaliptos, essa tese objetivou avaliar e comparar as propriedades e características do clone de eucalipto mais plantado no Brasil (*E. urophylla*) em função das diferenças climáticas entre 12 sítios ao longo do gradiente climático brasileiro. As características da madeira avaliadas foram: densidade da madeira (DM), porcentagem de cerne (%C) e densidade de cerne e alburno (DC e DA), elementos anatômicos do xilema (área (AV) e frequência de vasos (FV), espessura da parede das fibras (EPF) e diâmetro do lúmen das fibras (DLF)) e composição química da madeira (teor de extrativos, lignina, relação siringyl/guaiacyl (S/G) e cinzas, CHNS e elementos minerais). Variáveis meteorológicas como temperatura média do ar (T), precipitação (P), e déficit hídrico (DEF) por sítio, referentes a cada ano de cultivo e média dos seis anos, foram utilizadas para comparação. As variáveis dendrométricas incremento médio anual (IMA) e incremento em volume do ciclo (IVC) também foram utilizadas. As médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott. Correlação de Pearson e análise de regressão linear foram utilizadas para verificar a influência das variáveis meteorológicas nas características da madeira. Os sítios mais úmidos, localizados em maiores latitudes, apresentaram os maiores valores de %C (entre 61 e 67%). Em geral, a densidade de cerne foi menor que a densidade de alburno (DA), com os sítios com menores valores de IMA apresentando os menores valores de DA, e sítios úmidos com IMA mais elevados as maiores densidades. %C apresentou correlações fortes e significativas com T, P, DEF, e IMA, enquanto DM apresentou correlações moderadas e significativas apenas com T e IMA. A influência do clima na densidade da madeira de *E. urophylla* ocorreu principalmente a partir dos 20 meses de crescimento das árvores, quando DM se correlacionou principalmente com T ($r > 0,6$). O aumento em

1 °C em T resultou na redução de DM em 0,014 g cm⁻³, e aumentos de 10 m³ ha⁻¹ no volume final foram relacionados a um aumento de 0,004 g cm⁻³ em DM. A espacialização da densidade mostrou a tendência de gradiente positivo de densidade do norte para o sul do Brasil. Temperatura foi novamente a variável que apresentou as maiores correlações, agora com as características anatômicas da madeira. Entre sítios, as diferenças climáticas foram mais acentuadas do que entre ciclos, o que levou a melhores correlações do clima com as médias finais das características da madeira. Temperatura apresentou correlações fortes e negativas com DM, AV e EPF ($r = -0,89$, $r = -0,75$ e $r = -0,83$) e positiva com FV e DLF ($r = 0,62$, $r = 0,84$). Lignina total, holocelulose e cinzas não apresentaram diferenças significativas entre sítios. Na análise elementar, o sítio 33, mais úmido, se diferenciou dos demais apresentando maior conteúdo de carbono e hidrogênio, e menores valores de oxigênio. Somente o teor de lignina total e a relação S/G apresentaram correlações significativas com as variáveis meteorológicas, com sítios mais secos apresentando maior relação S/G. Em relação à quantificação de elementos minerais, maiores teores de um elemento não significaram necessariamente teores elevados dos demais e sítios menos produtivos exportaram menos elementos por hectare. No geral, o clone de *E. urophylla* expressou seu fenótipo de maior crescimento e densidade da madeira nos sítios com condições climáticas mais próximas às condições para qual foi melhorado (Cwa), e a escolha do sítio se revelou um fator mais importante na alteração das propriedades da madeira do que as flutuações do clima em cada local.

Palavras chave: densidade da madeira, anatomia da madeira, química da madeira, temperatura, expansão florestal, mudanças climáticas.

ABSTRACT

ALMEIDA, Maria Naruna Felix de. **Effect of climate on characteristics and properties of wood from a clone of *Eucalyptus urophylla***. 2021. Thesis (Doctorate in Forest Sciences) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: Graziela Baptista Vidaurre. Co-advisor: José Eduardo Macedo Pezzopane e José Luis P. C. Louzada.

The climate contributes to the growth and development of wood cells, as it interferes with the ecophysiology of the plant, its growth and accumulation of biomass. Considering the extension of Brazilian territory, with marked edaphoclimatic differences, the expansion of forest boundaries and the diversity of results on the influence of climatic variables on the properties of eucalyptus wood, this thesis aimed to evaluate and compare the properties and characteristics of the most eucalyptus clone planted in Brazil (*E. urophylla*) due to climatic differences between 12 sites along the Brazilian longitudinal gradient. The characteristics of the evaluated wood were: wood density (WD), heartwood percentage (H%) and heartwood and sapwood density (HD and SD), anatomical elements of the xylem (area (VA) and frequency of vessels (VF), fiber wall thickness (FWT) and fiber lumen diameter (FLD) and chemical composition of wood (extractives, lignin, syringyl / guaiacyl ratio (S / G) and ash, CHNS and mineral elements). Absolute values of the variables average air temperature (T), precipitation (P), and soil water deficit (SWD) per site, referring to each year of cultivation and average of six years, were used for comparison. The dendrometric variables mean annual increment (MAI) and increment in cycle volume (ICV) were also used. The means were compared by the Scott-Knott test. Pearson's correlation and linear regression analysis were used to verify the influence of climate on wood characteristics. The most humid sites, located in greater latitudes, presented the highest values of H% (between 61 and 67%). In general, heartwood density was lower than sapwood density, with sites with the lowest MAI values showing the lowest SD values, and wet sites with higher MAI the highest densities. H% showed strong and significant correlations with T, P, SWD, and MAI, while WD showed moderate and significant correlations only with T, MAI and water use efficiency. The influence of climate on the density of *E. urophylla* wood occurred mainly after the 20 months of tree growth, when WD was mainly correlated with T ($r > 0.6$). The 1 ° C increase in T resulted in a WD reduction of 0.014 g cm⁻³, and increases of 10 m³ ha⁻¹ in the final volume were related to an increase of 0.004 g cm⁻³ in WD. The density spatialization showed a trend towards a positive density gradient from the north to the south of Brazil. Temperature

was again the variable that showed the highest correlations, now with the wood anatomical characteristics. Among sites, climatic differences were more accentuated than between cycles, which led to better correlations between climate and final averages of wood characteristics. Temperature showed strong and negative correlations with WD, VA and FTW ($r = -0.89$, $r = -0.75$ and $r = -0.83$) and positive with VF and FLD ($r = 0.62$, $r = 0, 84$). Total lignin, holocellulose and ash do not present significant differences between sites. In the elementary analysis, site 33, which is more humid, differed from the others, with higher content of carbon and hydrogen, and lower values of oxygen. Only the total lignin and S / G ratio showed significant correlations with the meteorological variables, with drier sites presenting a higher S / G ratio. Regarding the quantification of mineral elements, higher levels of one element did not necessarily mean high levels of the others and less productive sites exported less elements per hectare. In general, *E. urophylla* clone expressed its best phenotype in sites with climatic conditions closest to the conditions for which it was improved, and the choice of the site proved to be a more important factor than the fluctuations in the climate in each location.

Keywords: wood density, wood anatomy, wood chemistry, temperature, forest expansion, climate change.

SUMÁRIO

1	Introdução geral	14
	Referências	18
2	Hipótese	21
3	Objetivos	22
3.1	Objetivo geral	22
3.2	Objetivos específicos.....	22
4	Delineamento experimental	23
5	Capítulo 1	
	Variações de cerne de <i>Eucalyptus urophylla</i> são influenciadas por condições climáticas	25
5.1	Introdução	27
5.2	Material e métodos.....	29
5.2.1	Amostragem e análises	29
5.2.2	Obtenção do banco de dados.....	31
5.2.3	Análises estatísticas	32
5.3	Resultados	34
5.3.1	Caracterização dos sítios	34
5.3.2	Cerne e alburno.....	35
5.4	Discussão.....	43
	Conclusões	48
	Referências	49
6	Capítulo 2	
	Variações na densidade da madeira de um clone de <i>E. urophylla</i> entre sítios estão relacionadas com o clima.....	54
6.1	Introdução	56
6.2	Material e métodos.....	59
6.2.1	Amostragem e mensuração das árvores	59
6.2.2	Obtenção das variáveis meteorológicas	61
6.2.3	Obtenção de dados da parcela.....	62
6.2.4	Análise de dados.....	63
6.3	Resultados	65
6.3.1	Variações em temperatura, precipitação e déficit hídrico dos sítios, e crescimento e densidade da madeira	65
6.3.2	Correlações entre clima e parâmetros da madeira	68
6.3.3	Distribuição espacial da densidade da madeira.....	69
6.4	Discussão.....	72

6.4.1	Variações em temperatura, precipitação e déficit hídrico dos sítios, e crescimento e densidade da madeira	72
6.4.2	Correlações entre clima e parâmetros da madeira	73
6.4.3	Distribuição espacial da densidade da madeira.....	74
	Conclusão	76
	Referências	77
7	Capítulo 3	
	Diferenças na anatomia e química da madeira de um clone de <i>E. urophylla</i> são explicadas pelas condições climáticas do sítio	81
7.1	Introdução	83
7.2	Material e métodos.....	85
7.2.1	Amostragem.....	85
7.2.2	Análise anatômicas	86
7.2.3	Densidade aparente da madeira.....	88
7.2.4	Análises químicas	88
7.2.5	Obtenção do banco de dados climáticos	90
7.2.6	Análises de dados	90
7.3	Resultados	92
7.3.1	Variações anuais nas características anatômicas da madeira.....	92
7.3.2	Correlações entre clima e características anatômicas da madeira	94
7.3.3	Correlações entre clima e característica químicas da madeira	95
7.4	Discussão.....	99
7.4.1	Variações anuais nas características anatômicas da madeira.....	99
7.4.2	Correlações entre clima e características anatômicas da madeira	99
7.4.3	Correlações entre clima e características químicas da madeira	101
	Conclusão	104
	Referências	105
	Apêndices	110
8	Considerações finais	115

1 INTRODUÇÃO GERAL

A formação da madeira é um processo dinâmico e contínuo que inclui a proliferação celular cambial, a especificação e expansão das células do xilema, a biossíntese e a morte celular programada, com cada passo altamente regulado por fatores genéticos e ambientais (CALQUIST, 1988; ZHANG et al., 2014). Por consequência, na madeira está contido um registro permanente das interações do genótipo-ambiente que ocorreram ao longo dos anos, sendo possível visualizar a manifestação de um fenótipo biológico altamente versátil (SAVIDGE, 2003).

A interação genótipo x ambiente pode ser analisada sob duas perspectivas. Na primeira considera-se diferentes genótipos em um mesmo ambiente, de modo que as diferenças entre os ambientes resultam em diferentes rankings de genótipos. Já a segunda, que é inversa da primeira, avalia a variação entre os ambientes na expressão genética, ou seja, um genótipo pode ter desempenho superior em um ambiente, mas não em outro (BURDON et al., 2017).

Essas diferentes interações modificam as propriedades físicas, químicas e mecânicas da madeira, o que pode alterar a qualidade final do produto (ZOBEL; JETT, 1995). Assim, as duas principais maneiras de tentar controlar as alterações nas propriedades da madeira são o melhoramento genético e a condução de plantios em ambientes de crescimento favorável ao genótipo escolhido (CREGG; DOUGHERTY, 1988), o que pode ser alcançado por meio da seleção de sítios e clones ou manipulação do local com práticas como preparo do solo, fertilização, espaçamento e controle de competição.

A densidade da madeira tem sido considerada o atributo mais importante de qualidade da madeira (NABAIS et al., 2018), e buscando antecipar a variação dessa propriedade, variáveis meteorológicas vêm sendo utilizadas para sua previsão (WILHELMSSON et al., 2002; BOURIAUD et al., 2005; KANTAVICHAI et al., 2010; FILIPESCU et al., 2014; KIMBERLEY et al., 2015; NABAIS et al., 2018). Os parâmetros climáticos mais avaliados como influenciadores da densidade da madeira são a precipitação e a temperatura (DOWNES et al., 2014; MENESES et al., 2015; SETTE JÚNIOR et al., 2016). É frequentemente observada a elevação da densidade da madeira em locais mais secos e com menores índices pluviométricos (IBANEZ et al., 2017). No entanto, análises que considerem um conjunto com mais variáveis, como o déficit de pressão de vapor e o déficit hídrico, seriam melhores para caracterizar as condições climáticas do local.

Apesar do destaque atribuído à densidade da madeira, é a avaliação de uma combinação das características e propriedades físicas e químicas da madeira de uma árvore que permite qualificá-la para diferentes produtos finais (ZHANG, 2003). Diferentes proporções de cerne/alburno, características anatômicas e químicas estão relacionadas as propriedades físico-mecânicas da madeira e afetam os principais usos de forma diferente.

Sette Júnior et al. (2016), observaram em seu estudo que o crescimento de árvores de *Eucalyptus grandis* foi afetado pela sazonalidade, principalmente relacionada a precipitação, temperatura média e umidade relativa do ar. Em ambientes com menores precipitações em Portugal foi possível identificar o aumento da razão cerne/alburno em árvores de *Eucalyptus globulus* (MORAIS; PEREIRA, 2012).

Menores índices de área foliar (IAF) também foram observados em regiões com baixos índices pluviométricos para *Pinus sylvestris* (MENCUCINI; GRACE, 1994) e clones de eucalipto (GOMES, 2013), e são associados com menores proporções de alburno. A menor disponibilidade hídrica também pode induzir a maior produção de extrativos na madeira de clones de eucalipto como resposta às condições adversas do ambiente (FREDERICO, 2009).

A diversidade de resultados observados na literatura em trabalhos que avaliam a influência das variáveis climáticas nas propriedades da madeira reforça a necessidade de se conhecer esse comportamento em materiais genéticos e sítios brasileiros. Na Tabela 1, são resumidos resultados de pesquisas que avaliaram a densidade da madeira utilizando espécies do gênero *Eucalyptus* submetidos a estudos de comparação de ambientes de crescimentos. As árvores variam em idade de 3 a 10 anos, e apresentaram valores de densidade básica até 13% maiores em regiões com menores índices pluviométricos, comparando regiões com diferenças de aproximadamente 400 mm/ano de chuva (FREDERICO, 2009; GOUVÊA et al., 2012; FREEMAN et al., 2013; RAMIREZ, 2013; DOWNES et al., 2014).

O Brasil apresenta grande extensão territorial e diferenças edafoclimáticas marcantes (ALVARES et al., 2013). As diferenças climáticas entre os locais são comumente utilizadas como fator determinante na escolha da espécie de plantio (SOUZA et al., 2017). Entretanto, as pesquisas brasileiras que comparam características da madeira em diferentes ambientes muitas vezes utilizam poucos locais, ou locais com condições climáticas pouco contrastantes (CORRÊA NETO et al., 2007; CASTELO et al., 2008; BARBOSA, 2013).

Tabela 1. Relação precipitação x densidade básica da madeira de eucalipto.

Espécie	Idade (anos)	Local	Precipitação (mm ano ⁻¹)	Densidade (g cm ⁻²)	Autor
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	3	Santa Bárbara (MG)	1400-1600	0,422	Frederico (2019)
		Ipaba (MG)	1000-1200	0,437	
<i>E. grandis</i>	7,8	Sítio 1	1251	0,498	Gouvea et al. (2012)
	8,4	Sítio 2	773	0,553	
<i>E. pellita</i>	7,8	Sítio 1	1251	0,463	
	8,4	Sítio 2	773	0,519	
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	6	Sul da Bahia (Oeste)	1522	0,521	Ramirez (2012)
		Sul da Bahia (Lestes)	1174	0,538	
<i>E. globulus</i>	10	Manjimup (Austrália)	1012	0,510	Freeman et al. (2013)
		Bransholme (Austrália)	686	0,582	
<i>E. globulus</i>	10	Scott River (Austrália)	1100	0,590	Downes et al. (2014)
		Wellstead (Austrália)	616	0,621	
<i>E. urophylla</i>	4-9	Sul de Minas (MG)	1617	0,428	Meneses et al. (2015)
		Três Maria (MG)	1242	0,464	

Os programas de melhoramento genético buscam a produção de clones de eucalipto com alta produtividade de madeira, além de propriedades e características adequadas ao uso. Com a expansão das fronteiras florestais, clones selecionados tendem a diminuir sua expressão fenotípica ideal em virtude da ocupação de áreas com condições diferentes dos originais. Com isso, surge como alternativa para minimizar esses impactos a seleção de clones mais estáveis e adaptados às diferenças ambientais ou a manipulação de novos clones, específicos para as diferentes condições.

Além dessa expansão, as alterações climáticas previstas para os próximos 20 anos preveem mudanças nos padrões de chuva, aumento das temperaturas e da duração e severidade das secas (CHOAT et al., 2012; IPCC, 2015; ELLI et al., 2020). Com isso, a utilização de clones adaptados não servirá somente às áreas de expansão, como também aos próprios sítios tradicionais de cada empreendimento florestal.

O Brasil possui um total de 6,97 milhões de ha plantados com eucalipto (IBA, 2020), onde são encontrados dezenas de espécies e seus híbridos. O clone de *Eucalyptus urophylla* é a espécie comercial de eucalipto mais amplamente utilizada no Brasil, com clima de origem Cwa (subtropical úmido com inverno seco e verão quente) e altas taxas de crescimento em condições ambientais favoráveis (CAMPOE et al., 2020; NÓIA JÚNIOR et al., 2020).

Além disso, *E. urophylla* é uma das espécies do gênero tolerante à seca com maior resistência ao déficit hídrico, bem como adaptação em diferentes locais florestais (FLORES et al., 2016; GUIMARÃES et al., 2019), o que também contribui para melhorar a capacidade de formação de dossel, tolerância à ferrugem (*Austropuccinia psidii*), enraizamento e densidade da madeira quando associada em híbridos (KULLAN et al., 2012; SILVA et al., 2019). Por isso, além de ser amplamente plantado no Brasil, tem sido objeto de estudos para utilização em novos locais de plantio.

Considerando o exposto, o grau de modificação e o comportamento das propriedades da madeira de clones de eucalipto frente às variações climáticas demandam novos estudos. As respostas encontradas poderão auxiliar em decisões relacionadas à escolha: do local de plantio, de técnicas silviculturais e de manejo, de técnicas de fabricação dos produtos, e dos destinos mais amplos/alternativos (ZOBEL, 1984).

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, L.; SENTELHAS, P. C.; GONC, L. D. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- BARBOSA, T. L. **Qualidade da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* cultivados em cinco regiões do estado de Minas Gerais para produção de celulose**, 2013.
- BOURIAUD, O.; LEBAN, J.; BERT, D.; DELEUZE, C. Intra-annual variations in climate influence growth and wood density of Norway spruce Intra-annual variations in climate influence growth and wood density. **Tree Physiology**, v. 25, n. July, p. 651–660, 2005.
- BURDON, R. D.; LI, Y.; SUONTAMA, M.; DUNGEY, H. S. Genotype x site x silviculture interactions in radiata pine: knowledge, working hypotheses and pointers for research. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 47, n. 1, p. 1–7, 2017.
- CASTELO, P.; MATOS, J.; DEDECEK, R.; LAVORANTI, O. Influência de diferentes sítios de crescimento sobre a qualidade da madeira de *Pinus taeda*. **Floresta**, v. 38, n. 3, p. 495–506, 2008.
- CHOAT, B.; JANSEN, S.; BRODRIBB, T.; et al. Global convergence in the vulnerability of forests to drought. **Nature**, v. 491, p. 752–756, 2012.
- CREGG, B. M.; DOUGHERTY, P. Growth and wood quality of young loblolly pine trees in relation to stand density and climatic factors. **Canadian Journal Forest Research**, v. 18, p. 851–858, 1988.
- DOWNES, G.; HARWOOD, C.; WASHUSEN, R.; et al. Wood properties of *Eucalyptus globulus* at three sites in Western Australia: Effects of fertiliser and plantation stocking. **Australian Forestry**, v. 77, n. 3–4, p. 179–188, 2014.
- ELLI, E. F.; HUTH, N.; SENTELHAS, P. C.; CARNEIRO, R. L.; ALVARES, C. A. Global sensitivity-based modelling approach to identify suitable *Eucalyptus* traits for adaptation to climate variability and change. **in silico Plants**, v. 2, n. 1, p. 1–17, 2020.
- FILIPESCU, C. N.; LOWELL, E. C.; KOPPENAAL, R.; MITCHELL, A. K. Modeling regional and climatic variation of wood density and ring width in intensively managed *Douglas-fir*. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 44, n. 3, p. 220–229, 2014. Disponível em: <<http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/cjfr-2013-0275>>.
- FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**, Dissertação. Universidade Federal de Viçosa, 2009.
- FREEMAN, J. S.; POTTS, B. M.; DOWNES, G. M.; PILBEAM, D.; THAVAMANIKUMAR, S.; VAILLANCOURT, R. E. Stability of quantitative trait loci for growth and wood properties across multiple pedigrees and environments in *Eucalyptus globulus*. **New Phytologist**, v. 198, n. 4, p. 1121–1134, 2013.
- GOMES, L. M. L. **Características morfofisiológicas associadas à restrição hídrica em clones de eucalipto**, Dissertação. Universidade Federal de Viçosa, 2013.

GOUVÊA, A. DE F. G.; GOMES, C. M.; MATOS, L. M.; SOUZA, T.; KUMABE, F. J. B.; BENITES, P. K. R. M. Efeito do sítio nas características tecnológicas da madeira de *Eucalyptus* para produção de celulose Kraft. **Ciência da Madeira (Braz. J. Wood Sci.)**, v. 03, p. 102–114, 2012.

FLORES, T.; ALVARES, C. A.; SOUZA, V.; STAPE, J. L. **Eucalyptus no Brasil: Zoneamento Climático e Guia para Identificação**. Piracicaba/SP: IPEF, 2016.

GUIMARÃES, C. C.; MOMOLLI, D. R.; SCHUMACHER, M. V.; LUDVICHAK, A. A.; SOUZA, H. P.; GONSALVES, J. M. W.; MALHEIROS, A. C. Silvicultural Implications in Hybrid of *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake × *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden Stand. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 14, p. 273, 2019.

IBANEZ, T.; CHAVE, J.; BARRABÉ, L.; ELODIE, B.; BOUTREUX, T.; TRUEBA, S. VANDROT, H.; BIRNBAUM, P. Community variation in wood density along a bioclimatic gradient on a hyper-diverse tropical island. **Journal of Vegetation Science**, v. 28, n. 1, p. 19–33, 2017.

IPCC. **Climate change 2014 - Synthesis report**. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015.

KANTAVICHAI, R.; BRIGGS, D.; TURNBLOM, E. Modeling effects of soil, climate, and silviculture on growth ring specific gravity of Douglas-fir on a drought-prone site in Western Washington. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 6, p. 1085–1092, 2010.

KIMBERLEY, M. O.; COWN, D. J.; MCKINLEY, R. B.; MOORE, J. R.; DOWLING, L. J. Modelling variation in wood density within and among trees in stands of New Zealand-grown radiata pine. *New Zealand Journal of Forestry Science*, v. 45, n. 1, p. 1–13, 2015. **New Zealand Journal of Forestry Science**. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1186/s40490-015-0053-8>>.

KULLAN, A. R. K.; DYK, M. M. VAN; HEFER, C. A.; JONES, N.; KANZLER, A.; MYBURG, A. Genetic dissection of growth, wood basic density and gene expression in interspecific backcrosses of *Eucalyptus grandis* and *E. urophylla*. **BMC Genetics**, v. 13, n. 1, p. 1, 2012.

MENCUCCINI, M.; GRACE, J. Climate influences the leaf area / sapwood area ratio in Scots pine. **Tree Physiology**, v. 15, p. 1–10, 1994.

MENESES, V. A.; TRUGILHO, P. F.; CALEGARIO, N.; LEITE, H. G. Efeito da idade e do sítio na densidade básica e produção de massa seca de madeira em um clone do *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 43, n. 105, p. 101–116, 2015.

MORAIS, M. C.; PEREIRA, H. Variation of extractives content in heartwood and sapwood of *Eucalyptus globulus* trees. **Wood Science and Technology**, v. 46, p. 709–719, 2012.

NABAIS, C.; HANSEN, J. K.; DAVID-SCHWARTZ, R.; KLISZ, M.; LÓPEZ, R.; ROZENBERG, P. The effect of climate on wood density: What provenance trials tell us? **Forest Ecology and Management**, v. 408, p. 148–156, 2018.

NETO, T. A. C.; ANJOS, L. H. C. DOS; PEREIRA, M. G.; AMORIM, H. B.; JACCOUD, C. F. D. S. Atributos edafambientais e parâmetros dendrométricos de plantios de eucalipto em uma toposseqüência no campus da UFRRJ, Seropédica (RJ). **Ciência Florestal**, v. 17, n. 1, p. 43–51, 2007.

NÓIA JÚNIOR, R. DE S.; AMARAL, G. C.; PEZZOPANE, J. E. M.; FONSECA, M. D. S.; CÂMARA, A. P.; XAVIER, T. M. T. Ecophysiological acclimatization to cyclic water stress in *Eucalyptus*. **Journal of Forestry Research**, v. 31, n. 3, p. 797–806, 2020.

RAMIREZ, J. L. M. **Condições edafoclimáticas na produtividade e massa específica de madeira de eucalipto**, Dissertação. Universidade Federal de Viçosa, 2013.

SETTEJR, R.; TOMAZELLO, M.; LOUSADA, J.; LOPES, D.; PAUL, J. Relationship between climate variables, trunk growth rate and wood density of *Eucalyptus grandis* W. Mill ex Maiden Trees. **Revista Árvore**, v. 40, n. 2, p. 337–346, 2016.

SILVA, P. H. M.; BRUNE, A.; ALVARES, C. A.; AMARAL, W.; MORAES, M. L. T.; GRATTAPAGLIA, D.; PAULA, R. C. Selecting for stable and productive families of *Eucalyptus urophylla* across a country-wide range of climates in Brazil. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 49, n. 1, p. 87–95, 2019.

SOUZA, T. S.; RAMALHO, M. A. P.; MARCO, B.; GABRIEL, D. L.; SAMPAIO, D. Performance of *Eucalyptus* clones according to environmental conditions. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 116, p. 601–610, 2017.

WILHELMSSON, L.; ARLINGER, J.; SPÅNGBERG, K.; Lundqvist, S-O.; Grahn, T.; Hedenberg, Ö.; Olsson, L. Models for predicting wood properties in stems of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* in Sweden. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 17, n. 1975, p. 330–350, 2002.

ZHANG, J.; NIEMINEN, K.; SERRA, J. A. A.; HELARIUTTA, Y. The formation of wood and its control. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 17, n. 1, p. 56–63, 2014.

ZHANG, S. Wood quality attributes and their impacts on wood utilization. XII World Forest Congress. **Anais...** p.1–7, 2003. Québec, Canada. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/ARTICLE/WFC/XII/0674-B1.HTM>>.

ZOBEL, B. The changing quality of the world wood supply. **Wood Science and Technology**, v. 18, n. 1, p. 1–17, 1984.

ZOBEL, B.; JETT, J. **Genetics of wood production**. 1st ed. Berlin: Springer-Verlag, 1995.

2 HIPÓTESE

As hipóteses levantadas nesse trabalho para o clone de *E. urophylla* são:

H₁: O clima, por influenciar diretamente o crescimento, também promove mudanças nas proporções de cerne e alburno da madeira.

H₂: A influência do clima na densidade da madeira muda com o crescimento em idade das árvores.

H₃: As diferenças de precipitação entre sítios é a principal variável climática relacionada às mudanças na densidade da madeira.

H₄: Sítios mais secos promovem a produção de madeira mais densa.

H₅: A densidade da madeira é relacionada com modificações na anatomia das fibras e vasos.

H₆: O gradiente climático que contempla os sítios promove alterações nas características químicas da madeira.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Relacionar variáveis climáticas com proporção de cerne, densidade da madeira, características anatômicas e químicas da madeira de *Eucalyptus urophylla* cultivados em 12 sítios ao longo do gradiente climático brasileiro.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar a porcentagem de cerne e a densidade da madeira de *E. urophylla* entre os sítios
- Estimar a porcentagem de cerne utilizando variáveis climáticas e a taxa de crescimento das árvores.
- Identificar o ciclo de crescimento de *E. urophylla* mais suscetível à influência climática em relação às variações de densidade da madeira e a variável mais correlacionada à essas mudanças.
- Utilizar variáveis climáticas para estimar e espacializar os valores de densidade desse clone em um gradiente climático no Brasil.
- Avaliar alterações anatômicas e químicas na madeira de *E. urophylla* em sítios com condições contrastantes, a fim de identificar quais são as variáveis mais influenciadas pelas diferenças climáticas entre os sítios.

4 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O fluxograma metodológico que resume o desenho experimental e os principais procedimentos que foram realizados nesta tese é apresentado na Figura 1.

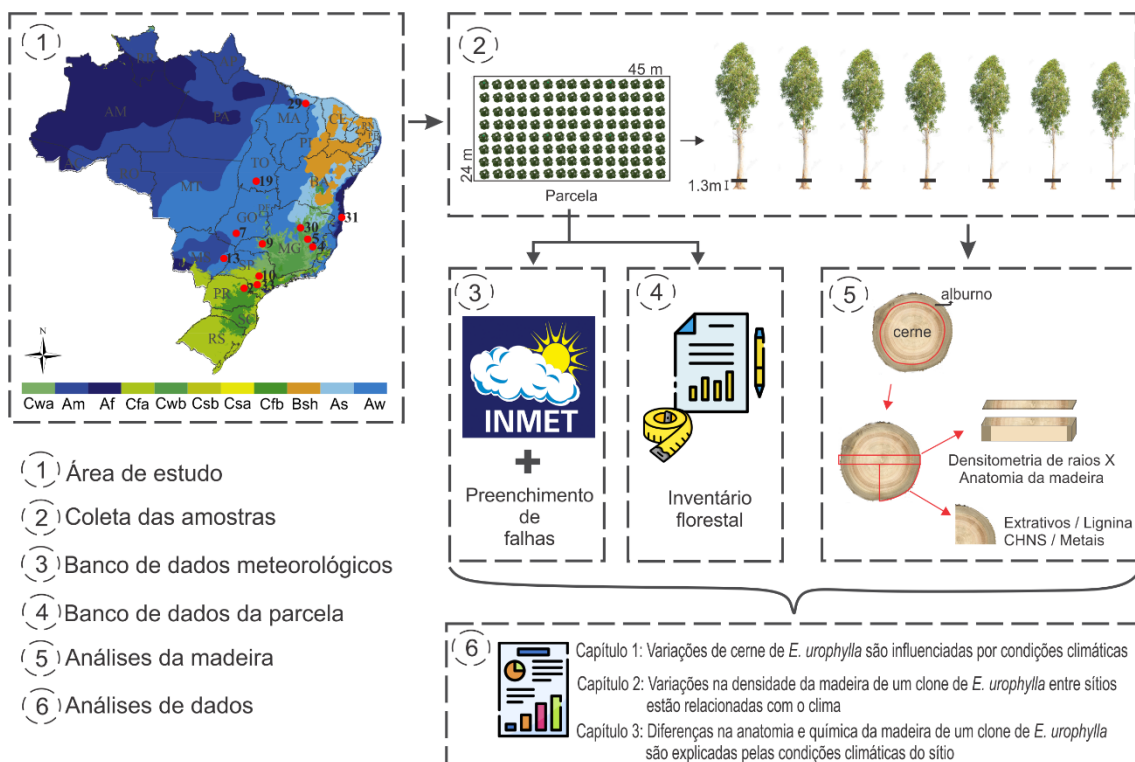


Figura 1. Fluxograma metodológico.

A pesquisa foi desenvolvida em parceria com o Projeto TECHS – Tolerância de *Eucalyptus* Clonais aos Estresses Hídrico e Térmico (www.ipef.br/techs/en). O ensaio clonal do TECHS é composto por parcelas experimentais de 8 linhas x 15 plantas, com dimensões de 24 x 90 m, totalizando 120 árvores. Foram analisadas amostras de madeira de 12 plantios experimentais do clone A1 - *Eucalyptus urophylla* aos seis anos de idade, cultivado entre os anos de 2012 e 2018 sob o espaçamento de 3 x 3 metros. O clima de origem do clone é Cwa (temperado úmido com inverno seco e verão quente), mas é amplamente plantado em todo o Brasil para diferentes usos, como celulose, lenha, carvão, cavaco, pellets, serraria e madeira tratada.

Com base em medições do diâmetro a altura do peito – 1,3 m (DAP), a amplitude de diâmetro do sítio foi determinada e dividido por 7. Sete árvores de cada sítio foram colhidas, uma por classe de diâmetro. Um disco de 5 cm de largura foi retirado na posição do DAP, com o qual as análises das propriedades e características

da madeira foram realizadas. Características das árvores avaliadas são descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Características dendrométricas das árvores amostradas.

Techs	Idade (meses)	Árvore	DAP (cm)	HT (m)	Techs	Idade (meses)	Árvore	DAP (cm)	HT (m)
2 - Arapoti / PR	81	1	13,2	23,2	13 - Três Lagoas / MS	72	1	13,5	22,0
		2	16,0	27,1			2	14,7	24,2
		3	17,5	29,4			3	16,5	26,9
		4	18,8	31,3			4	17,7	28,3
		5	19,9	31,4			5	18,7	28,6
		6	21,2	32,7			6	20,8	29,9
		7	22,8	33,6			7	23,0	26,6
4 - Belo Oriente / MG	78	1	11,4	19,0	19 - Peixe / TO	70	1	13,2	17,5
		2	13,8	21,9			2	14,2	17,5
		3	14,1	19,2			3	14,4	18,2
		4	15,7	23,9			4	15,6	19,0
		5	18,8	27,0			5	15,8	19,8
		6	19,8	29,6			6	16,3	19,1
		7	19,9	29,0			7	17,2	19,3
5- Guanhães / MG	71	1	10,7	21,6	29 - Urbano Santos / MA	78	1	10,2	12,4
		2	13,4	22,6			2	12,3	14,0
		3	14,3	25,7			3	13,9	17,2
		4	15,8	26,3			4	16,9	21,5
		5	18,0	28,3			5	18,0	21,4
		6	18,7	29,6			6	20,1	20,7
		7	20,0	30,2			7	22,1	22,1
7 - Rio Verde / GO	72	1	15,2	26,5	30 - Bocaiúva / MG	73	1	12,2	22,5
		2	15,9	27,3			2	13,3	23,0
		3	16,6	28,6			3	13,4	22,4
		4	18,0	29,9			4	15,4	24,1
		5	19,3	29,6			5	15,8	23,9
		6	19,9	29,5			6	16,4	24,7
		7	21,1	30,4			7	16,9	24,1
9 - Estrela do Sul / MG	76	1	15,0	27,5	31 - Eunápolis / BA	74	1	12,4	20,3
		2	15,7	28,8			2	14,0	23,1
		3	16,4	29,1			3	15,1	26,0
		4	17,3	28,7			4	16,9	26,8
		5	17,7	28,5			5	17,2	26,4
		6	18,5	29,4			6	18,1	28,3
		7	19,4	29,8			7	20,2	28,9
10 - Botucatu / SP	77	1	12,4	21,7	33 - Buri / SP	79	1	12,1	23,5
		2	14,9	25,2			2	14,2	23,3
		3	15,5	26,2			3	16,2	28,3
		4	17,0	27,3			4	16,7	30,1
		5	18,6	28,7			5	17,3	28,3
		6	20,2	28,8			6	17,1	29,0
		7	21,5	28,3			7	20,0	30,3

5 CAPÍTULO 1

Variações de cerne de *Eucalyptus urophylla* são influenciadas por condições climáticas¹

Resumo:

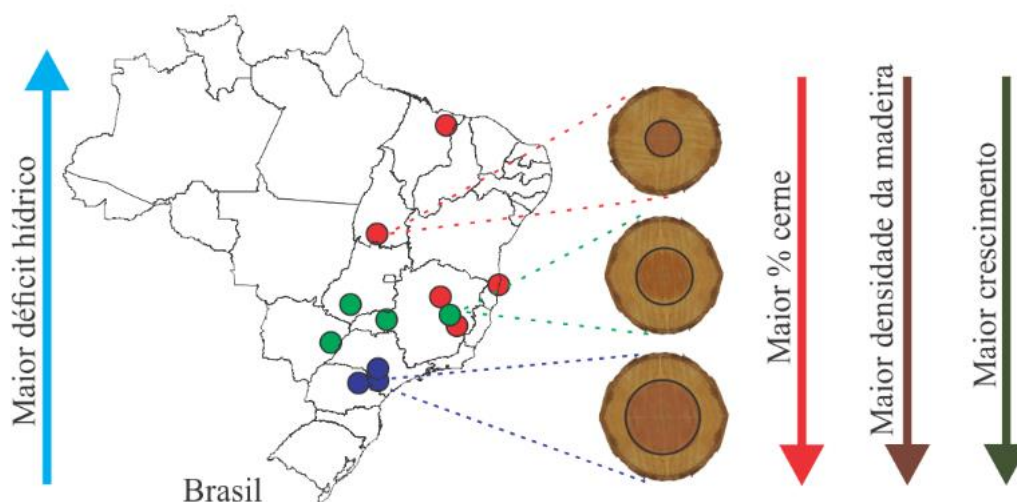
Uma das formas utilizadas para diferenciação do lenho das árvores é a classificação em cerne e alburno, sendo que variações em suas proporções influenciam o uso da madeira. O objetivo do trabalho foi comparar a porcentagem de cerne (%C) e a densidade da madeira (DM) de eucalipto em plantios ao longo de um gradiente climático, e estimar essas características utilizando variáveis meteorológicas e a taxa de crescimento das árvores. O clone *E. urophylla* foi analisado aos 6 anos em 12 sítios distribuídos em ampla variação geográfica do Brasil. Sete árvores de cada sítio foram amostradas, sendo retirado um disco na posição do DAP. %C foi determinada por análise de imagem e densidade de cerne (DC), densidade de alburno (DA) e densidade da madeira (DM) por densitometria de raios X. Os dados de %C, DC, DA e DM, foram submetidos à análise de variância individual e as médias dos sítios comparadas. DM e %C foram correlacionadas com as variáveis temperatura (T), precipitação (P), déficit hídrico do solo (DEF), índice de uso da água (W), eficiência no uso da água (EUA) e incremento médio anual (IMA), sendo essas variáveis também utilizadas na análise de regressão múltipla no ajuste das equações. A diferenciação entre as regiões de cerne e alburno pela cor foi possível em todos os sítios. Os sítios localizados em maiores latitudes e mais úmidos apresentaram os maiores valores de %C (entre 61 e 67%). Em geral, DC foi menor que DA, com os sítios com menores valores de IMA apresentando os menores valores de DA, e sítios úmidos com IMA mais elevados as maiores densidades. %C apresentou correlações fortes e significativas com T, P, DEF, W e IMA, enquanto DM apresentou correlações moderadas e significativas apenas com T, IMA e EUA. Para estimativa da %C, a melhor equação utilizou as variáveis P e IMA, que conseguiram explicar 79% da variação. Na estimativa da DM a melhor equação utilizou somente a variável EUA e obteve um poder de explicação de 53%. Além da forte relação entre porcentagem de cerne e crescimento, foi constatado que o clima também influencia na formação de cerne. O uso da equação obtida para o clone A1 em outros clones confirmou que a

¹ Esse trabalho foi publicado na revista *Forest Ecology and Management* 458 (2020) 117743.

variabilidade de resposta para as propriedades da madeira também é influenciada pela genética. Não foi observada relação entre o valor de Huber e as condições climáticas, no entanto, os fatores que influenciam o comportamento da razão AA:AF são complexos e requerem a consideração de outros componentes. %C se mostrou uma característica mais correlacionada com o clima do que a densidade, e a variabilidade observada entre os sítios reforça a importância de novos estudos sobre avaliações mais práticas do conteúdo de cerne na madeira dessa espécie e sua inclusão entre as análises de caracterização da madeira.

Palavras-chave: densidade; qualidade da madeira; eucalipto; condições climáticas.

Resumo gráfico:



Destaques:

- Apesar do crescimento, o clima também influencia na formação de cerne na madeira de *E. urophylla*.
- Sítios úmidos apresentaram madeira com mais cerne em clones de *E. urophylla*.
- Variações no clima influenciam mais a porcentagem de cerne do que a densidade da madeira.
- A variabilidade da resposta para as propriedades da madeira também é influenciada pela genética.
- O valor Huber não foi relacionado às condições climáticas.

5.1 INTRODUÇÃO

A madeira da maioria das árvores pode ser visualmente dividida em duas regiões distintas, o cerne e o albúrnio (CHERELLI et al., 2018). Isso ocorre devido às diferenças organolépticas e químicas, que tornam o cerne mais escuro e impregnado por tiloses do que o albúrnio, sendo essa diferença de cor comercialmente utilizada como fator de classificação da madeira (GIERLINGER et al., 2004; LOURENÇO et al., 2010). O cerne corresponde às camadas mais internas do tronco que não realizam mais a condução de água das raízes às folhas, função essa desempenhada pelo albúrnio, que é a parte fisiologicamente ativa da árvore (HILLIS, 1987; GOMINHO; PEREIRA, 2005).

A formação de cerne é um processo de diferenciação secundária do xilema, com função de regular o crescimento radial das plantas lenhosas por meio da senescência tecidual (FROMM, 2013). Essa regulação é um meio de controlar a quantidade de albúrnio em um nível ótimo de condução de seiva e armazenamento de substâncias (BAMBER, 1976), de modo que em ambientes com limitação de água o albúrnio interno é convertido em cerne como forma de regular a capacidade de condutância do caule e, por consequência, o uso da água pelas folhas (CHAN et al., 2013).

O estresse hídrico é o fator abiótico limitante mais importante para produção florestal nas regiões áridas e semiáridas (ZAHID; NAWAZ, 2007). A baixa disponibilidade de água no ar e/ou no solo promove o fechamento dos estômatos como forma de limitar as trocas gasosas e fotossíntese, diminuindo a fixação de carbono para formação de novas células, o que pode diminuir o crescimento e aumentar a densidade da madeira (MACFARLANE et al., 2004; HILL et al., 2014).

O albúrnio e o cerne geralmente apresentam diferenças quanto às características e propriedades da madeira, de modo que a proporção do cerne e do albúrnio pode influenciar o uso da madeira. O mais comum é a maior durabilidade e menor permeabilidade do cerne devido à ausência de materiais nutritivos (carboidratos, principalmente na forma de amido), e especificamente a presença de extrativos (TAYLOR et al., 2002; BRITO et al., 2019). Na produção de celulose e papel, árvores com maior percentual de albúrnio são preferíveis devido ao menor teor de extrativos (MIRANDA et al., 2007). O cerne também é preferível para construções com maiores exigências de acabamento, como a indústria moveleira, devido às suas características de maior resistência natural (TAYLOR et al., 2002), e a impregnação

dos vasos com tiloses nesta região afeta o processo de secagem da madeira (SILVA; TRUGILHO, 2003).

A área do alburno (xilema ativo) representa a capacidade do tecido condutor de transportar a água necessária para a transpiração foliar (BOND et al., 2008; MEINZER et al., 2008). A área foliar é importante na interceptação de luz, assimilação de carbono e perda de água, por isso está relacionada aos processos de fotossíntese e potencial de transpiração (ASNER et al., 2003). A interação entre essas duas variáveis influencia na alocação de recursos e na arquitetura hidráulica da planta, e pode ser expressada como uma característica alométrica fundamental que reflete o equilíbrio entre a demanda pela transpiração e a capacidade de abastecimento de água (BOND et al., 2008).

Devido à importância das relações do cerne e do alburno, suas variações de densidade e uniformidade no uso da madeira em determinadas aplicações, experimentos para entender a influência de condições climáticas nas proporções de cerne e alburno na madeira de eucalipto podem auxiliar na gestão das florestas frente à vasta diversidade de zonas climáticas com plantios de eucalipto, bem como prover aos pesquisadores florestais novas ferramentas de caracterização fenotípica para seus programas de melhoramento.

Desse modo, os objetivos dessa pesquisa foram comparar a porcentagem de cerne e a densidade da madeira de eucalipto em plantios ao longo de um gradiente climático e estimar a porcentagem de cerne e densidades médias dos sítios utilizando variáveis climáticas e a taxa de crescimento das árvores.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1 Amostragem e Análises

As árvores amostradas foram provenientes do Programa de Tolerância de *Eucalyptus* Clonais aos Estresses Hídricos, Térmicos e Bióticos (TECHS) coordenado pelo Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (IPEF). Foram avaliados experimentos distribuídos em 12 diferentes regiões do Brasil (Tabela 1). As árvores foram plantadas entre janeiro e maio de 2012 e cultivadas até 2018 (06 anos), sendo colhidas entre fevereiro e outubro. A parcela padrão adotada possuía 8 linhas × 15 árvores de *Eucalyptus urophylla* (Clone A1 do TECHS), com espaçamento de 3 × 3 m. As árvores foram fertilizadas durante o primeiro ano para corrigir e evitar qualquer deficiência nutricional e herbicidas foram usados para controle fitossanitário. Ver Binkley et al. (2017) para detalhes silviculturais adicionais aplicados aos experimentos.

Tabela 1. Localização dos 12 sítios do TECHS.

Sítios ¹	Local (Cidade/ Estado)	Coordenadas geográficas		Altitude m
		Lat (Sul)	Long (Oeste)	
2	Arapoti / PR	24,2°	50,0°	770
4	Belo Oriente / MG	19,3°	42,4°	243
5	Guanhães / MG	18,6°	42,9°	873
7	Rio Verde / GO	18,0°	50,9°	681
9	Estrela do Sul / MG	18,7°	47,9°	969
10	Botucatu / SP	23,0°	48,5°	869
13	Três Lagoas / MS	20,9°	51,9°	361
19	Peixe / TO	12,0°	48,5°	242
29	Urbano Santos / MA	3,4°	43,1°	81
30	Bocaiúva / MG	17,3°	43,8°	848
31	Eunápolis / BA	16,3°	39,6°	200
33	Buri / SP	23,9°	48,7°	695

¹Para a numeração dos sítios foi utilizada os mesmos números adotados pelo programa TECHS.

Sete árvores de cada sítio foram selecionadas de acordo com a divisão da amplitude do DAP (diâmetro a altura do peito, medido a 1,30m do solo) da parcela em sete classes, sendo colhida uma árvore por classe de diâmetro, totalizando 84 árvores (Figura 1a). Um disco de madeira, com aproximadamente 3 cm de espessura, foi retirado na altura do DAP de cada árvore (Figura 1b), com o qual foram realizadas as análises de caracterização e quantificação do cerne e do alburno e densidade

aparente por técnica de densitometria de raios X. Árvores mortas, tortas, danificadas e doentes não foram selecionadas.

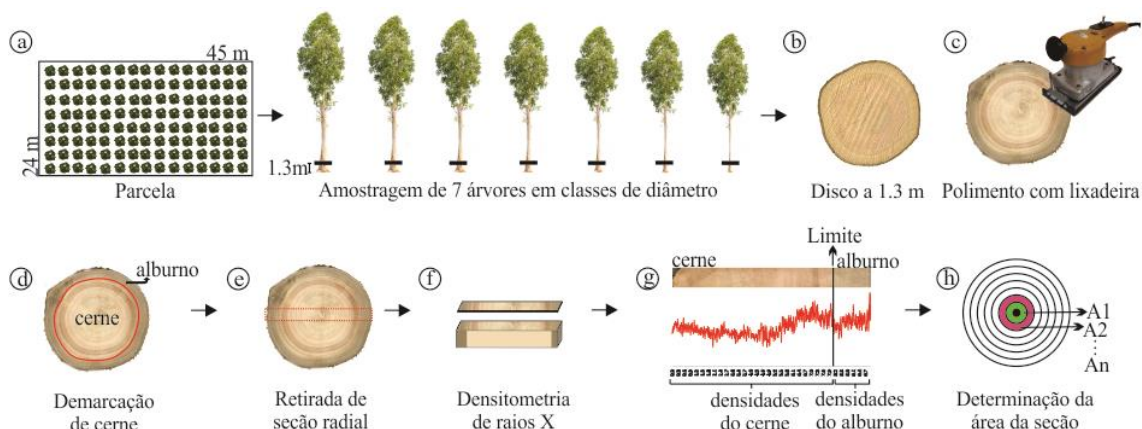


Figura 1. Seleção amostral e seqüência de análises da madeira do clone de *Eucalyptus urophylla*. Os procedimentos foram realizados nos sete discos retirados de cada sítio avaliado.

Os discos foram polidos em lixadeira de cinta com lixas de grãos 50 e 80 para melhorar a visualização da superfície (Figura 1c). A delimitação de cerne foi realizada visualmente em cada disco pela diferença de cor (Figura 1d). Os discos foram aspergidos com água para melhorar o realce da cor e escaneados (Scanner Epson Perfection v750 pro / 600 dpi). A delimitação da área total e de cerne de cada disco foi realizada usando um sistema de análise de imagem (Image Pro-plus 6.2). A porcentagem de cerne (%C) foi obtida pela relação percentual entre a área de cerne e a área total do disco, ou seja, a razão da área de cerne pela área total, multiplicada por 100.

Após as medições de cerne e albarno, uma seção radial de 1 cm de largura foi retirada dos discos (Figura 1e), colada em suporte, cortada em seções transversais de 1 mm de espessura (Figura 1f) e climatizada (20°C, 60% de umidade relativa, 24 h). A determinação das densidades entre o cerne e o albarno foi realizada pela técnica de densitometria de raios X (QTRS-01X). A intensidade de raios X através da amostra de madeira foi transformada em densidade aparente pelo software QMS (Quintek Measurement Systems - Tree Ring Analyzer). A resolução de leitura da densidade aparente pelo software foi de 80 µm. Os valores radiais de densidade foram salvos em um arquivo DAT e lidos pelo software Excel.

A densidade da madeira (DM) de cada árvore foi obtida pela média ponderada da densidade aparente (Equação 1). O limite de cerne, demarcado na seção radial, foi utilizado para separação dos dados pontuais de densidade em valores

pertencentes às regiões de cerne e alburno. Os valores foram agrupados nas regiões anterior e posterior ao limite (Figura 1g), sendo a densidade do alburno (DA) e a densidade do cerne (DC) calculadas a partir da média ponderada desses valores. A área de cada seção entre os valores de densidade, largura de 80 μm , foi utilizada como fator de ponderação (Figura 1h, Equação 2).

$$DM = \frac{DA1 * A1 + DA2 * A2 + \dots + DAn * An}{A1 + A2 + \dots + An} \quad (1)$$

Sendo: D: densidade; A: área da seção; DM = densidade da madeira

$$A1 = \pi r1^2 \quad A2 = (\pi r2^2) - A1 \quad A3 = (\pi r3^2) - A2 \quad \dots \quad An = (\pi rn^2) - (An - 1)(2)$$

Sendo: A: área da seção; r: raio da seção; r1: 80 μm ; r2: r1 + 80 μm ; r3: r2 + 80 μm ; rn: rn-1 + 80 μm .

5.2.2 Obtenção do banco de dados

O volume de madeira das árvores foi determinado a partir do inventário florestal medindo-se DAP e H total de todas árvores, e aplicando-se a equação estabelecida por (MATTOS et al., 2020). O incremento médio anual (IMA) foi determinado a partir do volume de madeira.

Dados meteorológicos de temperatura do ar média, máxima e mínima, umidade relativa média, velocidade do vento a 10 metros, radiação solar global e precipitação para o período de 2012 a 2018 foram obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), seguindo a metodologia de preenchimento de falhas utilizada por Rocha et al. (2020) e Elli et al. (2020). Os valores anuais de temperatura (T) foram calculados pela média aritmética da temperatura média mensal, e a precipitação (P) anual foi calculada pela soma da precipitação acumulada.

Para cálculo do déficit hídrico do solo (DEF) foi realizado o balanço hídrico climatológico sequencial em escala mensal conforme apresentado por Thornthwaite and Mather em 1955 (CAMARGO, 1962). A evapotranspiração potencial foi calculada pelo método de Penman-Monteith (PM-FAO 56). A água disponível no solo foi estimada pela equação proposta por Menezes (2005), utilizando os teores de silte e argila dos solos caracterizados nas áreas experimentais. A capacidade de armazenamento de água no solo (CAD) foi calculada considerando os valores de água

disponível à dois metros de profundidade efetiva do solo. O DEF anual foi obtido pela soma dos déficits hídricos mensais.

O índice anual do uso da água (W) foi calculado pela razão entre evapotranspiração real (ETR) e evaporação potencial (ETP) para o mesmo período de crescimento, obtidas nos cálculos de balanço hídrico. A eficiência no uso da água (EUA) é expressa pela produção de madeira em função da quantidade de água transpirada (STAPE et al., 2004b), e foi determinada pela divisão da biomassa das árvores vivas da parcela (kg), calculada com o volume e a densidade da madeira da parcela, pela ETR (convertida para m³) acumulada nos seis anos.

5.2.3 Análises estatísticas

Todas as análises foram processadas no software R (R CORE TEAM, 2014). As variáveis T, P, DEF, W, EUA e IMA foram utilizadas para o agrupamento dos sítios em grupos com condições ambientais e de crescimento semelhantes. O pacote cluster do software R foi utilizado, aplicando como método o agrupamento hierárquico aglomerativo de Ward e como medida de dissimilaridade a distância euclidiana. Os dados de %C, DM, DC e DA foram submetidos à análise de variância individual e as médias dos sítios comparadas pelo teste de Scott Knott ($\alpha = 5\%$). Os dados de %C foram transformados utilizando a função log para atender os pressupostos de homogeneidade e normalidade.

As médias de DM e %C dos sítios foram correlacionadas com as variáveis T, P, DEF, W, EUA e IMA, utilizando a correlação de Pearson ($\alpha = 5\%$, $n = 96$). Para estimativa da %C e DM foi utilizada análise de regressão múltipla com ajuste pelo método Exhaustive Search (pacote Leaps), que testa todas as combinações de variáveis e fornece a que melhor estima a variável dependente. As médias dos seis anos de cultivo das variáveis T, P, DEF, W, EUA e IMA foram utilizadas como variáveis independentes. As combinações obtidas foram comparadas, e os melhores modelos foram selecionados.

Dados disponibilizados pelo TECHS de quatro outros clones foram usados para testar os modelos de regressão desenvolvidos. Os clones avaliados foram: C3 (*E. grandis* x *E. camaldulensis*), Q8 (*E. grandis*), G7 (*E. urophylla*), H8 (*E. grandis* x *E. urophylla*) (BINKLEY et al., 2017). Os dados do cerne foram obtidos durante a avaliação da biomassa do local. Após o corte das árvores, um disco com menos de 1 cm de espessura foi observado contra a luz e duas medidas perpendiculares do

diâmetro do cerne e total foram registradas. A densidade básica da madeira foi realizada de acordo com a Norma Brasileira Regulamentadora NBR 11941 (ABNT, 2003). Considerando que a densidade obtida por densitometria de raios X, utilizada nas equações do clone A1, geralmente apresenta valores superiores à densidade básica, as densidades dos clones foram corrigidas utilizando um fator de correção de 1,2, obtido pela comparação da densidade básica com a densidade aparente do clone A1.

Os dados de área foliar dos clones, obtidos no banco de dados do TECHS, foram usados para calcular o valor de Huber. Para cada árvore, todas as folhas foram coletadas e pesadas, e 20 árvores por terço da copa foram amostradas para medição da área específica. A área foliar total da árvore (m^2) foi calculada pela multiplicação do peso seco das folhas (kg) pela área foliar específica (m^2/kg), e utilizada para calcular o valor de Huber (razão área do alburno:área foliar). O valor Huber de cada clone nos sítios foi obtido pela média do valor de Huber das 7 árvores amostradas. A análise de variância foi usada para testar as diferenças entre os locais para cada clone em um nível de significância de 0,05, e as médias foram comparadas usando o teste de Scoot Knott.

5.3 RESULTADOS

5.3.1 Caracterização dos sítios

Cinco grupos de condições meteorológicas distintas foram formados quando o dendrograma de agrupamento foi interceptado em 70% de similaridade (Figura 2a). O índice de correlação cofenético foi 0,86. Os sítios foram organizados de acordo com os grupos formados dos mais úmidos para os mais secos.

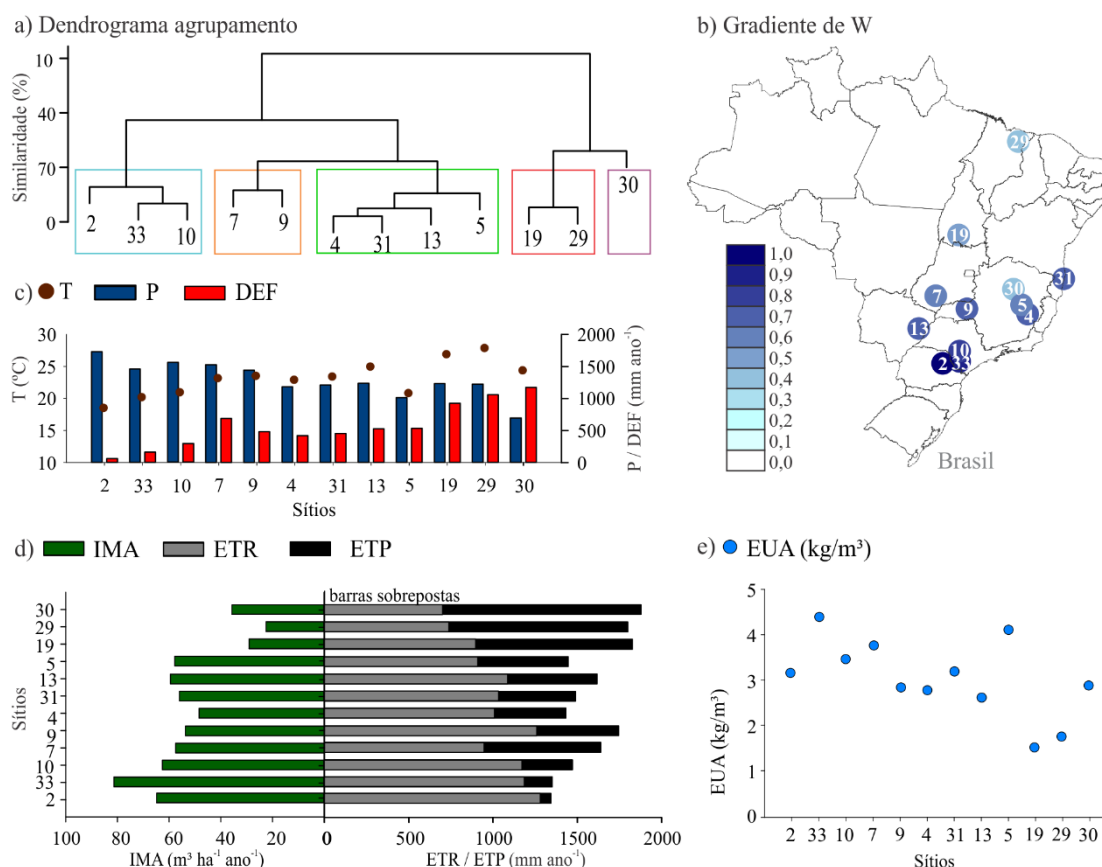


Figura 2. Agrupamento dos sítios quanto às características meteorológicas e de crescimento e caracterização quanto ao regime médio anual de temperatura (T), precipitação (P), déficit hídrico (DEF), incremento médio anual (IMA), evapotranspiração real (ETR), evapotranspiração potencial (ETP), índice anual de uso da água (W) e eficiência no uso da água (EUA).

O índice anual do uso da água (W) entre os sítios variou de 0,4 a 1,0, demonstrando diferenças consideráveis entre os climas locais (Figura 2b). O sítio 02-Arapoti apresentou o maior W e, conseqüentemente, o menor DEF, sendo os sítios com maior DEF ($W = 0,4$), 29Urbano Santos e 30Bocaiúva. O gradiente de W apresentou tendência semelhante ao gradiente latitudinal, cujos sítios em maiores latitudes tiveram também os maiores valores de W.

Os sítios 2, 10 e 33 apresentaram uma combinação de altos índices pluviométricos e baixas temperaturas médias, o que proporcionou baixos valores de DEF (Figura 2c). Índices pluviométricos, temperaturas e DEF medianos caracterizaram os sítios 7, 9, 4, 31, 13 e 5. Os sítios 19 e 29 apresentaram as temperaturas mais elevadas, o que favoreceu o aumento do DEF a valores próximos aos de precipitação, apesar de regimes de chuva médios acima de 1000 mm ano⁻¹, enquanto que, no sítio 30, os elevados valores de DEF provavelmente foram proporcionados pelos menores índices de precipitação.

Nos sítios mais secos, apesar de apresentarem os maiores valores de ETP, as condições meteorológicas locais não permitiram que esses valores fossem alcançados na ETR (Figura 2d). O IMA variou de 20 a 80 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, com os sítios 19 e 29 apresentando os menores valores de IMA, e os menores valores de eficiência do uso da água (EUA). O EUA variou de 1,5 a 4,4 kg de madeira por m³ de água (Figura 2e), alcançando os valores observados no final do ciclo de 6 anos de crescimento das árvores.

5.3.2 *Cerne e alburno*

A diferenciação entre as regiões de cerne e alburno pela cor foi possível em todos os sítios (Figura 3). Entre os sítios, os discos apresentaram tonalidades distintas (Figura 3a), principalmente na região do cerne. A aspersion com água na superfície do disco antes da captura da imagem dos discos facilitou a demarcação do limite de cerne por aumentar o contraste entre os tons de cerne e alburno (Figura 3b). Das 84 árvores amostradas, apenas uma, pertencente à menor classe de diâmetro do sítio 29-Urbano Santos (DAP = 8,4 cm), não apresentou cerne.

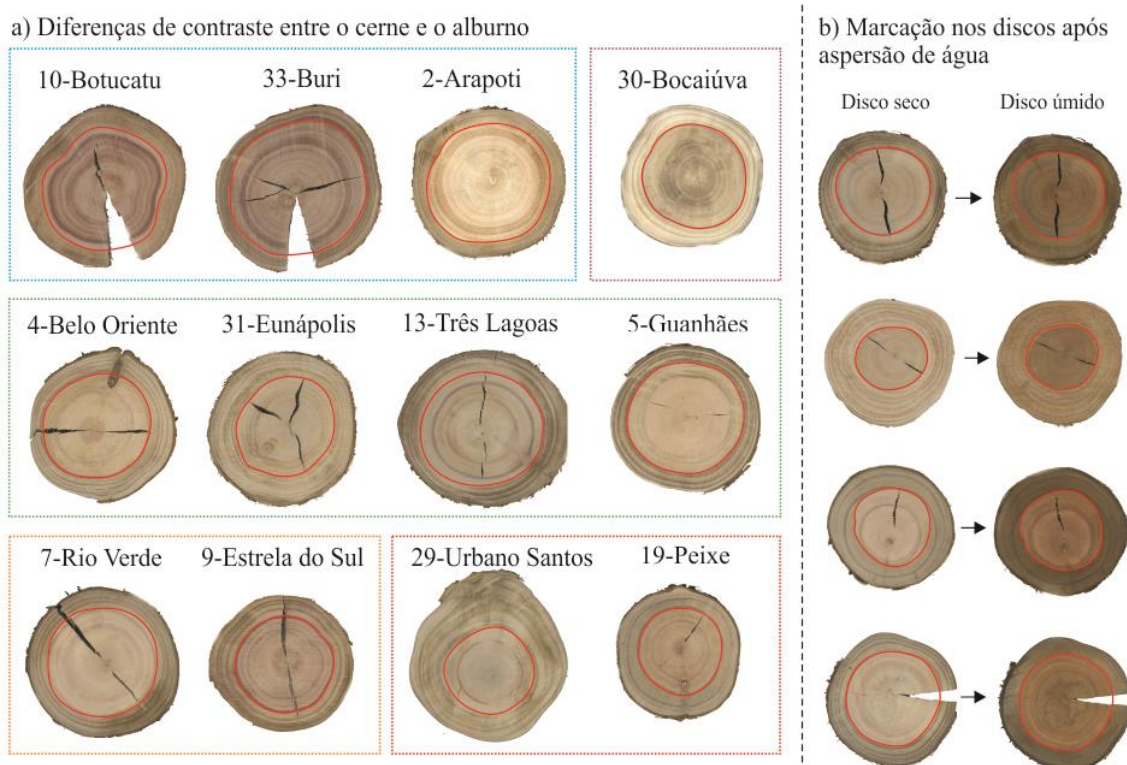
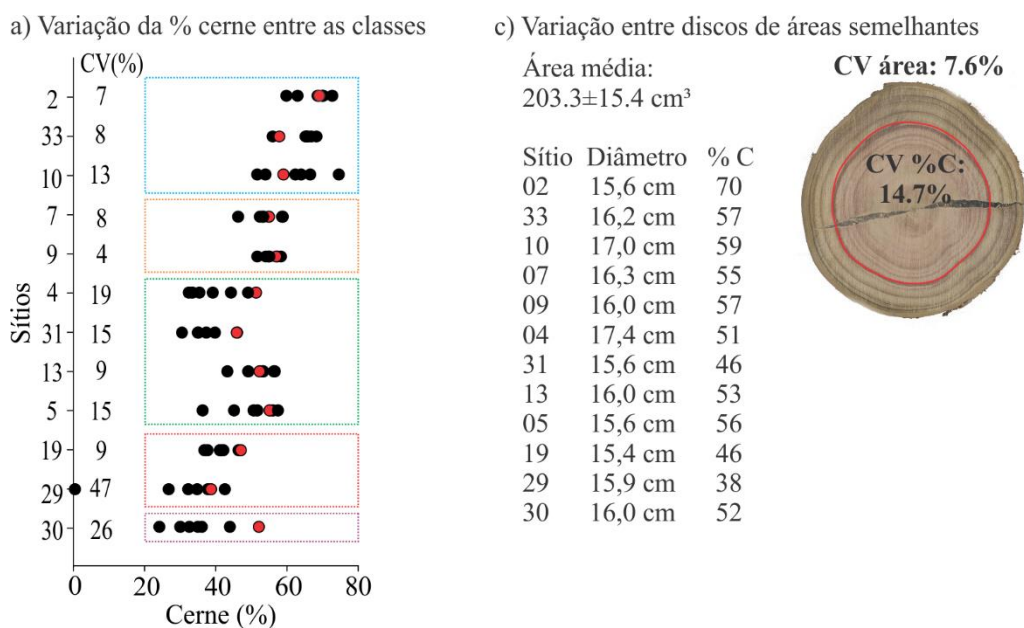


Figura 3. Discos da posição diâmetro a altura do peito (DAP), polidos com lixas de grãos 50 e 80 para delimitação de cerne na madeira de *E. urophylla* nos 12 sítios estudados. a) Os discos pertencem às árvores cortadas da classe de maior diâmetro (classe 7) e foram representados na mesma escala. Os retângulos pontilhados representam os grupos formados pelo agrupamento de acordo com as condições ambientais e de crescimento. b) As imagens do disco úmido foram utilizadas na delimitação e cálculo da porcentagem de cerne.

A porcentagem de cerne entre as classes de diâmetro de cada sítio variou entre 4 e 47% (Figura 4a). Comparando discos de mesma classe de diâmetro nos diferentes sítios, a variação de cerne foi maior nos discos de menores classes diamétricas, acompanhando a variação em relação à área total do disco (Figura 4b). Entre os sítios, considerando árvores com DAP semelhantes independente da classe de diâmetro, a porcentagem de cerne variou 14,7%, aproximadamente o dobro da variação de área entre os discos (Figura 4c). Apesar de estarmos comparando apenas uma árvore por sítio, esse comportamento indica que a formação de cerne nas árvores está sendo influenciada por outros fatores, além do crescimento, e entre eles, o clima local.



b) Variação entre discos de mesma classe diamétrica

Classe	1	2	3	4	5	6	7	
%C	40.1	25.8	30.1	26.3	19.0	26.2	18.7	
CV	Área	25.9	14.4	17.9	14.0	13.7	15.5	15.7

Figura 4. Variação da área total e da porcentagem de cerne nos discos. a) Variação entre classes de um mesmo sítio, os retângulos pontilhados representam os grupos formados no agrupamento e os pontos destacados em vermelhos discos com áreas totais semelhantes. b) Variação entre discos pertencentes a mesma classe de diâmetro em diferentes sítios. c) Variação entre os discos de áreas totais semelhantes, representados em vermelho em (a). CV: coeficiente de variação. %C: porcentagem de cerne.

Os sítios localizados em maiores latitudes e com W superior a 0,7 (02-Arapoti, 33-Buri e 10-Botucatu) apresentaram os maiores valores de %C, 67, 63 e 61%, respectivamente, diferindo estatisticamente dos demais (Figura 5a). O sítio 29 apresentou o menor valor %C, 30%, sendo também o sítio com menor crescimento e maior temperatura média. O aumento médio de índices de uso da água de 0,4 (média dos sítios 19, 29 e 30) para 0,9 (média dos sítios 2, 33 e 10) foi correspondente ao dobro da porcentagem de cerne formada.

Os sítios com maior %C não corresponderam aos com maior ou menor densidade (Figura 5b), não sendo possível estabelecer uma relação entre a quantidade de cerne produzida e a densidade das árvores. O sítio 19 apresentou o menor valor de densidade da madeira (DM) e os sítios 5, 9 e 10 foram àqueles com maiores médias de DM. Densidade de cerne (DC) variou de 0,45 a 0,58 g cm⁻³, enquanto a variação em densidade de alburno (DA) foi de 0,53 a 0,69 g cm⁻³ (Figura 5c e 5d). Em geral, DC foi menor que DA, com os sítios com menores IMAs apresentando os menores valores de DA (19 e 29) e os sítios com W e IMA mais

elevados (2, 33 e 10) foram inseridos no grupo de maior densidade. O sítio 30, apesar do baixo valor de W (0,4), apresentou DA semelhante aos sítios 4, 31 e 13 (W = 0,7).

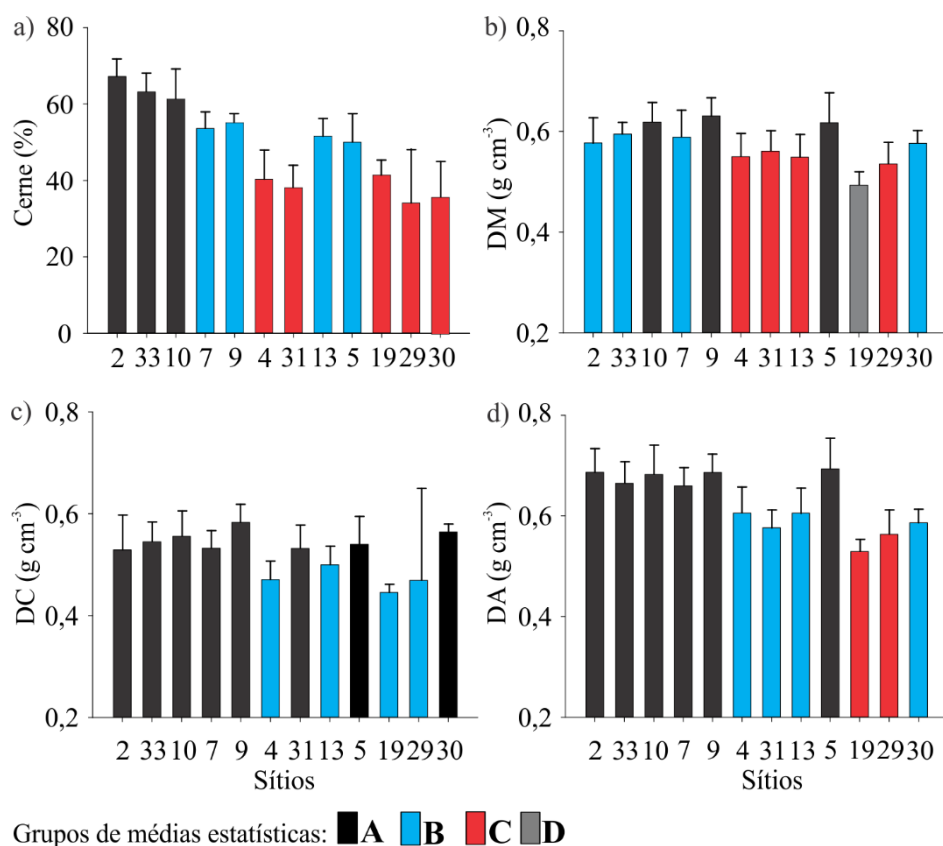


Figura 5. (a) Porcentagem de cerne, (b) densidade aparente da madeira (DM), (c) densidade de cerne (DC) e (d) densidade de alburno (DA) de *Eucalyptus urophylla* aos 6 anos de idade. As cores das barras correspondem a grupos de mesma média para teste Scott Knott ($\alpha=5\%$), sendo cores iguais, semelhantes estatisticamente.

Os sítios com maior %C não corresponderam aos com maior ou menor densidade (Figura 5b), não sendo possível estabelecer uma relação entre a quantidade de cerne produzida e a densidade das árvores. O sítio 19 apresentou o menor valor de densidade da madeira (DM) e os sítios 5, 9 e 10 foram àqueles com maiores médias de DM. Densidade de cerne (DC) variou de 0,45 a 0,58 g cm⁻³, enquanto a variação em densidade de alburno (DA) foi de 0,53 a 0,69 g cm⁻³ (Figura 5c e 5d). Em geral, DC foi menor que DA, com os sítios com menores IMAs apresentando os menores valores de DA (19 e 29) e os sítios com W e IMA mais elevados (2, 33 e 10) foram inseridos no grupo de maior densidade. O sítio 30, apesar do baixo valor de W (0,4), apresentou DA semelhante aos sítios 4, 31 e 13 (W = 0,7).

%C e DM se correlacionaram em níveis de força e significância diferentes com as variáveis (Figura 6). A correlação entre %C e DM não foi significativa. %C apresentou correlações fortes e significativas com T, P, DEF, W e IMA, e significativa,

porém moderada, com EUA. DM apresentou correlações moderadas e significativas apenas com T, EUA e IMA. Enquanto aumentos em T e DEF promovem diminuição nos valores de %C e DM, aumentos em P, W, EUA e IMA estabeleceram correlações positivas. IMA apresentou correlações fortes e negativas com T e DEF e forte e positiva com W e EUA. EUA também se correlacionou negativamente com T e DEF.

	%C								
%C	1								
DM	0,55	1							
T	-0,80*	-0,65*	1						
P	0,75*	0,21	-0,46	1					
DEF	-0,81*	-0,42	0,83*	-0,70*	1				
W	0,85*	0,36	-0,82*	0,74*	-0,97*	1			
EUA	0,61*	0,74*	-0,81*	0,21	-0,59*	0,53	1		
IMA	0,84*	0,58*	-0,84*	0,53	-0,87*	0,86*	0,84*	1	

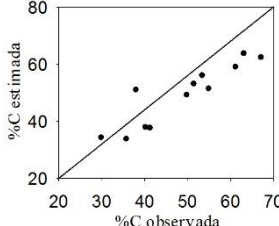
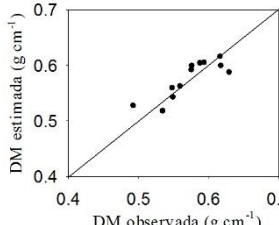
Figura 6. Matriz de correlação de Pearson entre as variáveis meteorológicas dos sítios e a porcentagem de cerne (%C) e a densidade da madeira (DM) de *Eucalyptus urophylla*. Onde: T: temperatura; P: precipitação, DEF: déficit hídrico, W: índice de uso da água, EUA: eficiência no uso da água, IMA: incremento médio anual. Correlações com * são significativas pelo teste de Pearson ($\alpha = 5\%$).

Para estimativa da %C, a melhor equação utilizou as variáveis independentes P e IMA, que conseguiram explicar 79% da variação da porcentagem de cerne (Tabela 2). O IMA contribuiu com aproximadamente 2/3 da precisão do modelo. %C apresentou correlações com DEF e W superiores à com P, entretanto, as correlações entre o IMA e essas variáveis também foram altas, de modo que somente o uso do IMA foi suficiente para explicar a influência desse conjunto de variáveis na %C, enquanto a correlação IMA e P não foi significativa. Desse modo, a inclusão dessa variável no modelo foi importante para o aumento do poder de predição da equação.

Para estimativa da densidade da madeira, a melhor equação utilizou somente a variável EUA e obteve um poder de explicação de 53% (Tabela 2). Apesar da correlação moderada com T, a equação utilizando essa variável diminuiu o poder de predição para 29%, e o RMSE para 5,0%. Equações utilizando mais de uma variável

apresentaram coeficientes não significativos, o que implica a não existência de uma associação entre o termo e a resposta a nível de significância de 0,05.

Tabela 2. Equações de regressão linear, gráficos 1:1 (observado x estimado), estatística de precisão, betas das estimativas e diagrama de correlação entre as variáveis utilizadas para a predição da porcentagem de cerne (%C) e a densidade da madeira (DM) de *Eucalyptus urophylla* aos 6 anos em função de variáveis climáticas e de crescimento em 12 sítios do Brasil.

Porcentagem de cerne	Equação: %C = 2,3929 + 0,0181*P + 0,4417*IMA						Gráfico 1:1 
	r ² _{aj} : 0,79						
	RMSE: 9,57%						
	Coeficientes:						
		Estimate	Betas	Std. Error	t value	Pr (> t)	
Intercept	2,39293		7,94217	0,301	0,77003		
P	0,01811	41%	0,00696	2,601	0,02869*		
IMA	0,44167	59%	0,11696	3,776	0,00437**		
Densidade da madeira	Equação: DM = 0,4691 + 0,0349*EUA						Gráfico 1:1 
	r ² _{aj} : 0,53						
	RMSE: 4,29%						
	Coeficientes:						
		Estimate	Betas	Std. Error	t value	Pr (> t)	
Intercept	0,46917		0,02973	15,777	2,15e-08 ***		
EUA	0,034935	100%	0,009535	3,664	0,00436 **		

Sendo: %C: porcentagem de cerne, DM: densidade da madeira, EUA: eficiência no uso da água; P: precipitação, IMA: incremento médio anual, r²_{aj}: coeficiente de determinação ajustado, RMSE: Raiz quadrada do erro médio. Signif. codes: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*'

Ao aplicar as equações para estimar a porcentagem de cerne e a densidade da madeira nos outros 4 clones, os erros médios obtidos para %C foram maiores do que aqueles para a DM (Figura 7). Nos clones C3 e Q8 foi possível observar o desvio da equação em mais locais. A correlação entre os dados observados e estimados mostrou que não houve viés nos gráficos, porém foi observada uma concentração de dados ajustados em uma região da linha de tendência.

Os clones G7 e H8 apresentaram menos locais com dados para teste de equação. Os dados obtidos tenderam a subestimar os valores de %C e DM, e como os outros 2 clones, os dados se concentraram em uma região da linha.

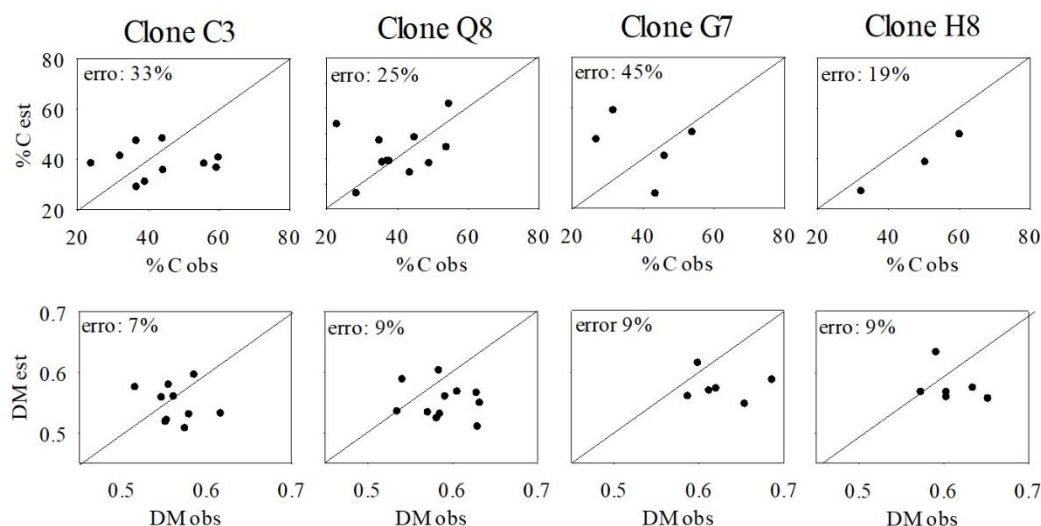


Figura 7. Gráficos da relação entre os valores observados e estimados usados para prever a porcentagem do cerne (%C) e a densidade da madeira (DM) dos clones C3, Q8, G7 e H8.

No clone A1, apenas o sítio 2 apresentou valor Huber significativamente diferente. O sítio 2 está entre os locais com menor déficit hídrico e maior crescimento, e este alto valor de Huber representa uma maior capacidade do clone de transportar água para as folhas nesse sítio. Em outros sítios, o valor Huber apresentou pouca variação, embora alguns clones se destaquem no crescimento e produção do cerne. Sítios semelhantes em clima, crescimento e produção de cerne, como os locais 2 e 10, apresentaram valores de Huber muito diferentes, indicando que a redução da área foliar foi usada como fator de controle para manter as características de crescimento.

O clone C3 apresentou valor Huber estatisticamente diferente apenas no sítio 4. Esse clone apresentou em alguns locais crescimento semelhante ao clone A1, apesar do índice de área foliar 33% inferior (BINKLEY et al., 2017). O clone Q8 apresentou as menores variações de valor de Huber. Essas diferenças reforçam a especificidade das relações entre abastecimento de água, área foliar, área de alburno e transpiração foliar em cada clone.

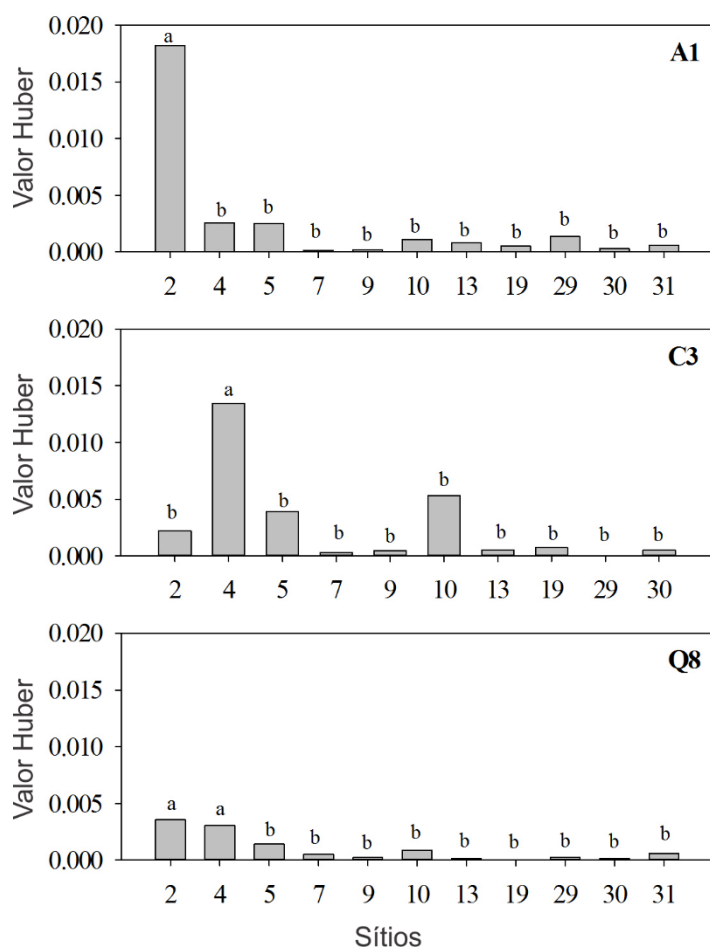


Figura 8. Valor de Huber (área de alburno:área foliar) para os clones A1, C3 e Q8 nos sítios avaliados.

5.4 DISCUSSÃO

Além da influência dos fatores macroclimáticos globais nas atividades cambiais das árvores na região sudeste do Brasil (VENEGAS-GONZÁLEZ et al., 2016, 2018), efeitos climáticos de mesoescala, como altitude e continentalidade, provocam alterações na distribuição líquida do saldo de radiação, evaporação da água e armazenamento de calor sensível no interior da floresta (REIS DE JESUS, 2008), de modo a separar sítios geograficamente próximos em grupos climáticos diferentes.

A disponibilidade de água é provavelmente uma das maiores limitações ao crescimento dos plantios de eucalipto, pois afeta substancialmente a eficiência do uso de recursos, bem como a alocação de biomassa (STAPE; BINKLEY; RYAN, 2004a). A separação dos sítios em cinco grupos expressa as diferenças climáticas entre eles e foi determinante para a diversidade de respostas do clone em produção de cerne e densidade da madeira.

O coeficiente de variação de ETR entre os sítios superior ao de ETP indica que as diferenças de ETR entre os sítios estão relacionadas em grande parte com o regime de chuvas e a capacidade de cada sítio disponibilizar água para as árvores ou da eficiência do uso da água pelas árvores (STAPE; BINKLEY; RYAN, 2004a). Essa relação é observada nos sítios 19 e 29, nos quais as elevadas temperaturas médias atingidas provavelmente induzem o fechamento estomático em condições de umidade do ar limitada, apesar da disponibilidade de água no solo, promovendo um menor crescimento das árvores (CAMPOE et al., 2016; GONÇALVES et al., 2017).

EUA apresentou seu maior valor de correlação com T (-0,81), e correlações fracas com P e W, o que sugere que a produção de madeira, para esse clone de *Eucalyptus urophylla*, foi mais fortemente associada a capacidade de manutenção da abertura estomática do que pela oferta de água. Do ponto de vista ecológico, esses resultados são positivos uma vez que a quantidade de água utilizada pelas plantações de eucaliptos é uma questão relevante em todo o mundo (BINKLEY et al., 2004; STAPE et al., 2004b).

A madeira dos sítios com maior W, mais úmidos, geralmente apresentou maior contraste de cor entre o cerne e alburno (Sítios 33, 10 e 2, Figura 3a), facilitando a diferenciação dos lenhos. Por serem componentes secundários, os extrativos são mais facilmente alterados em função das condições ambientais (MORAIS et al., 2005; MORAIS; PEREIRA, 2012), sendo a qualidade e quantidade de extrativos relacionadas com a cor da madeira (GOMINHO et al., 2001; ZANUNCIO et al., 2015).

A composição química da madeira do cerne e do alburno se diferem principalmente em relação aos extrativos (CHERELLI et al., 2018). O processo de formação de cerne é a principal causa de variação no tipo e quantidade desses componentes (PEREIRA et al., 2003).

A maior disponibilidade hídrica promoveu um aumento na proporção de cerne na madeira de *Eucalyptus urophylla*, associado ao maior crescimento das árvores. Apesar dos povoamentos terem a mesma idade, os sítios variaram significativamente em relação a quantidade de cerne produzida (30–68%), com %C estabelecendo uma correlação alta e positiva com o IMA ($r^2 = 0,84$). A árvore pertencente a menor classe de diâmetro no sítio 29-Urbano Santos, local com o menor IMA ($22,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), não apresentou cerne, o que sugere que a madeira começa a produzir cerne não em determinada idade, mas quando atinge determinado diâmetro.

Plantios de *Eucalyptus globulus* em Portugal apresentaram correlação positiva entre conteúdo de cerne e crescimento (GOMINHO; PEREIRA, 2000). Ainda na madeira de *Eucalyptus globulus*, um forte efeito ambiental foi encontrado relacionado à produção de cerne, com o melhor sítio, ou seja, aquele que proporcionou uma taxa de crescimento mais rápida, apresentando mais cerne (MIRANDA et al., 2007). Em *Pinus canariensis*, 51–73% da variação do raio do cerne foi explicada pela idade e crescimento inicial, já para valores fixos de idade e crescimento inicial, modelos previram cerne mais amplo em tipos de clima mais secos do que em clima úmido (CLIMENT et al., 2002).

Nessa pesquisa, discos com diâmetro similares, mas pertencentes a diferentes sítios, mantiveram a tendência de sítios com menor W apresentaram menor conteúdo de cerne, resultados que confirmam o clima como um fator essencial no desenvolvimento do cerne diretamente e indiretamente, pela influência na taxa de crescimento. A formação do cerne pode ser considerada como resposta a um estímulo hidráulico, que se desenvolve para manter uma proporção constante e ótima de alburno funcional no fuste da árvore (HACKE, 2015). A quantidade de alburno transformado em cerne é um processo regulado internamente pela árvore, sendo essa constante ótima um critério importante para a sobrevivência de uma espécie submetida a seca severa por longos períodos (BERTHIER et al., 2001).

O mecanismo de produção de cerne como controle da quantidade de alburno vai ao encontro do padrão de formação de cerne nos sítios em estudo, com sítios mais secos e de menor produtividade apresentando menor produção de cerne. Em Portugal, ambientes de crescimento com menores precipitações apresentaram maior

razão cerne/alburno em árvores de *Eucalyptus globulus* com idades de 12 a 15 anos (MORAIS; PEREIRA, 2012). A tendência inversa, observada nos resultados dessa pesquisa, pode estar associada a necessidade de maior área de alburno como um mecanismo de adaptação que aumente a capacidade de condutância do caule, uma vez que os vasos condutores apresentam menor diâmetro, controlando a cavitação, mas conseqüentemente, com menor capacidade de fluxo de água (LENS et al., 2013). Além disso, sítios mais úmidos também apresentaram maior crescimento, de modo que o incremento em diâmetro possibilita uma formação contínua de cerne, com o aumento do volume total de madeira e uma constância no volume de alburno.

Na equação selecionada para estimativa de %C, apesar do IMA apresentar maior peso no poder de predição, a presença de P demonstra que, apesar da forte influência da taxa de crescimento das árvores, o clima também interfere na formação de cerne. Relações alométricas simples com dados de inventário e evapotranspiração foram satisfatórios para estimar o índice de área de alburno em florestas de *E. regnans* na Austrália (BENYON et al., 2017). O IMA geralmente apresenta correlações fortes com variáveis meteorológicas, entretanto essa variável também é influenciada por fatores genéticos, idade e tratos silviculturais e, ao ser utilizado na equação, consegue agregar o peso desses outros fatores.

O IMA é diretamente relacionado ao crescimento do DAP, que, por sua vez, apresenta correlações positivas e negativas com a densidade básica da madeira (GALLO et al., 2018). Condições com alta disponibilidade hídrica geralmente estimulam o crescimento, o que pode promover diminuição na densidade da madeira (POORTER et al., 2009; TEI et al., 2017). Entretanto, aumentos da disponibilidade hídrica promovem aumentos na densidade em situações de expressão fenotípica ideal, ou seja, a espécie encontra-se em condições ideais de crescimento e valores de densidade (TAN et al., 2018).

Densidades de cerne menores que de alburno em *Eucalyptus urophylla*, aos 6 anos, provavelmente estão associadas aos primeiros anos de crescimento da árvore, com os resultados evidenciando nesse período uma maior influência do crescimento inicial das árvores na densidade do que o clima. A idade de transição entre o lenho juvenil e adulto em *E. grandis* ocorre geralmente entre o 5º e o 11º ano (RAMOS et al., 2011), de modo que as árvores avaliadas nessa pesquisa ainda apresentam somente lenho juvenil e, portanto, o aumento de densidade de cerne para alburno é associado a variação radial esperada no lenho juvenil de árvores jovens de eucalipto.

Desse modo, para estudos que relacionem as densidades de cerne e alborno seriam mais adequados delineamentos que considerem árvores adultas.

Os sítios com as menores densidades, 19-Peixe e 29-Urbano Santos, foram os únicos que apresentaram temperaturas médias acima de 25°C. Em mudas de eucalipto, os valores de densidade só foram alterados em temperaturas entre 25 e 30°C (THOMAS et al., 2007), sendo necessárias condições mais adversas que promovam modificações na alocação de carbono na árvore para variações significativas de densidade.

O EUA reúne, em uma única variável, fatores com grande influência na densidade da madeira, como crescimento e alterações do balanço hídrico. Isso contribui para que sua equação apresente alto poder de predição, enquanto o uso das variáveis meteorológicas de forma aditiva no modelo linear gerou equações com coeficientes não significativos e menores valores de r^2_{aj} .

Portanto, apesar de confirmada uma relação com o clima, a densidade apresenta um comportamento variável e dependente de diversos fatores relacionados também ao solo e ao fenótipo da árvore, além de ser uma propriedade com alta herdabilidade (HENRIQUES et al., 2017). Uma maior compreensão sobre essa propriedade pode ser obtida com estudos pontuais e que relacionem análises com reflexos diretos na densidade, como a anatomia da madeira.

Em experimentos TECHS, o crescimento dos clones variou fortemente em resposta às diferenças no clima entre os locais (BINKLEY et al., 2017). O uso da equação obtida para o clone A1 nos demais clones confirmou essa variabilidade de resposta também para as propriedades da madeira. Os clones A1, C3 e Q8 são considerados plásticos com base na expectativa de adequação para uma ampla gama de condições ambientais, e apresentam um comportamento mais semelhante, diferente dos clones G7 e H8, considerados tropicais.

Espera-se que ambientes úmidos tenham um valor de Huber menor, associado a um potencial aumento da condutância hidráulica foliar total devido à presença de mais folhas ligadas ao xilema ativo (GOTSCH et al., 2010). Na literatura, um valor Huber elevado é relacionado à um menor investimento na biomassa foliar em relação à área do alborno, o que geralmente é obtido em locais mais secos. Nestes sítios, as árvores possuem um mecanismo homeostático que pode atenuar o aumento da resistência hidráulica da árvore, minimizando assim o gradiente de potencial hídrico necessário para a obtenção de água no solo (MENCUCCINI, 2003). No entanto, nos nossos resultados, nenhuma relação foi observada entre valor Huber e condições

climáticas. Uma relação oposta ao apontado nos demais trabalhos foi observada no sítio 2, que apresentou os maiores valor Huber associados à baixa biomassa foliar. Os locais úmidos costumam estar relacionados a maior produtividade foliar (ZOLFAGHAR et al., 2015), porém o local 2, além de ser um local úmido, apresentou alto crescimento, o que pode ter levado à competição entre as árvores mais precocemente e, como consequência, à redução da copa.

Os resultados indicam que uma mudança para locais ligeiramente mais quentes ou mais secos pode levar além das mudanças no crescimento, alterações na formação de cerne e densidade da madeira. Na comparação de clones, o maior erro da equação %C em relação à de DM pode ser relacionado à forte influência do IMA na formação do cerne, uma vez que o IMA é mais influenciado pelo clima do que a DM. A disponibilidade de genótipos em programas de melhoramento é importante na tentativa de manter esse equilíbrio entre clones e locais adequados, sendo as plantações de eucalipto intensivamente manejadas para tolerar mudanças de temperatura e precipitação.

A possibilidade de modelar a quantidade de cerne e densidade da madeira com base em variáveis derivadas de fatores climáticos e dendrométricos fornece aos gestores florestais uma metodologia não invasiva de obtenção de atributos da qualidade da madeira (WOOD et al., 2016). Embora esta abordagem possa ser eficaz para elucidar flutuações dessas variáveis, sua aplicação é limitada. Diversos fatores, além das condições ambientais e climáticas, interagem influenciando o crescimento e a formação de madeira nas árvores (ZHANG et al., 2014); e contabilizar a variação de todos esses fatores requer um sistema de modelagem complexo.

CONCLUSÕES

Além da forte relação entre porcentagem de cerne e crescimento, foi constatado que o clima também influencia na formação de cerne. A porcentagem de cerne nas árvores de *Eucalyptus urophylla* aos seis anos variou de 30 a 68%, aumentando com gradiente latitudinal, de precipitação e do índice do uso da água. A variabilidade observada entre os sítios reforça a importância de novos estudos sobre avaliações mais práticas do conteúdo de cerne na madeira dessa espécie e sua inclusão entre as análises de caracterização da madeira.

A porcentagem de cerne se correlacionou linearmente com a precipitação e o IMA, sendo possível estimar %C utilizando essas duas variáveis. %C se mostrou uma característica mais correlacionada com o clima do que a densidade, com uma equação utilizando maior poder de predição e um padrão de variação ao longo do gradiente climático mais fácil de ser identificado. Os resultados obtidos reforçam a importância de avaliar opções de plantios em regiões de menor crescimento, mas que mantêm densidade e porcentagem de cerne, e fazer essas escolhas com base na demanda de madeira e na destinação final.

Os fatores que influenciam o comportamento do valor Huber são complexos e conhecer seus efeitos no transporte de água requer considerar os componentes dentro da mesma árvore e habitat, incluindo a disponibilidade de recursos. Relacionar o clima com %C e DM pode auxiliar na avaliação do impacto geral de mudanças climáticas, futuras ou relacionadas aos sítios de plantio, na qualidade da madeira.

REFERÊNCIAS

- ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941: madeira: determinação da densidade básica**. Rio de Janeiro, 2003.
- ASNER, G. P.; SCURLOCK, J. M. O.; HICKE, J. A. Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. **Global Ecology & Biogeography**, v. 12, n. 2003, p. 191–205, 2003.
- BAMBER, R. K. Heartwood, its function and formation. **Wood Science and Technology**, v. 10, n. 1, p. 1–8, 1976.
- BENYON, R. G.; NOLAN, R. H.; HAWTHORN, S. N. D.; LANE, P. N. J. Stand-level variation in evapotranspiration in non-water-limited eucalypt forests. **Journal of Hydrology**, v. 551, n. June, p. 233–244, 2017. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.002>>.
- BERTHIER, S.; KOKUTSE, A. D.; STOKES, A.; FOURCAUD, T. Irregular heartwood formation in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait): Consequences for biomechanical and hydraulic tree functioning. **Annals of Botany**, v. 87, n. 1, p. 19–25, 2001.
- BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C.; CARNEIRO, R. L.; CEGATTA, I.; STAPE, J. L. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal Eucalyptus plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 405, n. September, p. 271–283, 2017. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.050>>.
- BINKLEY, D.; STAPE, J. L.; RYAN, M. G. Thinking about efficiency of resource use in forests. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1–2, p. 5–16, 2004.
- BOND, B. J.; MEINZER, F. C.; BROOKS, J. R. How Trees Influence the Hydrological Cycle in Forest Ecosystems. In: M. Hannah; S. J.P. (Eds.); **Hydroecology and Ecohydrology: Past, Present and Future**. p.7–35, 2008.
- BRITO, A. S.; VIDAURRE, G. B.; OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. G. M.; RODRIGUES, B. P.; CARNEIRO, A. C. O. Effect of planting spacing in production and permeability of heartwood and sapwood of Eucalyptus wood. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. spe1, p. 1–9, 2019.
- CAMARGO, A. P. DE. Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Bragantia**, 1962.
- CAMPOE, O. C.; MUNHOZ, J. S. B.; ALVARES, C. A.; CARNEIRO, R. L.; MATTOS, E. M.; FERREZ, A. P. C.; STAPE, J. L. Meteorological seasonality affecting individual tree growth in forest plantations in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 380, p. 149–160, 2016.
- CHAN, J. M.; RAYMOND, C. A.; WALKER, J. C. F. Development of heartwood in response to water stress for radiata pine in Southern New South Wales, Australia. **Trees - Structure and Function**, v. 27, n. 3, p. 607–617, 2013.
- CHERELLI, S. G.; SARTORI, M. M. P.; PRÓSPERO, A. G.; BALLARIN, A. W. Heartwood and sapwood in eucalyptus trees: Non-conventional approach to wood quality. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 1, p. 425–438, 2018.

ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; FREITAS, C. H. DE; CARNEIRO, R. L.; ALVARES, C. A. Intercomparison of structural features and performance of Eucalyptus simulation models and their ensemble for yield estimations. **Forest Ecology and Management**, v. 450, n. June, p. 117493, 2019.

FROMM, J. (ED.). **Cellular Aspects of Wood Formation**. Springer, 2013.

GALLO, R.; PANTUZA, I. B.; SANTOS, G. A. DOS; RESENDE, M. D. V.; XAVIER, A.; SIMIQUELI, G. F.; BALDIN, T. SANTOS, O. P.; VALENTE, B. M. R. T. Growth and wood quality traits in the genetic selection of potential *Eucalyptus dunnii* Maiden clones for pulp production. **Industrial Crops and Products**, v. 123, n. July, p. 434–441, 2018.

GIERLINGER, N.; JACQUES, D.; GRABNER, M.; WIMMER, R.; SCHWANNINGER, M.; ROZENBERG, P.; PÂQUES, L. E. Colour of larch heartwood and relationships to extractives and brown-rot decay resistance. **Trees - Structure and Function**, v. 18, n. 1, p. 102–108, 2004.

GOMINHO, J.; FIGUEIRA, J.; RODRIGUES, J. C.; PEREIRAT, H. Within-tree variation of heartwood, extractives and wood density in the eucalypt hybrid *Urograndis* (*Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*). **Wood and Fiber Science**, v. 33, n. 1, p. 3–8, 2001.

GOMINHO, J.; PEREIRA, H. The influence of tree spacing in heartwood content in *Eucalyptus globulus* Labill. **Wood and fiber science**, v. 4, n. 37, p. 582–590, 2005. Disponível em: <<http://swst.metapress.com/index/T45P22160407717P.pdf>>.

GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; ROCHA, J. H. T.; BRANDANI, C. B.; HAKAMADA, R. Eucalypt plantation management in regions with water stress. **Southern Forests**, v. 79, n. 3, p. 169–183, 2017.

GOTSCH, S. G.; GEIGER, E. L.; FRANCO, A. C.; GOLDSTEIN, G.; MEINZER, F. C.; HOFFMANN, W. A. Allocation to leaf area and sapwood area affects water relations of co-occurring savanna and forest trees. **Oecologia**, v. 163, n. 2, p. 291–301, 2010.

HACKE, U. **Functional and Ecological Xylem Anatomy**. Switzerland: Springer, 2015.

HENRIQUES, E. P.; MORAES, C. B. DE; SEBBENN, A. M.; TOMAZELLO-FILHO, M.; MORAES, M. L. T.; MORI, E. S. Estimativa de parâmetros genéticos para caracteres silviculturais e densidade do lenho em teste de progênies de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 45, n. 113, p. 119–128, 2017.

HILL, K. E.; GUERIN, G. R.; HILL, R. S.; WATLING, J. R. Temperature influences stomatal density and maximum potential water loss through stomata of *Dodonaea viscosa* subsp. *angustissima* along a latitude gradient in southern Australia. **Australian Journal of Botany**, v. 62, n. 8, p. 657–665, 2014.

HILLIS, W. E. **Heartwood and tree exudates**. Springer, 1987.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. 2018.

LENS, F.; TIXIER, A.; COCHARD, H.; SPERRY, J. S.; JANSEN, S.; HERBETTE, S. Embolism resistance as a key mechanism to understand adaptive plant strategies. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 16, n. 3, p. 287–292, 2013.

LOURENÇO, A.; GOMINHO, J.; PEREIRA, H. Pulping and delignification of sapwood and heartwood from *Eucalyptus globulus*. **Journal of Pulp and Paper Science**, v. 36, n. 3, p. 85–90, 2010. Disponível em: <http://www.researchgate.net/publication/233401328_Pulping_and_Delignification_of_Sapwood_and_Heartwood_from_Eucalyptus_Globulus/file/9fcfd50a3dc7071026.pdf>.

MACFARLANE, C.; WHITE, D. A.; ADAMS, M. A. The apparent feed-forward response to vapour pressure deficit of stomata in droughted, old-grown. **Plant, Cell and Environment**, v. 27, p. 1268–1280, 2004.

MATTOS, E. M.; BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C. A.; STAPE, J. L. Variation in canopy structure, leaf area, light interception and light use efficiency among *Eucalyptus* clones. **Forest Ecology and Management**, v. 463, n. November 2019, p. 118038, 2020. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118038>>.

MEINZER, F. C.; WOODRUFF, D. R.; DOMEQ, J. C.; GOLDSTEIN, G.; CAMPANELLO, P. I.; GATTI, M. G.; VILLALOBOS-VEGA, R. Coordination of leaf and stem water transport properties in tropical forest trees. **Oecologia**, v. 156, n. 1, p. 31–41, 2008.

MENCUCCINI, M. The ecological significance of long-distance water transport: Short-term regulation, long-term acclimation and the hydraulic costs of stature across plant life forms. **Plant, Cell and Environment**, v. 26, n. 1, p. 163–182, 2003.

MENEZES, A. **Produtividade do Eucalipto e sua relação com a qualidade e a classe de solo**, 2005. Universidade Federal de Viçosa.

MIRANDA, I.; GOMINHO, J.; LOURENÇO, A.; PEREIRA, H. Heartwood, extractives and pulp yield of three *Eucalyptus globulus* clones grown in two sites. **Appita Journal**, v. 60, n. 6, p. 485–488, 2007.

MORAIS, M. C.; PEREIRA, H. Variation of extractives content in heartwood and sapwood of *Eucalyptus globulus* trees. **Wood Science and Technology**, v. 46, p. 709–719, 2012.

MORAIS, S. A. L.; NASCIMENTO, E. A.; MELO, D. C. Chemical analysis of *Pinus oocarpa* wood part I - Quantification of macromolecular components and volatile extractives. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p. 461–470, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622005000300014&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>.

PEREIRA, H.; GRAÇA, J.; RODRIGUES, J. C. **Wood quality and its biological basis**. In: J. R. Barnett; G. Jeronimidis (Eds.); *Wood quality and its biological basis*. p.226, 2003. Oxford: Blackwell Publishing.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. 2019. Vienna. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>.

RAMOS, L. M. A.; LATORRACA, J. V. D. F.; PASTRO, M. S.; SOUZA, M. T.; GARCIA, R. A.; CARVALHO, A. M. Variação radial dos caracteres anatômicos da madeira de

Eucalyptus grandis W. Hill Ex Maiden e idade de transição entre lenho juvenil e adulto. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 92, p. 411–418, 2011.

ROCHA, S. M. G.; VIDAURRE, G. B.; PEZZOPANE, J. E. M.; ALMEIDA, M. N. F.; CARNEIRO, R. L.; CAMPOE, O. C.; SCOLFORO, H. F.; ALVARES, C. A.; NEVES, J. C. L.; XAVIER, A. C.; FIGURA, M. A. Influence of climatic variations on production, biomass and density of wood in eucalyptus clones of different species. **Forest Ecology and Management**, v. 473, n. 82, p. 118290, 2020. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118290>>.

SILVA, D. A. DA; TRUGILHO, P. F. Comportamento Dimensional Da Madeira De Cerne E Alburno Utilizando-Se a Metodologia De Análise De Imagem Submetida a Diferentes Temperaturas Dimensional Behavior of the Wood of Sapwood and Heartwood for Analysis of Image Submitted in Different Temperature. **Cerne**, v. 9, p. 56–65, 2003.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1–2, p. 17–31, 2004a.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G.; GOMES, A. Water use, water limitation, and water use efficiency in a Eucalyptus plantation. **Bosque** (Valdivia), v. 25, n. 2, p. 35–41, 2004b.

TAN, B.; GRATTAPAGLIA, D.; WU, H. X.; INGVARSSON, P. K. Genomic relationships reveal significant dominance effects for growth in hybrid Eucalyptus. **Plant Science**, v. 267, n. November 2017, p. 84–93, 2018.

TAYLOR, A. M.; GARTNER, B. L.; MORRELL, J. J. Heartwood formation and natural durability - a review. **Wood and Fiber Science**, v. 34, n. 4, p. 587–611, 2002.

TEI, S.; SUGIMOTO, A.; YONENOBU, H.; MATSUURA, Y.; OSAWA, A.; SATO, H.; FUJINUMA, J.; MAXIMOV, T. Tree-ring analysis and modeling approaches yield contrary response of circumboreal forest productivity to climate change. **Global Change Biology**, v. 23, n. 12, p. 5179–5188, 2017.

THOMAS, D. S.; MONTAGU, K. D.; CONROY, J. P. Temperature effects on wood anatomy, wood density, photosynthesis and biomass partitioning of *Eucalyptus grandis* seedlings. **Tree Physiology**, v. 27, p. 251–260, 2007.

VENEGAS-GONZÁLEZ, A.; CHAGAS, M. P.; ANHOLETTO JÚNIOR, C. R.; ALVARES, C. A.; ROIG, F. A.; TOMAZELLO FILHO, M. Sensitivity of tree ring growth to local and large-scale climate variability in a region of Southeastern Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 123, n. 1–2, p. 233–245, 2016.

VENEGAS-GONZÁLEZ, A.; ROIG, F. A.; LISI, C. S.; ALBIERO JUNIOR, A.; ALVARES, C. A.; TOMAZELLO-FILHO, MARIO. Drought and climate change incidence on hotspot *Cedrela* forests from the Mata Atlântica biome in southeastern Brazil. **Global Ecology and Conservation**, v. 15, 2018.

WOOD, L. J.; SMITH, D. J.; HARTLEY, I. D. Predicting softwood quality attributes from climate data in interior British Columbia, Canada. **Forest Ecology and Management**, v. 361, p. 81–89, 2016. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2015.11.004>>.

ZAHID, D. M.; NAWAZ, A. Comparative Water Use Efficiency of *Eucalyptus camaldulensis* Versus *Dalbergia sissoo* in Pakistan. **International Journal of Agriculture & Biology**, v. 9, n. 4, p. 540–544, 2007.

ZANUNCIO, A. J. V.; CARVALHO, A. G.; SOUZA, M. DE; JARDIM, C. M.; CARNEIRO, A. C. O.; COLODETTE, J. L. Effect of extractives on wood color of heat treated *Pinus radiata* and *Eucalyptus pellita*. *Maderas. Ciencia y tecnología*, v. 17, n. 4, p. 857–864, 2015.

ZHANG, J.; NIEMINEN, K.; SERRA, J. A. A.; HELARIUTTA, Y. The formation of wood and its control. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 17, n. 1, p. 56–63, 2014.

ZOBEL, B.; JETT, J. **Genetics of wood production**. 1st ed. Berlin: Springer-Verlag, 1995.

ZOLFAGHAR, S.; VILLALOBOS-VEGA, R.; ZEPPEL, M.; EAMUS, D. The hydraulic architecture of *Eucalyptus* trees growing across a gradient of depth-to-groundwater. **Functional Plant Biology**, v. 42, n. 9, p. 888–898, 2015.

6 CAPÍTULO 2

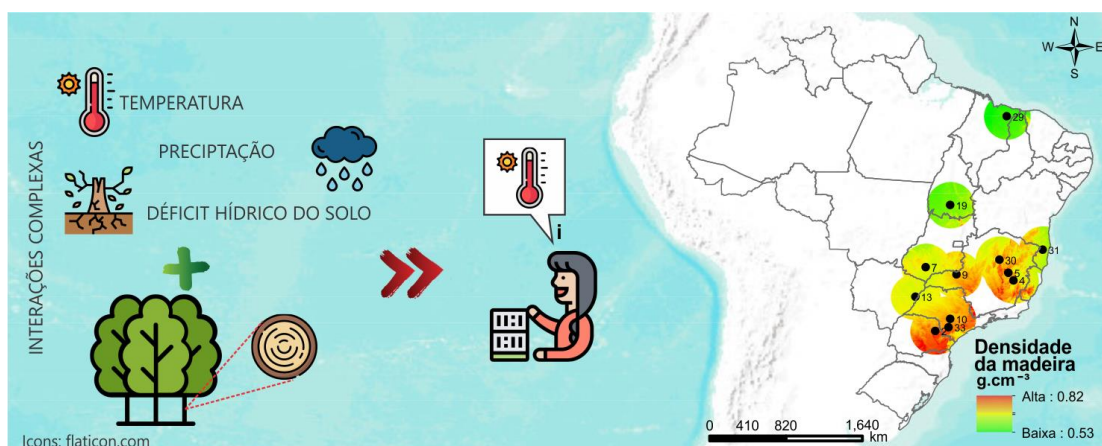
Variações na densidade da madeira de um clone de *E. urophylla* entre sítios estão relacionadas com o clima

Resumo:

O gênero eucalipto é extensivamente plantado no Brasil para uso industrial e com a expansão das fronteiras florestais e previsões de alterações climáticas locais, são necessários estudos sobre como essas mudanças afetam a densidade da madeira. O clone de *E. urophylla* mais plantado no Brasil foi utilizado para esse estudo. O objetivo do trabalho foi identificar o ciclo de crescimento mais susceptível a influência do clima e a variável mais relacionada a essas mudanças, além de estimar e especializar a tendência de valores de densidade que esse clone pode atingir em gradiente climático no Brasil. A madeira de árvores coletadas em 12 sítios, distribuídos em um gradiente climático no Brasil, foi avaliada em relação à densidade da madeira (DM). Cinco ciclos de crescimento foram identificados, com a utilização de lupa, densitometria de raios-X e inventário florestal. Os valores de densidade foram comparados e correlacionados com variáveis meteorológicas, temperatura (T), precipitação (P), déficit hídrico (DEF), largura do ciclo (LC) e incremento em volume do ciclo (IVC). Não houve variação de DM de *E. urophylla* nos primeiros 20 meses de crescimento das árvores entre sítios. A partir dessa idade, DM se correlacionou principalmente com T ($r > 0,6$). O aumento em 1°C em T resultou na redução de DM em 0,014 g cm⁻³, e aumentos de 10 m³ ha⁻¹ no volume final foram relacionados a um aumento de 0,004 g cm⁻³ em DM. A espacialização da densidade mostrou uma tendência de gradiente positivo de densidade do norte para o sul do Brasil. O clone de *E. urophylla* expressou seu melhor fenótipo nos sítios com condições climáticas mais próximas às condições para qual foi melhorado, e a escolha do sítio se revelou um fator mais importante do que as flutuações do clima em cada local.

Palavras-chave: qualidade da madeira; condições climáticas; crescimento anual.

Resumo gráfico:



Destaques:

- A influência do clima na densidade da madeira de *E. urophylla* foi maior a partir do terceiro ano de crescimento.
- A temperatura média do ar foi a variável climática que melhor se correlacionou com a densidade da madeira de *E. urophylla*.
- O gradiente climático entre sítios foi mais importante na variação da densidade da madeira de *E. urophylla* do que a variabilidade entre os anos.

6.1 INTRODUÇÃO

O crescimento secundário (radial) da planta é um processo dinâmico e relacionado a fatores externos como clima e solo (PILLAI et al., 2013; ZHANG et al., 2014; MENDIVELSO et al., 2016). Mudanças nas condições climáticas estimulam a atividade cambial das plantas e podem modificar as características da madeira (ZOBEL; JETT, 1995). O gênero *Eucalyptus* é um dos mais plantados nos trópicos (AMAZONAS et al., 2018), principalmente por conter espécies altamente produtivas com propriedades da madeira desejáveis para múltiplos usos (VANCE et al., 2014). A interação genótipo x ambiente afeta diretamente o potencial de produção de madeira em florestas plantadas de eucalipto no Brasil, e o maior crescimento das plantações diminui em condições mais quentes e secas, abaixo de cerca de 900 mm ano⁻¹ de chuva e temperatura média anual de 26°C (BINKLEY et al., 2020).

A área total plantada com eucalipto no Brasil é de 6,97 milhões de ha (Figura 1), com predominância nos estados de Minas Gerais (24%) e São Paulo (17%) (IBA, 2020). Essas são regiões onde o eucalipto é tradicionalmente plantado por apresentarem clima favorável ao crescimento e vantagens logísticas na distribuição da madeira, sendo seus monocultivos intensamente estudados. No entanto, o setor florestal brasileiro encontra-se atualmente em fase de expansão, o que tem levado o cultivo de eucalipto para as regiões centro-oeste e norte do Brasil (CALDEIRA et al., 2020). Nos últimos sete anos, o crescimento médio da área de eucalipto foi de 1,1% ao ano, com Mato Grosso do Sul liderando essa expansão com aumento da área cultivada de 6 para 16% (ABRAF, 2010; IBA, 2019).

Os novos locais de plantio caracterizam-se por climas mais secos (altas temperaturas e menor precipitação), e a dinâmica do crescimento da floresta e suas consequências nas propriedades da madeira ainda não são bem conhecidas. Além disso, estudos relacionados às mudanças climáticas preveem aumento de 1 a 3,7°C na temperatura média do ar e mudanças nos padrões de distribuição e precipitação total acumulada até o final do século 21 (IPCC, 2015). Essas mudanças iminentes de regiões de plantio e do clima local no futuro revelam a necessidade de novos estudos, pois podem promover alterações tanto no crescimento das árvores quanto nas propriedades da madeira.

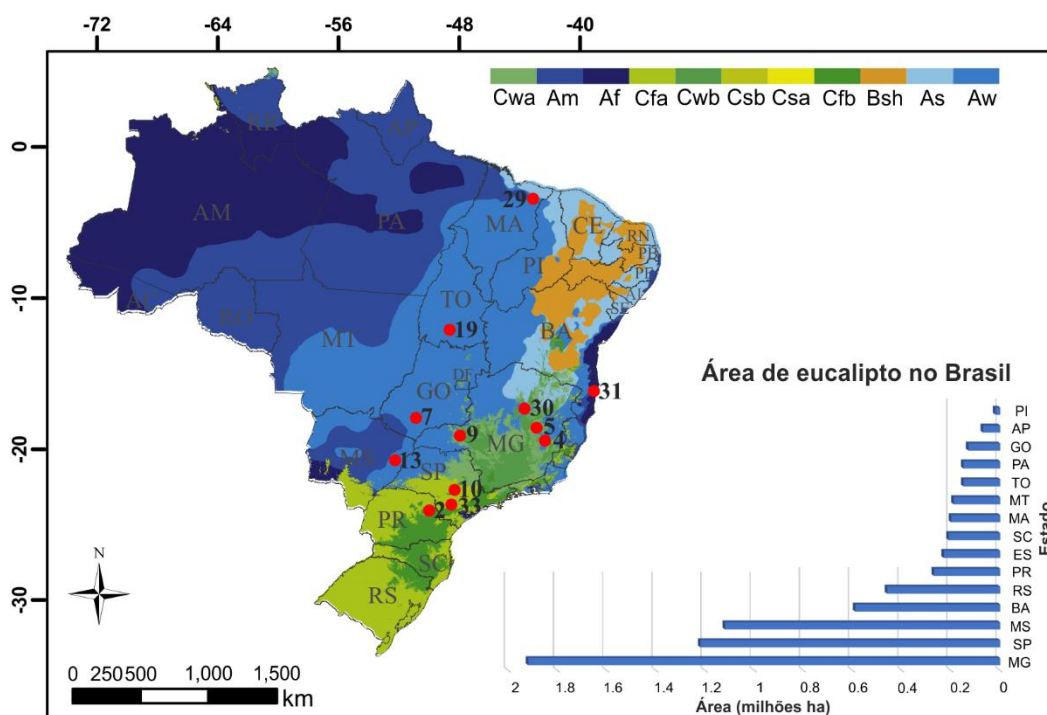


Figura 1. Localização dos 12 sítios do TECHS avaliados. Área florestal plantada com eucalipto no Brasil foi obtida no relatório anual do IBA (2020).

E. urophylla é a espécie comercial de eucalipto mais amplamente utilizada no Brasil (NÓIA JÚNIOR et al., 2020), e o clone que foi utilizado neste estudo apresenta altas taxas de crescimento ($60\text{--}70\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}\text{ ano}^{-1}$) sob condições ambientais favoráveis (CALDEIRA et al., 2020). Além disso, *E. urophylla* é uma das espécies do gênero tolerante à seca (FLORES et al., 2016), o que também contribui para melhorar a capacidade de formação de dossel, tolerância à ferrugem (*Austropuccinia psidii*), enraizamento e densidade da madeira quando associada em híbridos (KULLAN et al., 2012; SILVA et al., 2019). Por isso, além de ser amplamente plantado no Brasil, tem sido objeto de estudos para utilização nos novos locais de plantio.

A densidade da madeira tem sido considerada o atributo mais importante de qualidade da madeira por estar relacionada à processos e rendimentos industriais (ZOBEL; BUIJTENEN, VAN, 1989). Variações na densidade são indicadoras para diferentes usos da madeira, como celulose, carvão, produção de energia, painéis e madeira maciça (ZHANG, 2003).

A maioria das plantações de eucalipto são gerenciadas para rotações curtas, em média 6 a 8 anos (GONÇALVES et al., 2017), e diferente do acompanhamento do crescimento das árvores em diâmetro e altura, geralmente as análises das propriedades da madeira são realizadas apenas no final do ciclo de corte. Estudos com medições anuais de árvores jovens são raros, no entanto, a densidade da

madeira varia com a idade das árvores (RESQUIN et al., 2019). A hipótese levantada neste estudo foi de que a influência do clima na densidade da madeira muda com a idade das árvores de *E. urophylla*, sendo as diferenças de precipitação entre os locais a principal variável climática relacionada às mudanças na densidade da madeira. Assim, os objetivos deste estudo foram identificar o ciclo de crescimento mais suscetível à influência climática de um clone de *E. urophylla* e a variável mais relacionada a essas mudanças, além de utilizar esta variável para estimar e espacializar os valores de densidade que este clone pode atingir em um gradiente climático no Brasil.

6.2 MATERIAL E MÉTODOS

6.2.1 Amostragem e mensuração das árvores

Amostras de madeira do clone de *Eucalyptus urophylla* foram coletadas em 12 locais de experimentos no Brasil (Figura 1 / Tabela 1). O clone é identificado como A1 na lista de clones do Programa Cooperativo de Tolerância de Clones de Eucalipto a Estresses Hídrico, Térmicos e Bióticos (TECHS / IPEF) (BINKLEY et al., 2017; MATTOS et al., 2020). Os plantios foram realizados entre 2011 e 2012 e conduzidos até 2018, média de 6 anos (Tabela 1).

Tabela 1. Localização dos 12 sítios do TECHS avaliados.

Sítio ¹	Cidade próxima/Estado	Koppen ²	Latitude	Longitude	Plantio	Colheita
2	Arapoti / PR	Cfb	24,2° S	50,0° W	Dez/2011	Out/2018
4	Belo Oriente / MG	Aw	19,3° S	42,4° W	Dez/2011	Abr/2018
5	Guanhães / MG	Cwa	18,6° S	42,9° W	Jan/2012	Mai/2018
7	Rio Verde / GO	Aw	18,0° S	50,9° W	Fev/2012	Mar/2018
9	Estrela do Sul / MG	Cwa	18,7° S	47,9° W	Dez/2011	Mai/2018
10	Botucatu / SP	Cfa	23,0° S	48,5° W	Dez/2011	Abr/2018
13	Três Lagoas / MS	Aw	20,9° S	51,9° W	Mai/2012	Mai/2018
19	Peixe / TO	Aw	12,0° S	48,5° W	Mar/2012	Jan/2018
29	Urbano Santos / MA	As	3,4° S	43,1° W	Mar/2012	Set/2018
30	Bocaiúva / MG	Aw	17,3° S	43,8° W	Dez/2011	Fev/2018
31	Eunápolis / BA	Af	16,3° S	39,6° W	Jan/2012	Mai/2018
33	Buri / SP	Cfb	23,9° S	48,7° W	Dez/2011	Mai/2018

¹Os mesmos números usados originalmente pelo programa TECHS foram usados para identificar os sítios.

²Classificação histórica de Koppen atualizada por Alvares et al. (2013b). Af: Tropical equatorial; Aw: Tropical com estação seca e verão chuvoso; As: Tropical com verão seco e inverno chuvoso; Cfa: Subtropical úmido com verão quente; Cfb: Subtropical úmido com verão fresco; Cwa: Subtropical úmido com inverno seco e verão quente.

A parcela padrão adotada possuía 8 linhas x 15 árvores, com espaçamento de 3 x 3 m. As árvores foram fertilizadas durante o primeiro ano para corrigir e evitar qualquer deficiência nutricional e herbicidas foram usados para controle fitossanitário. Ver Binkley et al. (2017) para detalhes silviculturais adicionais aplicados aos experimentos.

Sete árvores de cada sítio foram selecionadas de acordo com a divisão da amplitude do DAP (diâmetro a altura do peito, medido a 1,30m do solo) da parcela em sete classes. As classes foram separadas com base no inventário florestal realizado aos seis anos. Devido às diferentes taxas de crescimento, os sítios diferiram nas faixas

de amplitude e o intervalo de classe diamétrica foi específico para cada sítio. Uma árvore foi colhida por classe de diâmetro, totalizando 84 árvores (Figura 2a) para melhor representar a variação do sítio. Árvores mortas, tortas, danificadas e doentes não foram selecionadas. Um disco de madeira, com aproximadamente 3 cm de espessura, foi retirado na altura do DAP de cada árvore, com o qual foram realizadas as análises de densidade aparente por técnica de densitometria de raios X.

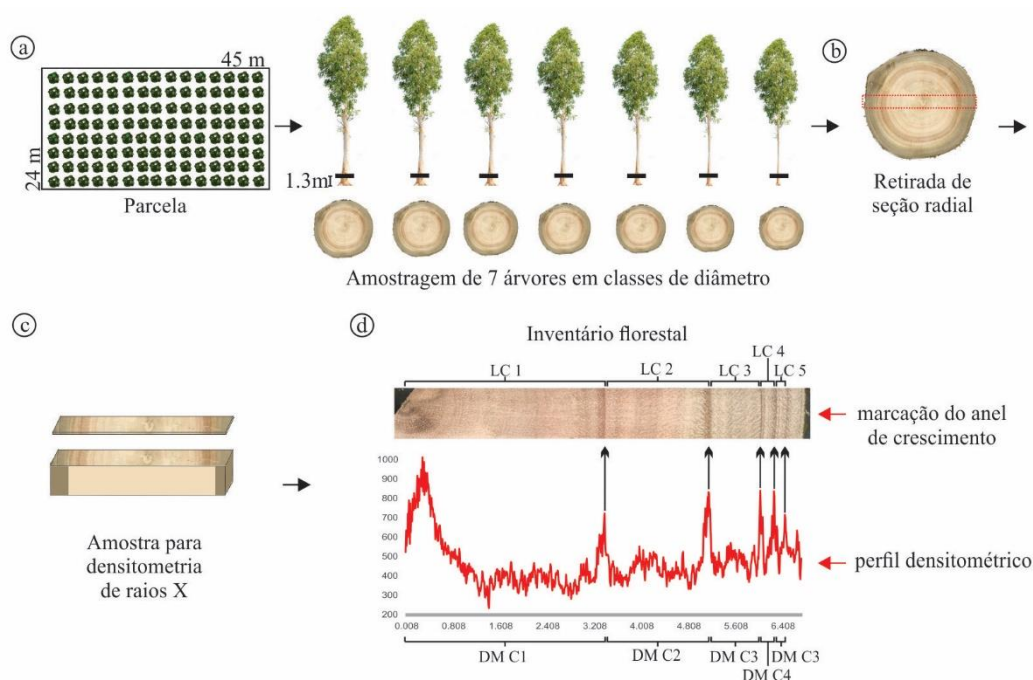


Figura 2. Seleção amostral e seqüência de análise da madeira do clone de *Eucalyptus urophylla*. Os procedimentos foram realizados nos sete discos retirados de cada sítio avaliado. DM C: densidade da madeira do ciclo, LC: largura do ciclo.

Uma seção radial de 1 cm de largura foi removida dos discos (Figura 2b), colada em suporte apropriado, cortada em seções de 1 mm de espessura e climatizada à 20°C, 60% de umidade relativa, durante 24 h (Figura 2c). A densidade aparente foi determinada pela técnica de densitometria de raios X (QTRS-01X). A intensidade dos raios X através da amostra de madeira foi transformada em densidade aparente pelo software Quintek Measurement Systems (Tree Ring Analyzer). A resolução de leitura da densidade aparente pelo software foi de 80 μm . Os valores da densidade radial foram salvos em um arquivo DAT e lidos pelo software Excel.

Dois raios de cada disco foram usados para análise dos perfis de densitometria radial. Em todas as amostras, os raios foram demarcados e divididos em cinco ciclos de crescimento baseado na visualização de anéis de crescimento com o auxílio de lupa (10x), análise das variações da densidade e no perfil densitométrico e

incrementos anuais médios em diâmetro das árvores obtidos por inventário semestral (Figura 2d). A largura do ciclo (LC) foi determinado pela largura (cm) da região demarcada em cada ciclo. A densidade da madeira (DM) de cada ciclo foi obtida pela média dos valores de densidade obtidos em cada sessão de LC; e a densidade média da árvore foi obtida pela média dos valores de densidade dos cinco ciclos. O valor médio das sete amostras de madeira foi usado para comparação. O fim do ciclo foi marcado nos meses de menor precipitação (julho / agosto) (Tabela 2). Devido ao rápido crescimento inicial do eucalipto, em todos os sítios, a demarcação do primeiro ciclo de crescimento só foi possível a partir do segundo ano de crescimento das árvores (julho / agosto de 2013), cerca de 20 meses para os sítios plantados em fevereiro de 2012, enquanto os demais ciclos foram marcados anualmente (a cada 12 meses). Desse modo, o primeiro ciclo corresponde ao período de jan/2012 a ago/2013, o ciclo 2 de set/2013 a ago/2014 e assim sucessivamente, como ilustrado na Figura 2d. O crescimento durante o período de ago/2017 não foi comparado por não ser possível observar crescimento em largura no disco, ou seja, o anel não foi totalmente formado.

6.2.2 *Obtenção das variáveis meteorológicas*

Dados meteorológicos de temperatura do ar média, máxima e mínima, umidade relativa média, velocidade do vento a 10 metros, radiação solar global e precipitação para o período de 2012 a 2018 foram obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), e dados perdidos foram preenchidos (ELLI et al., 2019; ROCHA et al., 2020). Os valores anuais de temperatura (T) foram calculados pela média aritmética da temperatura média mensal e precipitação (P) anual foi calculado pela soma da precipitação acumulada.

Para cálculo do déficit hídrico do solo (DEF) foi realizado o balanço hídrico climatológico sequencial em escala mensal conforme apresentado por Thornthwaite and Mather em 1955 (CAMARGO, 1962). A evapotranspiração potencial foi calculada pelo método de Penman-Monteith (PM-FAO 56). A água disponível no solo foi estimada pela equação proposta por Menezes (2005), utilizando os teores de silte e argila dos solos caracterizados nas áreas experimentais. A capacidade de armazenamento de água no solo (CAD) foi calculada considerando os valores de água disponível à dois metros de profundidade efetiva do solo. DEF anual foi obtido pela soma dos déficits hídricos mensais.

Tabela 2. Precipitação média mensal (mm) no período de 2012 a 2018 nos 12 locais avaliados.

	Sítios											
	2	33	10	4	31	9	13	5	7	19	29	30
Jan.	146,6	210,2	240,1	165,2	89,4	246,2	207,0	183,5	268,5	238,8	190,3	168,9
Fev.	190,3	146,5	184,1	152,3	84,1	175,6	146,0	103,0	193,2	190,6	269,4	42,0
Mar.	131,6	140,1	139,4	109,1	42,4	203,8	144,9	117,7	289,1	177,1	259,1	69,4
Abr.	103,9	93,1	101,5	83,2	67,9	103,5	61,8	51,6	103,7	84,1	193,0	26,1
Mai	133,4	102,2	123,5	86,5	109,9	63,5	93,1	46,7	45,7	23,0	124,9	32,9
Jun	191,7	137,3	99,1	14,5	144,5	24,3	54,2	15,3	10,0	9,0	45,2	0,9
Jul	112,2	81,4	44,6	8,3	92,7	17,2	28,5	5,8	11,1	0,7	26,2	0,4
Ago.	63,7	24,5	38,4	8,1	101,2	9,0	3,4	9,1	0,8	0,8	5,8	1,3
Set.	136,0	96,7	94,2	30,5	80,5	21,3	59,4	15,6	36,9	31,7	5,0	10,5
Out.	161,9	123,4	124,6	77,1	121,0	78,6	97,5	77,9	79,8	75,0	2,1	50,1
Nov.	178,6	131,1	160,8	192,2	188,3	254,0	173,1	171,2	253,1	174,6	39,0	139,8
Dez.	181,2	172,4	210,6	251,4	88,1	245,6	169,3	215,2	213,3	223,6	67,5	153,8

Os sítios foram ordenados do menor para o maior déficit hídrico.

6.2.3 Obtenção de dados da parcela

Os inventários florestais contínuos foram realizados a cada seis meses, iniciando aos 15 meses após o plantio e terminando aproximadamente aos 80 meses. Na parcela, 160 árvores eram permanentes para inventário contínuo e 80 árvores foram alocadas na borda da parcela em fileiras de amostragem destrutiva. Foram medidos o DAP e a altura total de todas as árvores da parcela permanente.

Tabela 3. Idade de plantio nos inventários anuais utilizada para cálculo do aumento do volume nos ciclos.

Idade das árvores no ciclo	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5
	(20 meses)	(32 meses)	(44 meses)	(56 meses)	(68 meses)
Sítio	Idade das árvores no inventário (meses)				
2 - Arapoti	23	34	46	59	70
4 - Belo Oriente	21	33	45	57	69
5 - Guanhães	21	32	44	57	69
7 - Rio Verde	20	31	45	55	67
9 - Estrela do Sul	23	34	46	53	70
10 - Botucatu	22	34	46	59	70
13 - Três Lagoas	20	29	40	51	62
19 - Peixe	20	30	41	49	67
29 - Urbano Santos	22	27	41	50	64
30 - Bocaiúva	22	33	45	58	70
31 - Eunápolis	21	33	45	58	71
33 - Buri	22	32	40	58	70

O volume de madeira das árvores foi determinado aplicando a equação estabelecida para os povoamentos por MATTOS et al. (2020). O incremento em volume de cada ciclo ($IVC/m^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$) foi obtido pelo volume de madeira inventariado em um período similar ao marcado pelos ciclos (Tabela 3), e o volume final ($VF/m^3 \text{ ha}^{-1}$) foi calculado com os dados coletados no inventário final aos seis anos.

6.2.4 Análise de dados

Todas as análises foram processadas no software R (R CORE TEAM, 2019). A densidade média da madeira do clone ao final do ciclo foi comparada entre sítios pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$) utilizando o pacote *Expedes.pt*. Densidade da madeira (DM), largura do ciclo (LC) e incremento em volume do ciclo (IVC) dos sítios foram correlacionadas com as variáveis T, P e DEF utilizando a correlação de Pearson ($\alpha = 5\%$, $n = 72$). A análise de regressão linear simples (função *lm*) foi usada para gerar equações que estimem DM. T e IVC foram usados como variáveis independentes nas equações por ciclo. Nas equações médias por sítio, a temperatura média dos cinco ciclos e o volume final (VF) foram variáveis independentes. As equações foram utilizadas para estipular aumentos proporcionais da densidade da madeira em relação a alterações de 1°C de temperatura e 10 m^3 de volume de madeira.

A densidade da madeira foi espacializada a partir dos valores de densidade obtidos nos sítios. A ferramenta álgebra de mapas foi utilizada para aplicar a equação média apresentada anteriormente para a previsão da densidade da madeira (ArcGIS 10.3). Os mapas de temperatura média anual das regiões foram obtidos das seguintes fontes: temperatura média anual do período atual (1960-1991) do sistema Geodatabase IPEF (ALVARES et al., 2013a), e as temperaturas médias anuais futuras (2011-2040) da média dos modelos climáticos globais HadGEM2 e MIROC5 para os cenários Representative Concentration Pathways (RCP) 4.5 e 8.5 (ALVARES, 2021). Os arquivos raster de temperatura foram usados como entrada e mapas de densidade da madeira para o cenário atual e RCP 4.5 e 8.5 foram obtidos como resultado. Um buffer de 250 km a partir de cada sítio foi aplicado aos mapas para aumentar a precisão da espacialização. Essa distância contempla a área de atuação e plantio de empresas de médio e grande porte, facilitando os processos da matéria prima. A ferramenta “extract by mask” foi usada para recortar as regiões não avaliadas.

Valores de DM, LC e VF também foram comparados na metade do ciclo (aproximadamente 3 anos) e ao final do ciclo, de modo a avaliar a porcentagem de aumento de cada variável nesse período. Para DM, a média dos valores de densidade dos dois primeiros ciclos representou a densidade aos três anos, e a média dos cinco ciclos, a densidade aos seis anos. Para LC, o comprimento do raio até o 3º ciclo representou a largura do ciclo aos três anos, e o comprimento total da amostra, a LC aos seis anos. Para VF, o volume obtido pelo inventário florestal até o final do 3º ciclo representou o volume aos três anos, e o volume do último inventário, VF aos seis anos.

6.3 RESULTADOS

6.3.1 *Variações em temperatura, precipitação e déficit hídrico dos sítios, e crescimento e densidade da madeira*

A temperatura foi a variável climática mais estável entre os ciclos, em comparações dentro de um mesmo sítio, sendo seus maiores desvios associados às diferenças entre os sítios e não entre os anos (Tabela 4). Desconsiderando o ciclo 1, que apresenta uma precipitação acumulada de 20 meses, ou seja, comparando os ciclos 2 a 4, P apresentou variações de até 1000 mm ano⁻¹ entre ciclos (sítio 10, ciclos 2 e 4, e sítio 31, ciclos 4 e 5). DEF foi a variável climática que apresentou a maior variação entre os sítios (55–76%).

Em geral, os sítios mais quentes foram os mais secos, com a temperatura variando entre 17,7 a 28,1°C (Tabela 4). No sítio 19 foi observada a menor densidade (0,521 g cm⁻³), sendo esse valor 22% menor do que o observado no sítio de maior densidade (sítio 9 = 0,667 g cm⁻³) (Figura 3). O sítio 02 apresentou a maior precipitação e os menores valores de T e DEF, e DM 17% maior do que a obtida no sítio 29, local com a maior temperatura média e o segundo maior DEF. A densidade da madeira apresentou menor CV no ciclo 1 (6%), e estabilizou a partir do segundo ciclo entre 10–11%.

Os sítios foram separados em três grupos de densidade pelo teste de Scott-Knott (Figura 3), e DM nos sítios temperados (2, 5, 9, 10 e 33) foi incluída no grupo das maiores densidades. O sítio 7-Três Lagoas, apesar de apresentar DM entre as maiores médias, é um sítio com condições mais secas (clima tropical com inverno seco/Aw). Outros dois grupos foram formados, um grupo de densidades medianas (sítios 4, 13, 30 e 31) e outro de menores densidades (sítios 19 e 29). Esses sítios apresentam características de climas tropicais (Aw e Af).

Todos os sítios apresentaram, em geral, um padrão crescente de densidade ao longo dos ciclos (anos), com as menores densidades nos primeiros anos de crescimento das árvores (Figura 3). O sítios com os maiores DEF (19, 29 e 30) apresentaram uma menor variação da densidade e maior homogeneidade ao longo dos anos, enquanto os sítios mais úmidos apresentaram uma tendência de crescente positiva maior.

Tabela 4. Variações de temperatura, precipitação e déficit hídrico de *Eucalyptus urophylla* observados entre os ciclos de crescimento entre os anos de 2012 e 2018.

Sítio	Temperatura (°C)						Precipitação (mm ano ⁻¹)						Déficit hídrico (mm ano ⁻¹)					
	1	2	3	4	5	M ¹	1	2	3	4	5	M	1	2	3	4	5	M
2		17.7					2605	1460	1647	2079	1600	1878	127	74	65	19	37	64
33		19.6					2512	1018	1465	1907	1287	1638	153	319	128	64	239	180
10		20.7					2654	906	1537	1851	1622	1714	492	657	203	119	188	332
4		22.6					1548	1330	1041	1035	1490	1289	731	348	461	598	204	468
31		23.1					2185	1474	845	662	1541	1341	637	106	681	990	245	532
9		22.8					2063	1223	1427	1665	1221	1520	536	488	507	500	626	531
13		24.3					1537	1053	1071	1605	1101	1274	642	650	518	238	559	521
5		20.3					1701	986	1058	1314	880	1188	716	678	431	453	524	560
7		22.7					2154	1245	1815	1389	1560	1632	1119	740	594	824	581	771
19		26.7					1308	1589	1411	884	1314	1301	656	927	675	1237	815	1062
29		27.4					1149	1509	1127	1113	1841	1348	775	990	1118	1246	854	1197
30		23.7					1060	876	472	690	749	769	636	1008	1456	1347	1141	1318
CV (%) ²	12	11	12	12	12	12	30	21	30	36	24	21	67	55	70	76	66	61

O sítio mais produtivo foi o 33-Buri (463 m³ ha⁻¹) e o menos produtivo o 29-Urbano Santo (109 m³ ha⁻¹). O IVC decresceu a partir do 3º ciclo na maioria dos locais. Sítios 2, 33 e 10 foram os mais produtivos, com IVC sempre acima de 60 m³ ha⁻¹

durante todos os ciclos, e os sítios 29 e 30, os menos produtivos, apresentaram incrementos sempre abaixo desse valor (Figura 3).

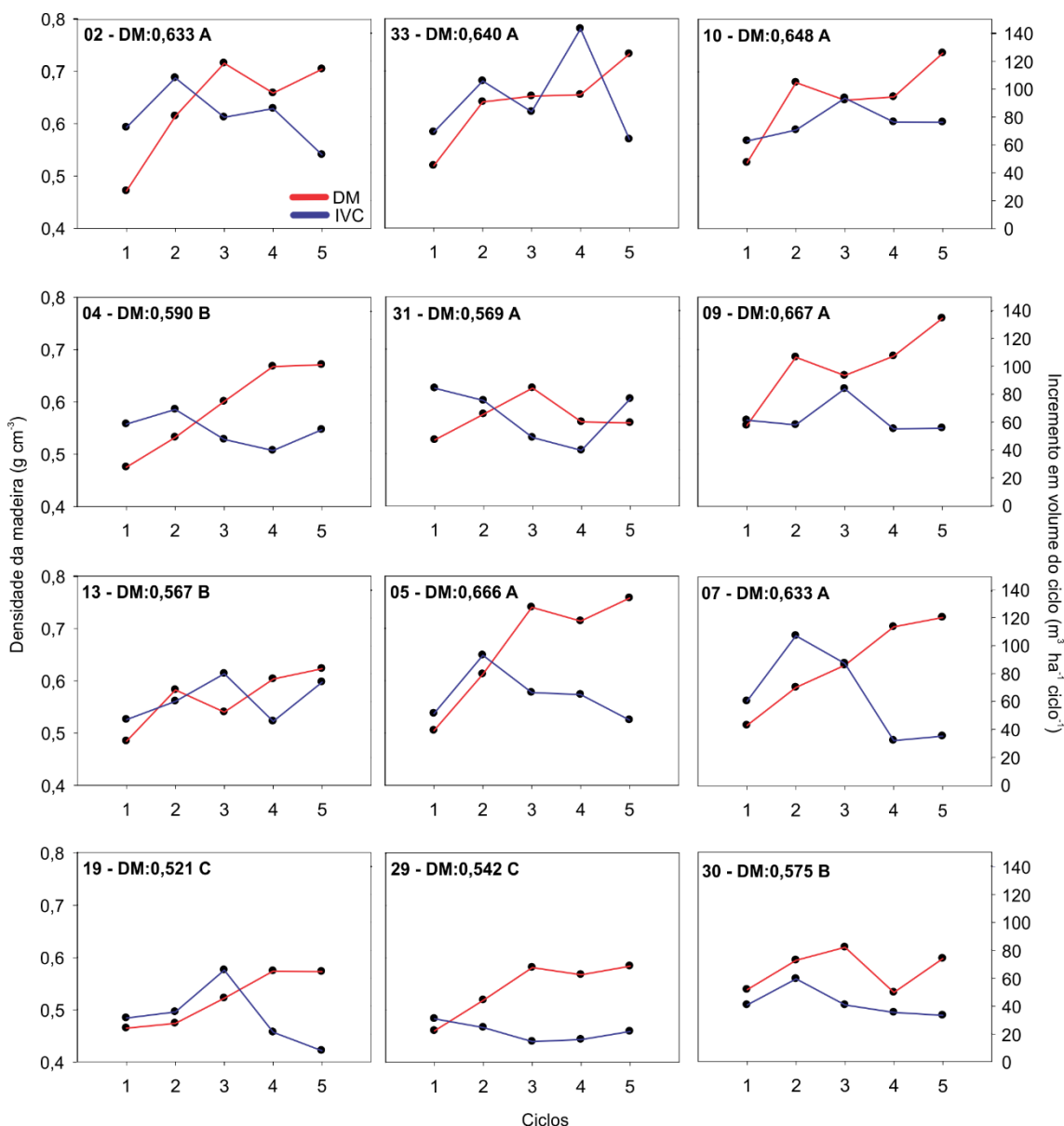


Figura 3. Variações na densidade da madeira de *Eucalyptus urophylla* (DM / g cm⁻³) e incremento no volume do ciclo (IVC / m³ ha⁻¹ ciclo⁻¹) entre os ciclos de crescimento nos 12 locais avaliados. Os locais são classificados do menor ao maior solo com déficit hídrico.

A densidade da madeira obtida para o clone de *E. urophylla* nos dois primeiros ciclos de crescimento (aproximadamente três anos) corresponde à mais de 80% da densidade final (Figura 5). As variações na produtividade dos locais ou nas condições climáticas não alteraram as proporções de DM, LC ou VF. O crescimento em diâmetro no DAP da árvore já representava 60 a 70% do diâmetro final que seria obtido pelo disco aos seis anos. O volume da população de árvores aos três anos atingiu em média apenas 40% do volume obtido ao final da rotação.

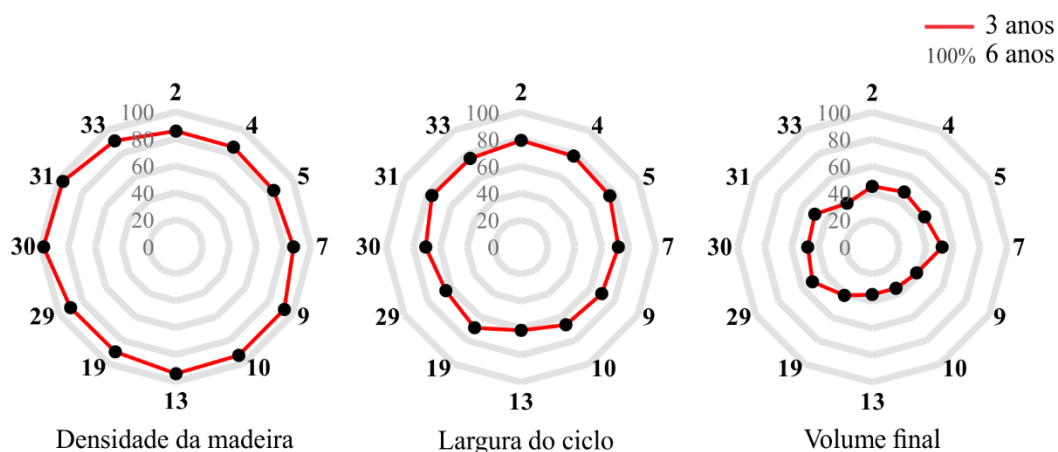


Figura 5. Relações entre densidade, largura do ciclo e volume final aos 3 anos e ao final da rotação (6 anos) nos 12 sítios avaliados. Os números são os códigos de identificação de cada sítio.

6.3.2 Correlações entre clima e parâmetros da madeira

A temperatura se mostrou um fator limitante ao crescimento em todos os ciclos, apresentando correlações moderadas à fortes e significativas (Tabela 5). As correlações de T com a densidade da madeira desse clone de *Eucalyptus urophylla* foram significativas a partir do segundo ciclo de crescimento das árvores, quando essas estavam com aproximadamente 3 anos. As relações entre DM e P são significativas nos ciclos 2 e 4, e com DEF são significativas apenas no ciclo 4.

Tabela 5. Diagrama de correlação de Pearson entre as variáveis climáticas (temperatura, precipitação e déficit hídrico) e variáveis do plantio florestal (densidade de madeira (DM), largura do ciclo (LC) e incremento no volume do ciclo (IVC)) ao longo dos 5 ciclos de crescimento. * Correlações significativas pelo teste de Scoot Knott ($p < 0,05$).

	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5
	Temperatura				
DM	-0,29	0,63*	-0,82*	-0,61*	-0,74*
LC	-0,80*	0,06	0,28	0,23	0,25
IVC	-0,71*	-0,85*	-0,58*	-0,79*	-0,60*
	Precipitação				
DM	0,34	-0,64*	0,19	-0,61*	-0,09
LC	0,82*	0,31	0,50	0,54	0,22
IVC	0,83*	-0,29	0,68*	0,72*	0,03
	Déficit hídrico				
DM	-0,26	-0,34	-0,43	-0,64*	-0,42
LC	-0,88*	0,38	-0,14	-0,49	0,21
IVC	-0,81*	-0,60*	-0,74*	-0,79*	-0,69*

As correlações entre LC e as variáveis climáticas só foram fortes e significativas ($r > 0,8$) no primeiro ciclo. Entretanto as correlações do IVC com a T e o DEF foram negativas e significativas em todos os ciclos, ou seja, o aumento de T e DEF tende a diminuir o crescimento geral desse clone.

A estimativa de densidade da madeira para o material genético avaliado utilizando a temperatura foi significativa para os ciclos 2, 3, 4, 5 e para a equação média (Tabela 6). T conseguiu explicar 58% das alterações em densidade da madeira observadas entre os sítios com a equação média de seis anos das árvores (Equação 11). As equações utilizando IVC não foram significativas, sendo somente a equação média utilizando o volume final do povoamento significativa para estimação da densidade da madeira.

Considerando temperaturas entre 17 e 28°C, a relação entre a densidade da madeira e a temperatura no final da rotação mostrou que o aumento de 1°C em T resultou em uma redução em DM de 0,014 g cm⁻³ (Consulte as equações correspondentes na Tabela 6). Em relação à produção, o aumento de 10 m³ ha⁻¹ no volume final promoveu um aumento na densidade de 0,004 g cm⁻³.

Tabela 6. Equações de regressão linear, estatísticas de precisão para predição de densidade da madeira de *Eucalyptus urophylla* utilizando temperatura (T) e incremento em volume do ciclo (IVC) como variáveis de entrada nos 5 ciclos de crescimento determinados e utilizando a média geral dos 6 anos de crescimento das árvores.

Ciclo	Pr(>F)	r ² _{aj}	RMSE	Equação	Número
1	0,3685	-0,01	5,73%	DM = 0,5757 - 0,0032T	1
	0,1614	0,10	5,39%	DM = 0,4566 + 0,0008IVC	2
2	0,0281*	0,34	7,85%	DM = 0,9362 - 0,0151T	3
	0,0992	0,17	8,76%	DM = 0,5088 + 0,0011IVC	4
3	0,0010**	0,64	5,51%	DM = 1,0614 - 0,0189T	5
	0,3736	-0,01	9,23%	DM = 0,5770 + 0,0008IVC	6
4	0,0351*	0,31	7,37%	DM = 0,9386 - 0,0130T	7
	0,1757	0,09	8,44%	DM = 0,5908 + 0,0007IVC	8
5	0,0055**	0,51	7,33%	DM = 1,1492 - 0,0211T	9
	0,3139	0,01	10,40%	DM = 0,6124 + 0,0011IVC	10
Média	0,0024**	0,58	4,85%	DM = 0,9351 - 0,0144T	11
	0,0053**	0,51	5,24%	DM = 0,4932 + 0,0004VF	12

Sendo: T: temperatura, IVC: incremento em volume do ciclo (m³ ha⁻¹ ciclo⁻¹), VF: volume final (m³), r²_{aj}: coeficiente de determinação ajustado, RMSE: raiz quadrada do erro médio. *significativo a 5% probabilidade, ** significativo a 1% probabilidade.

6.3.3 Distribuição espacial da densidade da madeira

A espacialização da densidade, utilizando a equação da média dos ciclos que estima densidade baseado na temperatura, é apresentada na Figura 4.

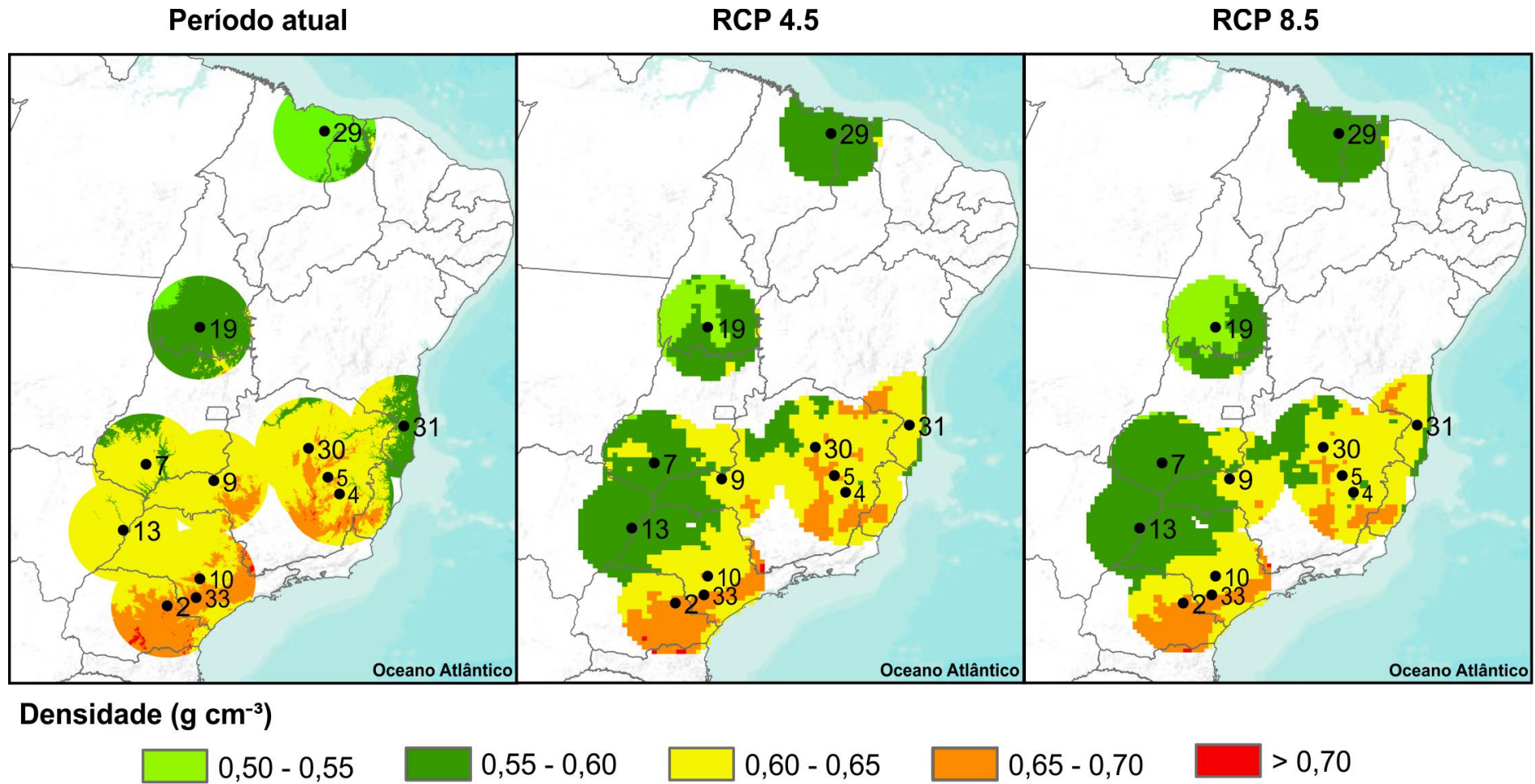


Figura 4. Espacialização da densidade da madeira de *Eucalyptus urophylla* baseado na temperatura média anual do período atual (1960-1991) e de projeções futuras (média dos modelos HadGEM2 e MIROC5) para os cenários de alterações climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5 (2011 – 2040) das regiões, a partir da aplicação a equação média dos ciclos nos dados de densidade. Um buffer de 250 km foi utilizado a partir do ponto de coleta de dados.

No cenário atual, a densidade da madeira do clone de *E. urophylla* variou de 0,53 a 0,81 g cm⁻³, sendo que as menores densidades foram observadas nas regiões mais quentes e secas (norte e nordeste do país), e as regiões mais frias e úmidas (sul do país) apresentaram os maiores valores de densidades. As regiões sudeste e centro-oeste do país, que detêm atualmente as maiores proporções de área plantada de eucalipto, apresentaram densidade da madeira principalmente entre 0,55 e 0,65 g cm⁻³.

No que diz respeito às projeções de densidade nos cenários de anomalias climáticas RCP 4.5 (médias emissões) e RCP 8.5 (altas emissões), foi observado uma redução dos valores máximos de densidade de 0,81 para 0,71 g cm⁻³ em ambos os cenários. Foi possível observar um avanço na classe de densidade de 0,55 – 0,60 g cm⁻³ na região centro-oeste (sítios 7, 13 e 9), prevendo uma diminuição da madeira de *E. urophylla* nessas regiões. Uma diminuição da densidade da madeira foi também observada para os dois cenários nas proximidades do sítio 19, no entanto, apesar do aumento da temperatura previsto em todo o território para os dois cenários, a densidade mínima de 0,53 g cm⁻³ se manteve constante para as regiões especializadas, e nas regiões próximas aos sítios 2, 33, 10, 30, 5 e 4, os valores de densidade, em geral, se mantiveram na mesma classe apresentada pelo cenário atual. Somente a região próxima ao sítio 29 apresentou um aumento na densidade da madeira, mudando da classe de 0,50 – 0,55 g cm⁻³ para 0,55 – 0,60 g cm⁻³.

6.4 DISCUSSÃO

6.4.1 *Variações em temperatura, precipitação e déficit hídrico dos sítios, e crescimento e densidade da madeira*

Sítios mais secos e/ou com épocas de escassez hídrica mais pronunciada, como os sítios 19-Peixe, 29-Urbano Santos e 30-Bocaiúva, apresentaram anéis de crescimento mais definidos, facilitando a marcação dos ciclos de crescimento. A estação seca anual mais proeminente nessas regiões de junho a agosto (Tabela 2), com uma precipitação mensal em torno de 10-20 mm, deve ser um limite de crescimento capaz de induzir um ritmo sazonal de formação da madeira. Essa marcação foi dificultada nos sítios com maiores médias de precipitação e distribuição das chuvas (como os sítios 2-Arapoti, 10-Botucatu e 33-Buri), de modo que a utilização dos inventários florestais semestrais foi essencial para a demarcação dos ciclos de crescimento.

A temperatura entre 20 e 25°C promoveu mudanças na densidade da madeira de mudas em casas de vegetação com ambiente controlado (THOMAS et al., 2007). Os sítios 19 e 29 foram os únicos que apresentaram temperaturas médias acima de 25°C, e apesar das árvores já estarem no campo, também foram os sítios que apresentaram as menores densidades. Elevadas temperaturas promovem o fechamento dos estômatos como forma de limitar as trocas gasosas e fotossíntese, diminuindo a fixação de carbono tanto na forma de crescimento como na densidade da madeira (MACFARLANE et al., 2004; HILL et al., 2014).

O primeiro ciclo de crescimento só foi demarcado aproximadamente 20 meses após o plantio. Nos primeiros anos de plantio, é característico das espécies de eucalipto um crescimento inicial muito rápido, com as árvores se estabelecendo no campo antes dos três anos (POERSCH et al., 2017). Menores valores de densidade da madeira nos anos iniciais são relacionados à priorização da alocação de carbono para crescimento do tronco, copa e raízes (ELOY et al., 2018). Com o passar do tempo, a densidade aumenta com a diminuição do ritmo de crescimento e realocação dos fotoassimilados (THOMAS et al., 2007).

As variáveis climáticas, principalmente a precipitação, não promoveram alterações significativas na densidade da madeira entre os ciclos de crescimento no mesmo local, sendo a idade, neste caso, o fator que mais influenciou esta variação. Os incrementos em densidade nos últimos 3 anos promoveram pouca influência na densidade final da madeira. Os anéis produzidos no DAP a partir do 3º ano foram mais

estreitos, entretanto a árvore continua crescendo em altura e diâmetro nas demais posições, tanto que aos três anos, o povoamento só atingiu em média 40% do volume obtido no final da rotação. Avaliações climáticas na formação da madeira são mais complexas devido à forte influência da genética e da interação genótipo x ambiente nesse processo (PFAUTSCH et al., 2016).

Árvores jovens de eucalipto apresentam na sua madeira, em grande maioria, apenas lenho juvenil (RAMOS et al., 2011). A madeira juvenil é constituída por células com maior lúmen e parede celular menos espessa, logo apresenta menor densidade aparente (ZOBEL; BUIJTENEN, VAN, 1989), o que foi observado ao longo dos ciclos de crescimento.

6.4.2 Correlações entre clima e parâmetros da madeira

Assim como observado por Costa et al. (2020) em clones de eucalipto, a densidade da madeira (DM) e volume do ciclo (IVC) foram, a nível de população, influenciadas pelos fatores climáticos. A principal variável climática que induz a sazonalidade cambial em espécies arbóreas tropicais é a distribuição das chuvas (WORBES; FICHTLER, 2011; RATHGEBER et al., 2016); entretanto, para o clone A1 de *E. urophylla*, a temperatura foi o fator climático mais correlacionado com as alterações em densidade da madeira.

Apesar de ser estável entre os ciclos de crescimento, as variações de temperatura entre os locais (17-28°C) conseguiram explicar 58% das mudanças na densidade da madeira de *E. urophylla*. As árvores desse clone, independentemente da idade, exploram rapidamente um volume considerável de solo a um custo de carbono relativamente limitado (SILVA et al., 2020), o que permite menor sensibilidade aos padrões de precipitação. A temperatura, entretanto, tem forte influência na abertura estomática, com altas temperaturas contribuindo para a diminuição da assimilação de carbono e diminuindo o potencial de produtividade das plantas (TATAGIBA et al., 2015).

Em árvores de quatro anos, o clone A1 (*E. urophylla*) foi o único clone estudado por Rocha et al. (2020) a se correlacionar de forma negativa e fortemente com a temperatura ($r = -0,76$) com cada espécie e material genético, apresentando tendências de comportamento características do seu clima de origem. Além disso, o clone não estabeleceu uma relação clara entre crescimento e densidade, o que foi relacionado à sua forte expressão genética.

O crescimento radial do caule em diâmetro nas árvores (LC / Tabela 5) foi influenciado por outros fatores além das condições climáticas. O crescimento da largura em DAP pode variar amplamente (CLARK; CLARK, 1994), e apresentou pequenos incrementos nos ciclos acima de três anos; entretanto, como a árvore continua a crescer em altura e diâmetro em posições mais altas do tronco, a árvore aumenta seu volume total e modifica as correlações de crescimento com o clima no nível da parcela.

6.4.3 Distribuição espacial da densidade da madeira

O ritmo acelerado das mudanças climáticas pode superar a capacidade de adaptação das populações se a estreita relação entre a resistência à seca e a disponibilidade de água for o produto da seleção natural ao longo de muitas gerações (BONAN, 2008) e a adaptação for limitada (CHOAT et al., 2012), ou em caso de florestas plantadas limitar a escolha de sítios de plantios.

Tanto no período atual e nas projeções futuras (2011-2040) nos RCP 4.5 e 8.5, o gradiente de densidade da madeira formado nas regiões de plantio de eucalipto no Brasil reforça que a escolha do sítio é um dos fatores mais importantes quando se considera a influência do clima nas plantações. Em ambos os cenários, houve uma tendência de manutenção das densidades nas regiões sudeste e sul, sendo essas regiões já tradicionais no cultivo da espécie, o que sugere a manutenção dessas áreas para plantio, enquanto, em geral, as demais regiões apresentaram uma redução da densidade da madeira com os aumentos de temperatura esperados nos cenários.

O aumento da densidade na região próxima ao sítio 29 foge a tendência esperada, entretanto pode ser associado aos limites de intervalo de classes de densidade estabelecidos. Essa região apresentou, no cenário atual, densidades próximas a $0,54 - 0,55 \text{ cm}^{-3}$, de modo que a oscilação de temperatura prevista pelos cenários pode ter promovido uma mudança para uma classe superior (com densidades maiores de $0,5 \text{ g cm}^{-3}$), apesar da baixa variação em densidade, uma vez que nos cenários a região apresenta principalmente valores de densidade da madeira entre $0,55 - 0,56 \text{ g cm}^{-3}$.

É importante ressaltar que apesar das comparações serem úteis em termos práticos para a gestão florestal, nem sempre as relações descritas acima são lineares e são dependentes de diversos outros fatores, uma vez que a produtividade potencial das florestas de eucalipto também é fortemente dependente de sistemas de manejo

como seleção genética, preparo do solo, fertilização, espaçamento e controle de competição (BINKLEY et al., 2020); e no caso dos cenários de mudanças climáticas é preciso levar em consideração ainda todas as incertezas presentes nessas simulações.

Em relação à sobrevivência das árvores do clone A1, taxas mais elevadas também foram observadas nos testes estabelecidos em zonas climáticas do Sudeste (Cfa) e Sudoeste (Aw) do Brasil, e piores nos testes com condições climáticas mais setentrionais (Am) (SILVA et al., 2019). Essa tendência também foi observada para valores menores de densidades de madeira em locais que estão mais distantes das características do clima de origem do clone (Cwa). A manipulação genética é importante para acelerar o processo de adaptação, nos permitindo substituir alguns sinais ambientais que normalmente regulam o crescimento das plantas e, assim, produzir árvores que são capazes de manter alta produtividade, mesmo quando expostas à condições ambientais mais extremas (ETCHELLS et al., 2015).

O clone estudado foi capaz de expressar seu melhor fenótipo em locais com condições climáticas próximas àquelas para a qual foi realizado seu melhoramento genético, com variação de densidade total de 8% em uma faixa de temperatura média anual de 9°C (18,4 a 27,7°C). É importante observar que as mudanças climáticas, assim como as diferenças entre os sítios, são compostas por uma gama de variáveis que não se limitam à temperatura do ar, nem sempre estabelecem relações lineares e muitas vezes não podem ser isoladas; entretanto, essas comparações podem ser úteis em termos práticos para o manejo florestal.

CONCLUSÃO

A influência do clima na densidade da madeira mudou com o crescimento das árvores de *E. urophylla*, com o primeiro ciclo de crescimento (três anos) controlado principalmente pela genética, e a influência do clima se tornando mais forte após este período. Os incrementos no crescimento ao longo dos anos foram maiores do que os incrementos na densidade da madeira. Conhecer esses incrementos auxilia nos testes de melhoramento, na seleção de clones e no manejo do plantio, uma vez que valores de idades mais jovens podem ser projetados.

A escolha do local provou ser um fator mais importante do que as flutuações do clima em cada local. Entre os sítios, o clone A1 de *E. urophylla* foi plástico para densidade, alterando sua expressão fenotípica devido à influência ambiental. Ao contrário da hipótese indicada, a temperatura foi a principal variável climática que influencia a densidade da madeira. As diferenças observadas na densidade e no crescimento da madeira representam o quanto o melhoramento de clones para condições específicas continua sendo uma das principais estratégias para manter a produção e a qualidade da madeira em situações de expansão florestal e mudanças climáticas, principalmente para uma espécie de tamanha importância comercial. Portanto, estudos de diferentes clones em locais contrastantes são essenciais para determinar as margens de amplitude fenotípica obtidas pelo programa de melhoramento.

A diminuição da densidade e do volume de madeira decorrente da mudança de plantios de *E. urophylla* de regiões tradicionais de plantio e com características climáticas originais do clone para regiões de climas mais secos, reforçam a importância do planejamento dos gestores florestais no cenário de expansão das fronteiras florestais. A espacialização da densidade da madeira de *E. urophylla* utilizando dados de temperatura nas principais áreas produtivas de eucaliptos no Brasil pode orientar os gestores nessas decisões.

REFERÊNCIAS

- ABRAF. Anuário Estatístico da ABRAF 2010 - Ano base 2009. **Anuário Estatístico da ABRAF**, 2010.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES GONÇALVES, J. L. DE. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 113, n. 3–4, p. 407–427, 2013a.
- ALVARES, C. A.; STAPE, L.; SENTELHAS, P. C.; GONC, L. D. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013b.
- ALVARES, C. A.; SENTELHAS, P. C., CHAN, C.S. **Future climate change in South America**. Piracicaba/SP: IPEF, 2021.
- AMAZONAS, N. T.; FORRESTER, D. I.; SILVA, C. C.; ALMEIDA, D. R. A.; RODRIGUES, R. R.; BRANCALION, P. H. S. High diversity mixed plantations of Eucalyptus and native trees: An interface between production and restoration for the tropics. **Forest Ecology and Management**, v. 417, n. March, p. 247–256, 2018. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.03.015>>.
- BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C.; CARNEIRO, R. L.; CEGATTA, I.; STAPE, J. L. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal Eucalyptus plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 405, n. September, p. 271–283, 2017. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.050>>.
- BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C. A.; CARNEIRO, R. L.; STAPE, J. L. Variation in whole-rotation yield among Eucalyptus genotypes in response to water and heat stresses: The TECHS project. **Forest Ecology and Management**, v. 462, n. January, p. 117953, 2020. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117953>>.
- BONAN, G. B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. **Science**, v. 320, n. 5882, p. 1444–9, 2008.
- CALDEIRA, D. R. M.; ALVARES, C. A.; CAMPOE, O. C.; HAKAMADA, R. E.; GUERRINI, I. A.; CEGATTA, I. R.; STAPE, J. L. Multisite evaluation of the 3-PG model for the highest phenotypic plasticity Eucalyptus clone in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 462, n. February, p. 117989, 2020. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117989>>.
- CAMARGO, A. P. DE. Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Bragantia**, 1962.
- CHOAT, B.; JANSEN, S.; BRODRIBB, T.; COCHARD, H.; DELZON, S.; BHASKAR, R.; BUCCI, S.; FEILD, T.; GLEAON, S.; JACOBSEN, A.; LEAN, F.; MAHERALI, H.; MARTÍNEZ-VILALTA, J.; MAYR, S.; MENCUCCINI, M.; MITCHELL, P.; NARDINI, A.; PITTERMANN, J.; PRATT, R.; SPERRY, J.; WESTOBY, M.; WRIGHT, I.; ZANNE, A. Global convergence in the vulnerability of forests to drought. **Nature**, v. 491, p. 752–756, 2012.

CLARK, D. A.; CLARK, D. B. Climate-Induced Annual Variation in Canopy Tree Growth in a Costa Rican Tropical Rain Forest. **The Journal of Ecology**, v. 82, n. 4, p. 865, 1994.

CLOUGH, B. J.; CURZON, M. T.; DOMKE, G. M.; RUSSELL, M. B.; WOODALL, C. W. Climate-driven trends in stem wood density of tree species in the eastern United States: Ecological impact and implications for national forest carbon assessments. **Global Ecology and Biogeography**, v. 26, n. 10, p. 1153–1164, 2017.

COSTA, S. E. DE L.; SANTOS, R. C. DO; VIDAURRE, G. B.; VIDAURRE, G. B.; CASTRO, R. V. O.; ROCHA, S. M. G.; CARNEIRO, R. L.; CAMPOE, O. C.; SANTOS, C. P. S.; GOMES, I. R. F.; CARVALHO, F. O. N.; TRUGILHO, P. F. The effects of contrasting environments on the basic density and mean annual increment of wood from eucalyptus clones. **Forest Ecology and Management**, v. 458, n. August 2019, 2020.

ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; FREITAS, C. H. DE; CARNEIRO, R. L.; ALVARES, C. A. Intercomparison of structural features and performance of Eucalyptus simulation models and their ensemble for yield estimations. **Forest Ecology and Management**, v. 450, n. June, p. 117493, 2019.

ELOY, E.; CARON, B. O.; ELLI, E. F.; SCHWERZ, F. Effect of age and spacing on biomass productioj in forest plantations. **Revista Arvore**, v. 5, n. 2, p. 420214, 2018.

ETCHELLS, J. P.; MISHRA, L. S.; KUMAR, M.; CAMPBELL, L.; TURNER, S. R. Wood formation in trees is increased by manipulating PXY-regulated cell division. **Current Biology**, v. 25, n. 8, p. 1050–1055, 2015. The Authors. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cub.2015.02.023>>.

FLORES, T.; ALVARES, C. A.; SOUZA, V.; STAPE, J. L. **Eucalyptus no Brasil: Zoneamento Climático e Guia para Identificação**. Piracicaba/SP: IPEF, 2016.

GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; ROCHA, J. H. T.; BRANDANI, C. B.; HAKAMADA, R. Eucalypt plantation management in regions with water stress. **Southern Forests**, v. 79, n. 3, p. 169–183, 2017.

HILL, K. E.; GUERIN, G. R.; HILL, R. S.; WATLING, J. R. Temperature influences stomatal density and maximum potential water loss through stomata of *Dodonaea viscosa* subsp. *angustissima* along a latitude gradient in southern Australia. **Australian Journal of Botany**, v. 62, n. 8, p. 657–665, 2014.

IBA. **Instituto Brasileiro de Árvores - Relatório IBÁ 2020**, 2020. São Paulo: Indústria Brasileira de Árvores. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>>.

IPCC. **Climate change 2014 - Synthesis report**. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015.

KULLAN, A. R. K.; DYK, M. M. VAN; HEFER, C. A.; JONES, N.; KANZLER, A.; MYBURG, A. A. Genetic dissection of growth, wood basic density and gene expression in interspecific backcrosses of *Eucalyptus grandis* and *E. urophylla*. **BMC Genetics**, v. 13, n. 1, p. 1, 2012.

MACFARLANE, C.; WHITE, D. A.; ADAMS, M. A. The apparent feed-forward response to vapour pressure deficit of stomata in droughted, old-grown. **Plant, Cell and Environment**, v. 27, p. 1268–1280, 2004.

MATTOS, E. M.; BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C. A.; STAPE, J. L. Variation in canopy structure, leaf area, light interception and light use efficiency among Eucalyptus clones. **Forest Ecology and Management**, v. 463, n. November 2019, p. 118038, 2020. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118038>>.

MENDIVELSO, H. A.; CAMARERO, J. J.; GUTIÉRREZ, E.; CASTA, A. Climatic influences on leaf phenology, xylogenesis and radial stem changes at hourly to monthly scales in two tropical dry forests. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 216, p. 20–36, 2016. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.09.014>>.

MENEZES, A. **Produtividade do Eucalipto e sua relação com a qualidade e a classe de solo**, 2005. Universidade Federal de Viçosa.

NABAIS, C.; HANSEN, J. K.; DAVID-SCHWARTZ, R.; KLISZ, M.; LÓPEZ, R.; ROZENBERG, P. The effect of climate on wood density: What provenance trials tell us? **Forest Ecology and Management**, v. 408, n. April 2017, p. 148–156, 2018.

NÓIA JÚNIOR, R. DE S.; AMARAL, G. C.; PEZZOPANE, J. E. M.; FONSECA, M. D. S.; CÂMARA, A. P.; XAVIER, T. M. T. Ecophysiological acclimatization to cyclic water stress in Eucalyptus. **Journal of Forestry Research**, v. 31, n. 3, p. 797–806, 2020.

PFAUTSCH, S.; HARBUSCH, M.; WESOLOWSKI, A.; SMITH, R.; MACFARLANE, C.; TJOELKER, M. G.; REICH, P. B.; ADAMS, M. A. Climate determines vascular traits in the ecologically diverse genus *Eucalyptus*. **Ecology Letters**, v. 19, p. 240–248, 2016.

PILLAI, P. K. C.; PANDALAI, R. C.; DHAMODARAN, T. K.; SANKARAN, K. V. Wood density and heartwood proportion in *Eucalyptus* trees from intensively-managed short-rotation plantations in Kerala, India. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 25, n. 2, p. 220–227, 2013.

POERSCH, N. L.; FRANÇA FILHO, L. R. T.; MIGUEL, E. P.; CRUZ, G. H. M.; FRANCISQUETTE, K. L.; CAVALHEIRO, S. B. Influence of climate variables in the initial growth of *Corymbia citriodora* and different species of eucalyptus. **Bioscience Journal**, v. 33, n. 6, p. 1452–1464, 2017.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing, 2019. Vienna. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>.

RAMOS, L. M. A.; LATORRACA, J. V. D. F.; PASTRO, M. S.; SOUZA, M. T.; GARCIA, R. A.; CARVALHO, A. M. Variação radial dos caracteres anatômicos da madeira de Eucalyptus grandis W. Hill Ex Maiden e idade de transição entre lenho juvenil e adulto. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 92, p. 411–418, 2011.

RATHGEBER, C. B. K.; CUNY, H. E.; FONTI, P. Biological Basis of Tree-Ring Formation: A Crash Course. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 1–7, 2016.

RESQUIN, F.; NAVARRO-CERRILLO, R. M.; CARRASCO-LETELIER, L.; RACHID-CASNATI, C. Influence of age and planting density on the energy content of *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunnii* and *Eucalyptus grandis* planted in Uruguay. **New Forests**, 2019.

ROCHA, S. M. G.; VIDAURRE, G. B.; PEZZOPANE, J. E. M.; ALMEIDA, M. N. F.; CARNEIRO, R. L.; CAMPOE, O. C.; SCOLFORO, H. F.; ALVARES, C. A.; NEVES, J. C. L.; XAVIER, A. C.; FIGURA, M. A. Influence of climatic variations on production, biomass and density of wood in eucalyptus clones of different species. **Forest Ecology and Management**, v. 473, n. 82, p. 118290, 2020. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118290>>.

SETTE JR, R.; TOMAZELLO, M.; LOUSADA, J.; LOPES, D.; PAUL, J. Relationship between climate variables, trunk growth rate and wood density of *Eucalyptus grandis* W . Mill ex Maiden Trees. **Revista Árvore**, v. 40, n. 2, p. 337–346, 2016.

SILVA, P. H. M.; BRUNE, A.; ALVARES, C. A.; et al. Selecting for stable and productive families of *Eucalyptus urophylla* across a country-wide range of climates in Brazil. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 49, n. 1, p. 87–95, 2019.

SILVA, V. E.; NOGUEIRA, T. A. R.; ABREU-JUNIOR, C. H.; HE, Z.; BUZZETTI, S.; LACLAU, J. P.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; GRILLI, E.; MURGIA, I.; CAPRA, G. F. Influences of edaphoclimatic conditions on deep rooting and soil water availability in Brazilian *Eucalyptus* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 455, n. June 2019, p. 117673, 2020. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117673>>.

TATAGIBA, S. D.; PEZZOPANE, J. E. M.; REIS, E. F. DOS R. Fotossíntese em *Eucalyptus* sob diferentes condições edafoclimáticas. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 23, n. 4, p. 336–345, 2015.

THOMAS, D. S.; MONTAGU, K. D.; CONROY, J. P. Temperature effects on wood anatomy, wood density, photosynthesis and biomass partitioning of *Eucalyptus grandis* seedlings. **Tree Physiology**, v. 27, p. 251–260, 2007.

VANCE, E. D.; LOEHLE, C.; WIGLEY, T. B.; WEATHERFORD, P. Scientific basis for sustainable management of *Eucalyptus* and *Populus* as short-rotation woody crops in the U.S. **Forests**, v. 5, n. 5, p. 901–918, 2014.

WORBES, M.; FICHTLER, E. **Amazonian Floodplain Forests**, v. 210, 2011. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-90-481-8725-6>>.

ZHANG, J.; NIEMINEN, K.; SERRA, J. A. A.; HELARIUTTA, Y. The formation of wood and its control. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 17, n. 1, p. 56–63, 2014.

ZHANG, S. Wood quality attributes and their impacts on wood utilization. XII World Forest Congress. **Anais...** . p.1–7, 2003. Québec, Canada. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/ARTICLE/WFC/XII/0674-B1.HTM>>.

ZOBEL, B. J.; BUIJTENEN, J. P. VAN. **Wood Variation - Its causes and control**. 1st ed. Berlin: Springer-Verlag, 1989.

7 CAPÍTULO 3

Diferenças na anatomia e química da madeira de um clone de *E. urophylla* são explicadas pelas condições climáticas do sítio

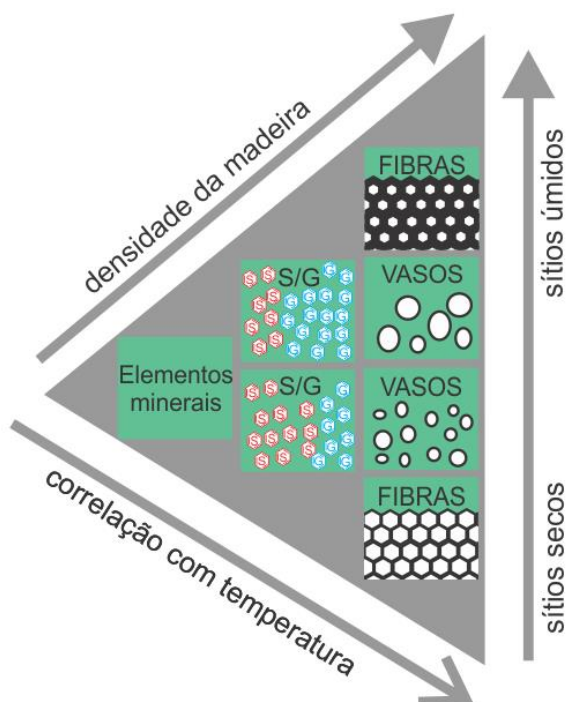
Resumo:

As condições ambientais podem alterar a formação da madeira, sendo necessário avaliar uma combinação de características para identificar os requisitos necessários para diferentes destinações. Por isso, o objetivo dessa pesquisa foi avaliar alterações anatômicas e químicas na madeira de um clone comercial de *E. urophylla* em quatro sítios com condições contrastantes no Brasil, a fim de identificar quais são as variáveis mais influenciadas pelas diferenças climáticas entre os sítios. Amostras radiais foram utilizadas para avaliação da anatomia do xilema quanto à área de vaso (AV), porcentagem de área de vaso (%AV), frequência de vasos (FV), espessura da parede das fibras (EPF) e diâmetro do lúmen das fibras (DLF) em quatro diferentes ciclos de crescimento e na média geral dos anos. Enquanto amostras com aproximadamente um quarto de disco foram utilizadas para realização das análises químicas: extrativos (EXT), lignina total (LT), relação siringyl/guaiacyl (S/G), holocelulose (HOL), carbono (C), oxigênio (O), nitrogênio (N), hidrogênio (H) e enxofre (S). Em todas as amostras, a presença de elementos minerais Na, K, Ca, Mg, P, Mn, Fe, Zn, Ni, Cu, Cr e Cd e elementos halógenos (F e Cl) também foram avaliados. Temperatura (T) foi a variável que apresentou as maiores correlações com as características anatômicas do xilema. Entre sítios, as diferenças climáticas foram mais acentuadas do que entre ciclos. Temperatura apresentou correlações fortes e negativas com DM, AV e EPF ($r = -0,89$, $r = -0,68$ e $r = -0,70$) e positiva com FV e DLF ($r = 0,74$, $r = 0,90$). Lignina total, holocelulose e cinzas não apresentaram diferenças significativas entre sítios. Na análise elementar, o sítio 33, mais úmido, se diferenciou dos demais apresentando maior conteúdo de carbono e hidrogênio, e menores valores de oxigênio. Somente o teor de lignina total e a relação S/G apresentaram correlações significativas com as variáveis meteorológicas, com sítios mais secos apresentando maior relação S/G. Na foi o nutriente mais abundante, e os fluoretos foram os encontrados em menor concentração. Maiores teores de um elemento não significaram necessariamente teores elevados dos demais. Sítios menos produtivos exportaram menos elementos por hectare. As características anatômicas foram mais plásticas, enquanto as

características químicas da madeira apresentaram tendências e relações mais tênues com as variações climáticas.

Palavras-chave: espessura parede das fibras; lignina; relação S/G, elementos minerais.

Resumo gráfico:



Destaques:

- A temperatura foi a variável meteorológica mais influente na modificação anatômica de *E. urophylla*.
- Sítios mais secos apresentaram menor densidade da madeira e espessura de parede de fibras.
- O teor de lignina total e a relação S/G apresentaram correlações significativas com temperatura e déficit hídrico.
- O sítio mais seco apresentou maior concentração dos elementos K, Zn, Mn.

7.1 INTRODUÇÃO

A formação da madeira é um processo dinâmico e contínuo, regulado por fatores genéticos, ambientais e de manejo (ZHANG et al., 2014). Na madeira está contido um registro permanente das interações genótipo x ambiente que ocorreram ao longo dos anos de sua formação (BURDON et al., 2017). O exemplo mais claro da influência do clima na formação da madeira é a presença de anéis de crescimento que se originam da atividade cambial sazonal (SCHUETZ et al., 2013). O estudo das características da madeira nos anéis permite um maior conhecimento sobre as relações entre o crescimento da árvore e fatores ambientais (LÜTTGE, 2017).

As condições ambientais podem alterar as propriedades da madeira de forma limitada às características das espécies, e, para usá-la de forma eficaz, características específicas ou propriedades físicas devem ser consideradas (RAYMOND, 2002). As duas principais maneiras de alterar essas características são o melhoramento genético e o manejo de plantios em diferentes ambientes (CREGG, B. M.; DOUGHERTY, 1988), sendo uma das formas de avaliar a plasticidade dessas propriedades a comparação entre ambientes (BURDON et al., 2017).

A variabilidade na anatomia do xilema em diferentes condições climáticas está relacionada ao papel que o transporte de água desempenha na sobrevivência das plantas (FONTI et al., 2010). Em geral, um mecanismo de aclimação das plantas frente ao estresse por seca ou geadas é produzir madeira que seja capaz de suportar e/ou diminuir o risco de cavitação e embolia por meio de estratégias como: redução do diâmetro e aumento na frequência de vasos e elementos de vasos mais curtos (LENS et al., 2013).

Além de características físicas, a constituição química também tem importante papel no processo de formação da madeira, sendo um dos principais critérios de seleção de madeira para alguns usos, como a produção de carvão vegetal e de celulose (PEREIRA et al., 2013; GALLO et al., 2018).

Os elementos minerais são outros constituintes químicos importantes para o desenvolvimento dos vegetais, e nas árvores, suas quantidades variam entre espécie, disponibilidade no solo e necessidades individuais durante seu crescimento (FREDDO et al., 1999). Os elementos minerais atuam fisiologicamente nas folhas, mas são encontrados em todos os órgãos e tecidos (KUHN et al., 1997), e na madeira estão envolvidos com o processo de formação da madeira na parede secundária das células, além de nutrientes retrotranslocados da reabsorção foliar serem elementos

essenciais para função diária de células do parênquima e/ou fibras septadas (LIRA-MARTINS et al., 2019). Além disso, uma das principais formas de exportação de minerais do solo, além da lixiviação, é pela extração dos produtos da floresta, e dependendo do uso da madeira, os elementos podem ser destinados às fabricas ocasionando prejuízos na produção (FOSTER; BHATTI, 2006).

Considerando que o clima é potencialmente um grande influenciador dessas características da madeira, e que as condições climáticas se modificam em diferentes escalas (CHOAT et al., 2008), tanto in situ, com alterações promovidas por possíveis mudanças climáticas (ELLI et al., 2020), como em escala geográfica nas expansão das fronteiras florestais (CALDEIRA et al., 2020); no entanto, avaliar o grau de modificação e o comportamento das propriedades e características da madeira frente às variações climáticas carecem de estudos.

E. urophylla é uma das espécies do gênero *Eucalyptus* mais plantado no Brasil por ser um material considerado com fenótipo altamente adaptado para algumas regiões brasileiras (FLORES et al., 2018; CALDEIRA et al., 2020), além de sua madeira ser utilizada para diversos usos. Por isso, o objetivo dessa pesquisa foi avaliar alterações anatômicas e químicas na madeira de um clone comercial de *E. urophylla* em quatro sítios com condições contrastantes, a fim de identificar quais são as variáveis mais influenciadas pelas diferenças climáticas entre os sítios.

7.2 MATERIAL E MÉTODOS

7.2.1 Amostragem

As árvores amostradas foram provenientes do Programa de Tolerância de *Eucalyptus* Clonais aos Estresses Hídricos, Térmicos e Bióticos (TECHS) coordenado pelo Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (IPEF) (BINKLEY et al., 2020). O estudo foi realizado com um clone comercial de *Eucalyptus urophylla* amplamente utilizado no Brasil (NÓIA JÚNIOR et al., 2020), identificado como A1 na lista de clones do TECHS. As coletas de amostras de madeira foram realizadas em quatro sítios com condições climáticas contrastantes no Brasil (Figura 1). Os plantios foram realizados entre 2011 e 2012 e conduzidos até 2018, resultando em idade média de seis anos.

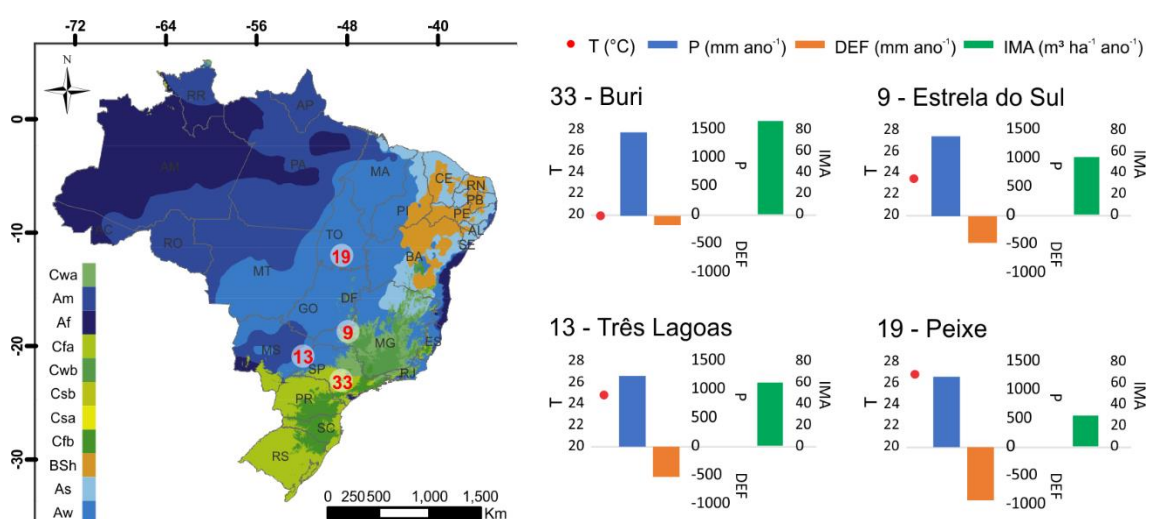


Figura 1. Localização dos quatro sítios avaliados no Brasil (mapa à esquerda) junto com seus diagramas climáticos e de crescimento médio para o período de 2012 a 2018. T: temperatura, P: precipitação, DEF: déficit hídrico, IMA: incremento médio anual. Para a identificação dos sítios foi utilizada os mesmos números originalmente adotados pelo programa TECHS. Classificação de Köppen de acordo Alvares et al. (2013).

A parcela padrão adotada possuía 8 linhas x 15 árvores, com espaçamento de 3 x 3 m (Figura 2a). Todas as parcelas foram fertilizadas intensivamente durante o primeiro ano (70 kg N ha⁻¹, 45 kg P ha⁻¹, 85 kg K ha⁻¹, 500 kg Ca ha⁻¹, 90 kg Mg ha⁻¹, 40 kg S ha⁻¹, 3 kg B ha⁻¹, 1 kg Cu ha⁻¹ e 1 kg Zn ha⁻¹) para suprir qualquer limitação de nutrientes. Ver Binkley et al. (2017) para detalhes silviculturais adicionais aplicados aos experimentos.

Os plantios foram acompanhados por inventários florestais contínuos realizados a cada seis meses, iniciados aos 15 meses após o plantio e finalizados

aproximadamente aos 72 meses. Na parcela, 80 árvores eram permanentes para inventário contínuo e 40 árvores foram alocadas na borda da parcela em fileiras de amostragem destrutiva (Figura 2a). Foram medidos o DAP (diâmetro a altura do peito, medido a 1,30m do solo) e a altura total de todas as árvores da parcela permanente, e a partir dessas variáveis o volume de madeira das árvores foi determinado aplicando-se a equação estabelecida por (MATTOS et al., 2020). O incremento médio anual (IMA) foi determinado a partir do volume de madeira.

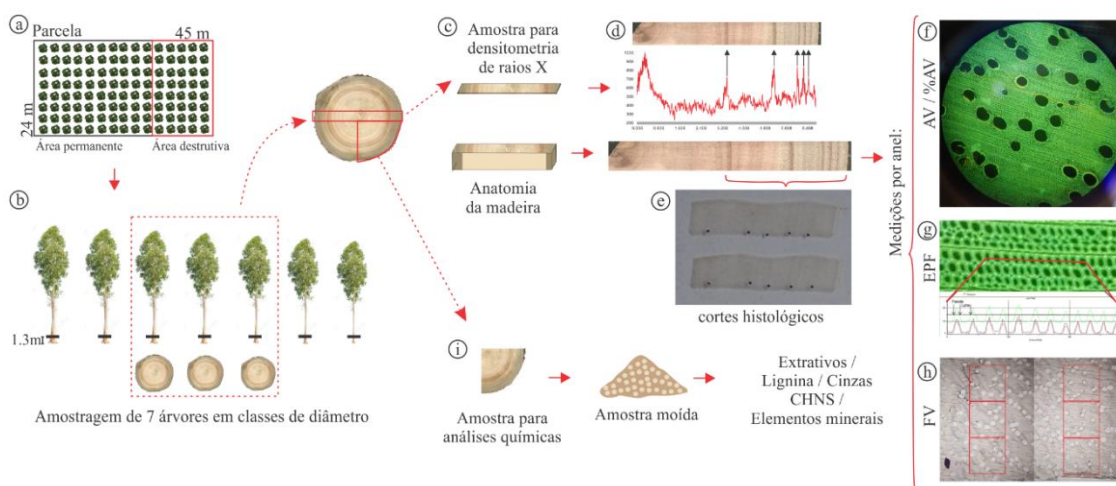


Figura 2. Seleção amostral e sequência de análise da madeira do clone de *Eucalyptus urophylla*. Os procedimentos foram realizados nos três discos retirados de cada sítio avaliado. AV: área de vaso, FV: frequência de vaso, EPF: espessura de parede da fibra.

Para coleta das amostras, as árvores da parcela foram divididas em sete classes de acordo com a divisão da amplitude do DAP. Em cada sítio, foram avaliadas as árvores pertencentes às classes medianas (3, 4 e 5), sendo colhida uma árvore por classe de diâmetro (Figura 2b). Árvores mortas, tortas, danificadas ou doentes não foram selecionadas. Um disco de madeira, com aproximadamente 3 cm de espessura, foi retirado na altura do DAP de cada árvore, com o qual foram realizadas as análises de anatomia, densidade aparente e química da madeira.

7.2.2 Análise anatômicas

O primeiro ciclo (que compreende o período entre o plantio e ago/2013) e o último ciclo (período a partir de ago/2017 até o momento do corte) não foram avaliados quanto às características anatômicas para que fosse possível padronizar a quantidade de meses avaliados entre os sítios, e também pela dificuldade de marcação do último

anel em alguns sítios por não apresentarem crescimento em largura no disco. Sendo assim, foram avaliados quatro ciclos: ciclo de set/2013 a ago/2014; ciclo de set/2014 a ago/2015, ciclo de set/2015 a ago/2016 e ciclo de set/2016 a ago/2017.

Seções transversais no sentido radial dos discos, a partir do segundo ciclo de crescimento, foram amostradas para a medição das características do xilema (Figura 2e). Amostras transversais com 20 µm de espessura foram cortadas em micrótomo de deslize e desidratadas em concentrações crescentes de etanol (10 a 100%). Os cortes histológicos foram observados num microscópio de fluorescência Olympus BX50F com ampliação de 100x, obtendo-se imagens digitais (1 imagem por ciclo de crescimento) para a mensuração da área de vaso (AV), porcentagem de área de vaso (%AV), espessura da parede das fibras (EPF) e diâmetro do lúmen das fibras (DLF). Imagens digitais ao longo da lâmina foram obtidas para observação da frequência de vasos (FV) em microscópio estereoscópio binocular (Nikon SMZ-10) com ampliação de 8 vezes. As imagens foram analisadas no programa *Image Pro Plus 6.2*.

AV, %AV e FV foram determinadas segundo Alfonso et al. (1989). Para AV foram medidos 25 vasos por ciclo de crescimento com a ferramenta "Draw/Merge objects", sendo utilizada a média dos vasos (Figura 2f). %AV foi obtida pela relação entre a área total da imagem e a soma da área de todos os vasos presentes na mesma dimensão. Em FV, seis campos de 1 mm x 1 mm foram utilizados para contagem dos vasos por anel (Figura 2h).

Para as medições de EPF e DLF foi utilizada a metodologia proposta por Sette Junior (2010). Um filtro do tipo Rank foi utilizado nas imagens para uniformização dos tons de verde da parede celular, que adquire essa coloração devido à excitação da lignina pela luz fluorescente. Em seguida, traçou-se uma linha de perfil ao longo de uma fiada de fibras, para definir a intensidade da cor RGB a cada pixel (Figura 2g). O limite da parede celular/lúmen das fibras foi definido na intensidade 150, sendo a parede celular caracterizada pelos valores de intensidade superiores a 150. Em cada fibra foi contabilizado o número de pixels com valor de intensidade de cor superior e inferior a 150, e a espessura da parede da fibra e da largura do lúmen foram calculadas multiplicando o número de pixels de parede, ou de lúmen, pela dimensão dos pixels. Dez linhas de perfil (repetições) foram analisadas casualmente por ciclo de crescimento e em cada uma foram medidas as dimensões transversais das fibras de todas as células (entre 15 a 40 células por linha). Para a caracterização por sítio de AV, %AV, FV, EPF e DLF, a média dos valores dos ciclos foi utilizada. A largura do ciclo foi utilizada como fator de ponderação.

7.2.3 Densidade aparente da madeira

Uma seção radial de 1 cm de largura foi removida dos discos (Figura 2c) e a densidade aparente foi determinada pela técnica de densitometria de raios X (QTRS-01X) conforme descrito por Almeida et al. (2020). Dois raios opostos de cada disco foram utilizados para análise dos perfis de densitometria radial. Em todas as amostras, os raios foram demarcados e divididos em cinco ciclos de crescimento baseado na visualização de anéis de crescimento com o auxílio de lupa (10x), análise das variações da densidade no perfil densitométrico e incrementos anuais médios em diâmetro das árvores obtidos por inventário semestral (Figura 2d).

A densidade da madeira (DM) de cada ciclo foi obtida pela média dos valores de densidade obtidos em cada sessão, e a densidade média da árvore foi obtida pela média dos valores de densidade dos cinco ciclos. Devido ao rápido crescimento inicial do eucalipto, a demarcação do primeiro ciclo de crescimento só foi possível após a observação de um período de seca no segundo ano de crescimento das árvores (meses de junho/julho/agosto de 2013), próximo aos 20 meses após o plantio, enquanto os demais ciclos foram marcados anualmente, a cada 12 meses.

7.2.4 Análises químicas

Uma amostra com aproximadamente um quarto de disco foi removida de cada disco para realização das análises químicas (Figura 2i). O material foi moído em um moinho de corte Retsch SM 100 (Retsch, Haan, Alemanha) com peneira de 6 mm e posteriormente em moinho Retsch Ultra Centrifugal Mill ZM 100 com peneira de 1 mm.

O conteúdo de extrativos foi determinado com aproximadamente 1,5 g de madeira moída submetidas à extração sequencial com etanol e água (8 horas de extração por solvente) em aparelho tipo Soxhlet (SILVÉRIO et al., 2006). As amostras de serragem livres de extrativos foram utilizadas para estimar os teores de lignina total e da razão S/G (siringyl/guiacyl) por espectroscopia de infravermelho próximo (NIR). Modelos de calibração desenvolvidos por regressão pelo método dos mínimos quadrados parciais (PLS-R) para o *Eucalyptus grandis* foram utilizados com as seguintes estatísticas: teor de lignina ($R^2 = 0,91\%$, RMSECV = 0,422, Rank = 2 e RPD = 3,26) e S/G ($R^2 = 0,92\%$, RMSECV = 0,041, Rank = 3 e RPD = 3,57), onde R^2 – coeficiente de determinação, RMSECV – erro médio da validação cruzada, e RPD –

desvio residual de previsão. O teor de holocelulose foi obtido subtraindo de 100% a soma dos teores de lignina, extrativos e cinzas, em porcentagem.

Os teores de carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N) foram obtidos com Analisador Elementar CHON para Combustão Carlo Erba modelo EA-1108 (Laboratorio Seguridad Alimentaria y Desarrollo Sostenible / Universidade de Vigo). Três repetições foram realizadas para cada amostra e o valor médio foi utilizado. Enxofre (S) e cinzas foram obtidos por técnica com espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES). As análises foram feitas em duplicata. O teor de oxigênio foi obtido subtraindo de 100% a soma dos teores de (C, H, N, S e cinzas) em porcentagem.

Em todas as amostras, a presença de elementos minerais Na, K, Ca, Mg, P, Mn, Fe, Zn, Ni, Cu, Cr e Cd e elementos halógenos (F e Cl) também foram avaliados. Amostras de serragem (0,5 g) foram digeridas segundo metodologia descrita por Enes et al. (2019).

Na e K foram determinados por espectroscopia de absorção atômica por emissão, e Ca, Mg, Fe, Zn e Mn foram analisados por espectroscopia de absorção atômica com chama, ambos utilizando um Thermo Scientific ICE 3000. Cu, Cd, Cr e Ni foram determinados por espectroscopia de absorção atômica eletrotérmica utilizando o equipamento UNICAM 939 AA Spectrometer acoplado com câmera de grafite UNICAM GF 90 Furnace.

Os fosfatos foram determinados utilizando a solução digerida em HNO₃ pelo método de espectroscopia no ultravioleta visível (uniSPEC 2 Spectrophotometer) com uso dos reagentes de desenvolvimento de cor, soluções de molibdato de amônio e o tartarato duplo de antimônio e potássio. As absorbâncias foram lidas a 880 nm.

Para extração de fluoretos e cloretos, 5,0 g de serragem foram colocadas em 100 mL de água destilada e deixadas em agitação constante em chapa de agitação magnética por 8 horas por dia durante três dias (totalizando 24 horas). Os fluoretos foram determinados por método do eletrodo seletivo por potenciometria direta (3510 pH Meter / Jenway) utilizando a solução ajustadora de força iônica TISAB. Os cloretos foram determinados por espectroscopia no ultravioleta visível utilizando como reagentes de desenvolvimento de cor, soluções de tiocianato de mercúrio [Hg(SCN)₂] e nitrato de ferro (III) [Fe(NO₃)₃]. As absorbâncias foram lidas a 460 nm. A concentração dos minerais avaliados foi expressa em µg g⁻¹ de madeira. Todas as análises foram realizadas em três repetições e apresentadas as médias.

7.2.5 *Obtenção do banco de dados climáticos*

Dados meteorológicos de temperatura do ar média, máxima e mínima, umidade relativa média, velocidade do vento a 10 metros, radiação solar global e precipitação para o período de 2012 a 2018 foram obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), e dados perdidos foram preenchidos (ELLI et al., 2019; ROCHA et al., 2020). Os valores anuais de temperatura (T), precipitação (P) e déficit hídrico do solo (DEF) foram obtidos seguindo a metodologia descrita por (ALMEIDA et al., 2020).

7.2.6 *Análises de dados*

Todas as análises foram processadas no software R Studio versão 4.0.2 (R CORE TEAM, 2020). Análise fatorial duplo foi realizada em delineamento inteiramente casualizado balanceado (pacote ExpDes.pt), considerando o modelo fixo e os fatores 1 (Sítio) e 2 (ciclo de crescimento), e comparações dos efeitos entre sítios foram avaliadas pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$). Posteriormente, as características da madeira (AV, %AV, FV, EPF, DLF) foram correlacionadas com as variáveis T, P e DEF dos respectivos ciclos utilizando a correlação de Pearson ($\alpha = 5\%$).

Para comparações das médias gerais dos sítios, a densidade média da madeira do clone ao final do ciclo e valores médios por sítio das características anatômicas e químicas da madeira foram comparadas entre sítios pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$). Correlações de Pearson entre fatores meteorológicos médios obtidos durante os seis anos de crescimento (T, P e DEF) e DM, características médias da anatomia (AV, %AV, FV, EPF, DLF) e química (extrativos, lignina, holocelulose, cinzas e CHNS) da madeira foram novamente realizadas, e os resultados expressos graficamente por meio de uma rede de correlações.

Uma correlação de rede bidimensional foi usada para expressar graficamente a relação funcional entre estimativas dos coeficientes de correlação das características e detectar padrões fenotípicos complexos. A proximidade entre as características foi proporcional ao valor absoluto da correlação entre esses nós. As correlações positivas foram apresentadas em verde, enquanto as correlações negativas foram apresentadas em escala de vermelho.

Análise de componentes principais (PCA) foi utilizada para ordenar os dados de análise química de elementos na madeira (Na, K, Ca, Mg, P, Mn, Fe, Zn, Ni, Cu, Cr, Cd, F e Cl) e identificar quais variáveis contribuem mais para a variação dos dados

(pacote Factoshiny, software estatístico R Studio). As quantidades dos elementos foram calculadas e expressas em mg de elemento por kg de madeira, e para determinação das quantidades de elementos minerais exportados por hectare, a concentração de cada elemento foi multiplicada pela massa seca de madeira extraída por hectare em cada sítio, sendo que **massa de madeira = densidade básica da madeira*volume de madeira verde**. A densidade básica da madeira foi calculada aplicando nos valores de densidade aparente um fator de correção de 1,2, obtido pela comparação da densidade básica com a densidade aparente do clone A1. O volume de madeira foi determinado pelo inventário florestal.

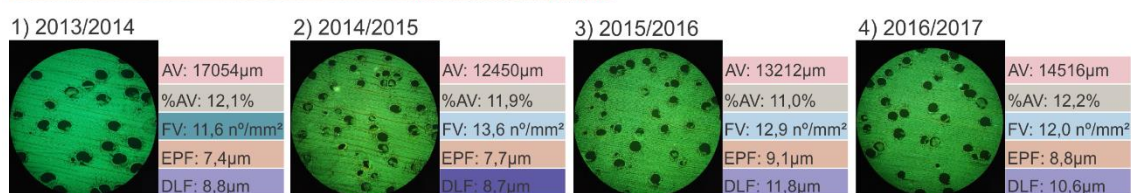
7.3 RESULTADOS

7.3.1 *Variações anuais nas características anatômicas da madeira*

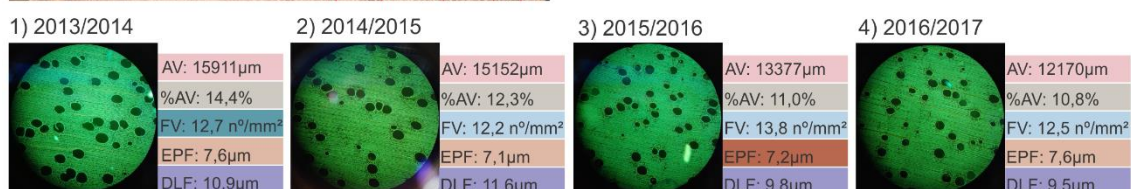
A interação sítio x ciclos de crescimento não foi significativa (Apêndice 1). Para uma avaliação anual das características, médias de AV, %AV, FV, EPF e DLF por ciclo são apresentadas na Figura 3. Entre sítios, no ciclo 2013/2014 foi observada maior frequência de vasos (FV) no sítio 19-Peixe (sítio mais seco). No ciclo 2015/2016 foi observado vasos menores (AV) e fibras menos espessas (EPF) nos sítios mais secos (13-Três Lagoas e 19-Peixe). No último ciclo, a tendência para EPF se repete. %AV não variou em nenhum ciclo de crescimento entre os sítios. Diâmetro do lúmen das fibras (DLF) foi menor nos sítios mais úmidos (33-Buri e 9_Estrela do Sul) em todos os ciclos.

Na análise de correlação por ciclo de crescimento, as características da madeira e as variáveis climáticas se correlacionaram em níveis de força e significância diferentes com as variáveis meteorológicas (Figura 4). A precipitação (P) não apresentou correlação significativa com os elementos anatômicos avaliados, enquanto a temperatura (T) foi a variável que apresentou as maiores correlações com as características anatômicas do xilema. As correlações de deficiência hídrica (DEF) com os elementos seguiu a mesma tendência de T, apesar de mais baixas, com aumentos em T e DEF promovendo diminuição nos valores de AV, %AV e EPF, enquanto nesses casos a FV e DLF apresentaram tendência a aumentar. DM foi correlacionada positivamente com EPF e negativa com DLF, que foram as variáveis anatômicas mais correlacionadas com a temperatura. A densidade da madeira não apresentou correlações com o tamanho ou porcentagem de espaço ocupado por vasos na madeira, mas apresentou uma correlação baixa e negativa com a frequência de vasos.

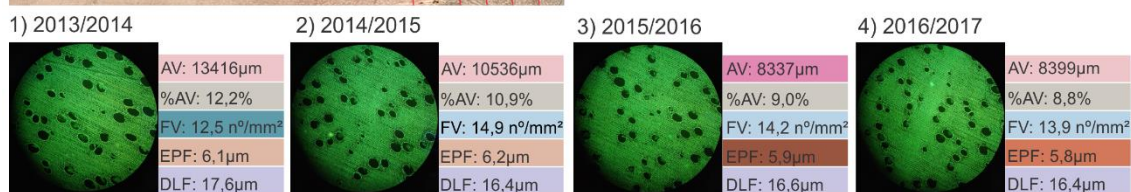
Sítio 33 - Buri



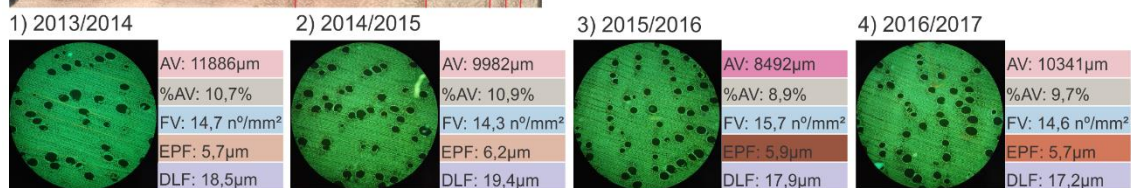
Sítio 09 - Estrela do Sul



Sítio 13 - Três Lagoas



Sítio 19 - Peixe



Comparação entre sítios: AV: A B %AV: A FV: A B EPF: A B C DLF: A B C

Figura 3. Características do xilema de *E. urophylla* por ciclo de crescimento em 4 sítios no Brasil. Os sítios foram ordenados do maior para o menor déficit hídrico. AV: área de vaso (μm), %AV: porcentagem de área de vaso, FV: frequência de vaso (n $^{\circ}$ de vasos mm 2), EPF: espessura parede das fibras (μm) e DLF: diâmetro do lúmen das fibras (μm). As médias de AV, %AV, FV e EPF foram comparadas por anel entre os sítios. Tonalidades de cores diferentes indicam diferença estatística pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$), como mostrado na figura.

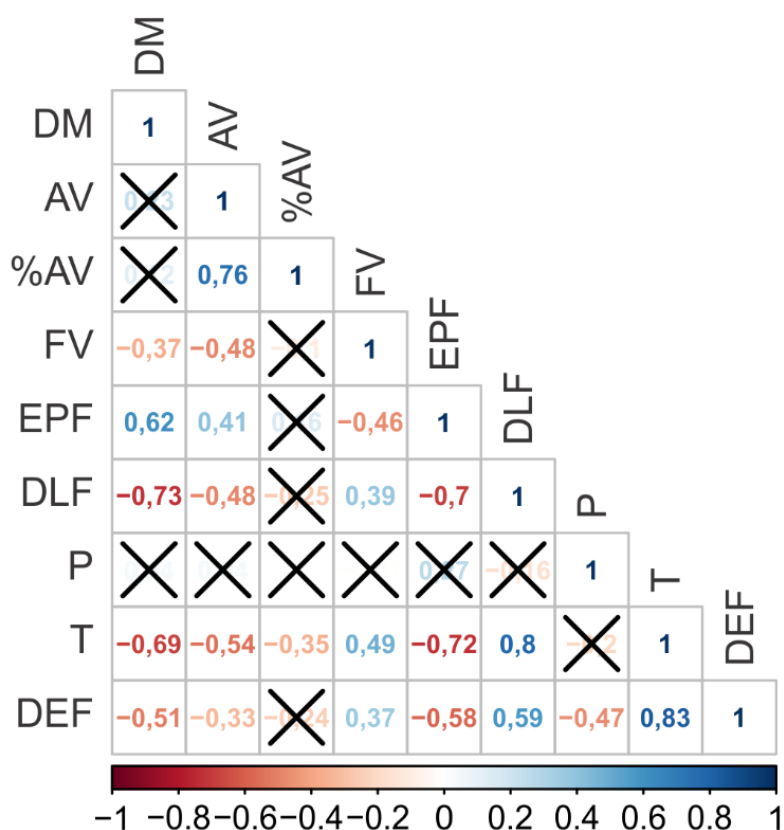


Figura 4. Correlação de Pearson entre variáveis meteorológicas dos sítios e características da madeira de *E. urophylla*. DM: densidade da madeira, AV: área de vaso, %AV: porcentagem de área de vaso, FV: frequência de vaso, EPF: espessura da parede de fibra, DLF: diâmetro do lúmen das fibras, P: precipitação, T: temperatura e DEF: déficit hídrico. Correlações com um X são não significativas, correlações positivas estão em azul e correlações negativas em vermelho.

7.3.2 Correlações entre clima e características anatômicas da madeira

Ao comparar os dados médios das características da madeira por sítio (Scott Knott, $p < 0,05$), os sítios 13-Três Lagoas e 19-Peixe foram separados dos sítios 9-Estrela do Sul e 33-Buri por apresentarem menores valores de AV e EPF e maiores valores de DLF (Tabela 1A). Para DM, os sítios foram separados em três grupos, sítios 33 e 9 (sítios mais úmidos) com as maiores médias, sítio 13 com valores intermediários, e o sítio 19 foi o sítio de menor densidade. AV, %AV e EPF não se diferiram entre os sítios.

Avaliar as médias das características da madeira por sítio proporcionou correlações mais fortes (Tabela 1B). DM e DLF apresentaram maior proximidade com as variáveis meteorológicas, um indicativo de maiores correlações. Temperatura apresentou correlações fortes e negativas com DM, AV e EPF ($r = -0,89$, $r = -0,68$ e $r = -0,70$) e positiva com FV e DLF ($r = 0,74$ e $r = 0,90$). DEF apresentou correlações

semelhantes às de temperatura (DM = -0,89, AV = -0,64, FV = 0,79, EPF = -0,67, DLF = 0,83) e P relações opostas (DM = 0,91, AV = 0,72, FV = -0,62, EPF = 0,75, DLF = -0,96).

DM foi positivamente correlacionada com AV ($r = 0,59$) e EPF ($r = 0,70$), e negativamente com FV ($r = -0,71$) e DLF ($r = -0,92$), enquanto EPF apresentou correlações positivas com AV ($r = 0,59$) e negativas com FV ($r = -0,62$).

Tabela 1. A) Valores e teste de comparação de médias e B) Correlação de rede entre fatores meteorológicos e características da madeira de *E. urophylla* cultivados em quatro sítios no Brasil.

A	Sítios				B) Rede de correlações
	Sítio 33 Buri	Sítio 09 Estrela do Sul	Sítio 13 Três Lagoas	Sítio 19 Peixe	
			- DEF +		
DM	0,662a	0,650a	0,588b	0,536c	
AV	16314,8a	15464,2a	12354,4a	11368,6a	
%AV	11,98a	13,75a	11,58a	10,64a	
FV	11,81b	12,67b	12,97b	14,69a	
EPF	7,60a	7,40a	6,14a	5,60a	
DLF	8,96b	11,01b	17,36a	18,56a	

As médias finais de DM, AV, %SV, FV e EPF foram comparadas pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$). DM: densidade da madeira (g cm^{-3}), AV: área de vaso (μm), %AV: porcentagem de área de vaso, FV: frequência de vaso (n° vasos cm^{-2}), EPF: espessura parede das fibras (μm), DLF: diâmetro do lúmen das fibras (μm), T: temperatura ($^\circ\text{C}$), P: precipitação (mm ano^{-1}) e DEF: déficit hídrico (mm ano^{-1}). Correlações positivas foram apresentadas em verde e correlações negativas em vermelho.

7.3.3 Correlações entre clima e característica químicas da madeira

Os sítios 33-Buri e 13-Três Lagoas apresentaram menor conteúdo de extrativos (Tabela 2A), enquanto os menores valores da relação S/G foram observados nos sítios 33-Buri e 9-Estrela do Sul. Lignina total, holocelulose e cinzas não apresentaram diferenças significativas entre sítios. Na análise elementar, o sítio 33, mais úmido, se diferenciou dos demais apresentando maior conteúdo de carbono e hidrogênio, e menores valores de oxigênio.

Tabela 2. A) Valores e teste de comparação de médias e B) Correlação de rede entre fatores meteorológicos e características químicas de *E. urophylla* cultivados em quatro sítios no Brasil.

A (%)	Sítios				B) Rede de correlações	
	Sítio 33 Buri	Sítio 09 Estrela do Sul	Sítio 13 Três Lagoas	Sítio 19 Peixe		
Componentes da madeira	Extrativos	3,84b	5,42a	3,69b	4,82a	
	Lignina total	30,64a	29,91a	30,31a	29,80a	
	S/G	1,60b	1,63b	1,71a	1,74a	
	Holocelulose	65,52a	64,63a	65,95a	65,34a	
	Cinzas	0,01a	0,04a	0,05a	0,04a	
Química elementar	C	46,94a	46,67b	46,38c	46,37c	
	H	5,97a	5,68b	5,79b	5,80b	
	O	47,02b	47,53a	47,71a	47,72a	
	N	0,06a	0,06a	0,07a	0,07a	
	S	0,01	0,01	0,01	0,01	

As médias finais dos constituintes químicos da madeira foram comparadas pelo teste de Scott Knott ($p < 0,05$). O teste de médias para S não apresentou normalidade. LG: Lignina total, S/G: siringyl/guaiacyl, C: carbono, H: hidrogênio, O: oxigênio, N: nitrogênio, S: enxofre, T: temperatura, P: precipitação e DEF: déficit hídrico. Correlações positivas foram apresentadas em verde e correlações negativas em vermelho.

Somente o teor de lignina total e a relação S/G apresentaram correlações significativas com as variáveis meteorológicas (Tabela 2B). Teor de lignina se correlacionou de forma negativa com T e DEF ($r = -0,59$, $r = -0,63$), enquanto para relação S/G as correlações foram positivas ($r = 0,83$ e $r = 0,78$). Na análise elementar, carbono e oxigênio apresentaram correlações significativas e opostas com T e DEF. Enquanto aumentos em temperatura e déficit hídrico e menor precipitação diminuiriam a %C ($r = -0,91$, $r = -0,80$ e $r = 0,89$), essas situações promoveriam aumentos na % O.

O primeiro e o segundo componente da análise de componentes principais explicaram 33,86% e 25,55%, respectivamente, da variação dos elementos na madeira (Figura 5a). Os sítios se comportaram de forma distinta quanto a concentração de metais. Os sítios com condições climáticas mais contrastantes (33-

Buri e 19-Peixe) foram opostos, indicando desempenho diferente da concentração de elementos.

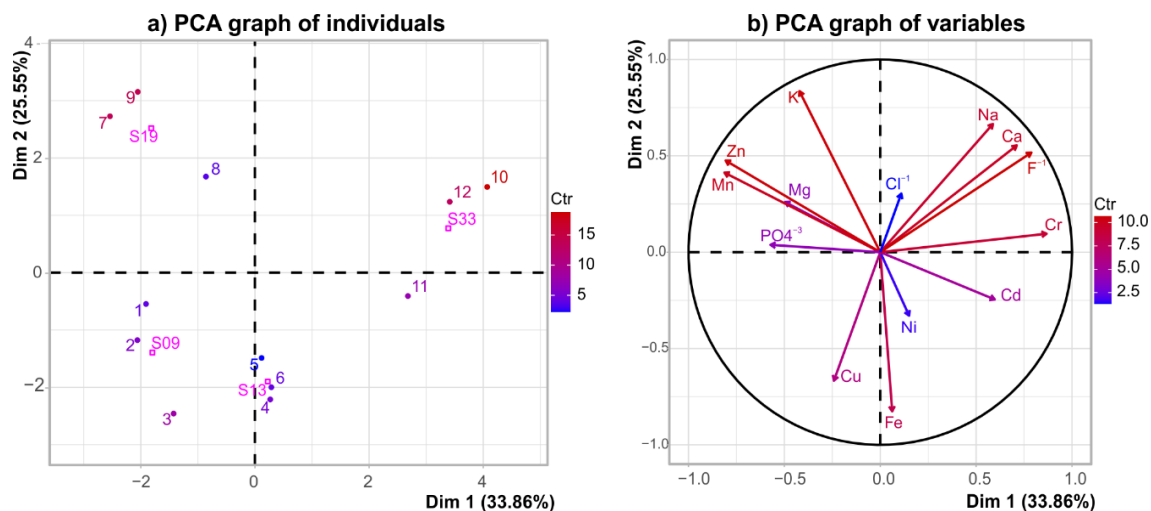


Figura 5. Distribuição dos elementos da madeira na análise de componentes principais (PCA). F⁻¹: fluorestos, Cl⁻¹: cloretos, PO₄⁻¹: fosfatos. Os números no gráfico de indivíduos correspondem as repetições em cada sítio. S19: Peixe, S13: Três Lagoas, S9: Estrela do Sul, e S33: Buri. Ctr: Contribuição (%).

Os elementos foram escalonados em diversas direções nos dois eixos da PCA (Figura 5b), indicando que na maioria dos casos a concentração dos íons entre si não são diretamente relacionadas. O eixo x foi correlacionado com os elementos Cr, F⁻¹, Ca, Cd, enquanto o eixo y com os elementos K, Na e Fe, indicando a relevância de macronutrientes, como potássio, fósforo e cálcio, como elementos de maior contribuição para a variação entre sítios. O sítio 19, mais seco, apresentou maior concentração dos elementos K, Zn, Mn, e o sítio 33, mais úmido, valores mais elevados de Na, Ca, F⁻¹.

A Tabela 3A apresenta as quantidades de elementos minerais contidos na estrutura da madeira. Na foi o nutriente mais abundante, e os fluoretos foram os encontrados em menor concentração. Maiores teores de um elemento não significaram necessariamente teores elevados dos demais. Cu e Cr, apesar de classificados como elementos traços, ou seja, que normalmente são encontrados em menores quantidades, apresentaram valores expressivos na madeira do clone estudado, com valores semelhantes aos macronutrientes.

Os valores em kg/ha dos elementos que foram exportados do solo na forma de madeira após o corte das árvores foram avaliados (Tabela 3B). As diferenças entre sítios não ocorreram apenas em função dos teores de elementos na madeira, mas também por meio das variações da produção volumétrica e na densidade de *E*.

urophylla entre sítios. Sítios menos produtivos, como 19-Peixe, exportaram menos elementos por hectare. O sítio 33-Buri se destacou como o sítio com maior valor de exportação de nutrientes (Na, K, Ca e Mg), apesar de não serem observadas tendências relacionadas às características dos sítios. Elementos traços (Mn, Fe Zn, Ni, Cu, Cr e Cd) apresentaram valores de exportação por ha mais próximos entre os sítios.

Tabela 3. Teores médios de elementos minerais presentes na madeira de *E. urophylla* (mg de elemento / kg de madeira) e exportados após o corte das árvores por hectare colhido.

Elementos	A) Quantidade de elemento produzido				B) Quantidade de elementos exportados			
	mg de elemento / kg de madeira				kg de elemento / hectare			
	33	9	13	19	33	9	13	19
Na	1411,73	1247,56	1239,18	1335,62	360,82	213,81	186,71	96,77
K	597,85	633,95	280,21	1046,43	152,80	108,65	42,22	75,81
Ca	820,60	494,46	664,00	698,41	209,74	84,74	100,05	50,60
Mg	248,64	259,42	327,44	346,29	63,55	44,46	49,34	25,09
Fosfatos	70,67	145,10	48,99	99,48	18,06	24,87	7,38	7,21
Mn	6,70	11,59	7,71	12,63	1,71	1,99	1,16	0,92
Fe	10,47	13,21	13,07	6,78	2,68	2,26	1,97	0,49
Zn	5,04	9,38	7,43	13,30	1,29	1,61	1,12	0,96
Ni	53,84	59,08	50,98	43,71	13,76	10,12	7,68	3,17
Cu	440,16	552,22	502,15	426,89	112,50	94,64	75,66	30,93
Cd	46,36	18,12	39,09	21,58	11,85	3,11	5,89	1,56
Cr	421,62	75,66	130,87	20,60	107,76	12,97	19,72	1,49
Fluorestos	1,17	0,82	0,85	0,93	0,30	0,14	0,13	0,07
Cloretos	60,96	56,18	15,94	48,69	15,58	9,63	2,40	3,53

7.4 DISCUSSÃO

7.4.1 *Variações anuais nas características anatômicas da madeira*

A atividade cambial das árvores está associada aos ciclos sazonais de atividade e dormência, podendo ser regulada por variáveis como precipitação, temperatura e fotoperíodo, desde que apresentem periodicidade anual (ZHANG et al., 2014; BEGUM et al., 2017). Apesar do curto período de tempo e quantidade de árvores, a avaliação anual mostrou que melhores correlações entre características da madeira e variáveis climáticas são obtidas em ciclos com a madeira mais adulta e avaliando a média final dos dados. As diferenças das variáveis de clima entre os anos foram pequenas e com poucas amostras (Apêndice 1), o que, em geral, não foi suficiente para promover alterações nas características do xilema. Ciclos com o câmbio mais velho, devido a predominância de lenho adulto, são melhores correlacionados com as variáveis climáticas, devido a menor influência do crescimento da árvore nesses períodos, o que na dendrocronologia é alcançado tradicionalmente pela padronização da cronologia (BIONDI, 2020).

Na comparação por ciclos, DLF não apresentou correlações com precipitação, enquanto comparando a média geral de crescimento, DLF e P apresentaram correlação forte e significativa ($r = -0,94$). Variações entre anos e dentro do mesmo ano (meses chuvosos e secos dos sítios não são os mesmos) nos índices de precipitação podem mascarar os resultados de correlações com essa variável, e essa relação ainda pode mudar entre os anos de crescimento. Nos ciclos 2013/2014 e 2014/2015, sítios mais secos apresentaram maior fração parede associada a fibras com menores diâmetros de lúmen, o que indica uma influência do déficit hídrico e alterações na pressão de turgescência na variação anatômica das células nesse período (ZHANG et al., 2014). Enquanto nos ciclos 2015/2016 e 2016/2017, EPF é uma característica que também foi influenciada pelas diferenças entre os sítios, com alterações na densidade nesse período também promovidas pela maior ou menor disponibilidade de açúcares produzidos pela fotossíntese (ZHONG; YE, 2015).

7.4.2 *Correlações entre clima e características anatômicas da madeira*

Entre sítios, as diferenças climáticas foram mais acentuadas do que entre ciclos, o que permitiu estabelecer correlações significativas estatisticamente e coerentes do ponto de vista biológico. Sítios com maior temperatura e déficit hídrico

foram associados a uma maior frequência de vasos, e em situações de restrição hídrica, o clone A1 também apresentou vasos menores e maior densidade de vasos (CÂMARA et al., 2020). Essa tendência é comumente associada a menor vulnerabilidade à embolia (MCELTRONE et al., 2004), sendo essa diferença em área total de vaso compensada pelo aumento da frequência de vasos, o que é demonstrado nos resultados obtidos. Com o aumento na disponibilidade de água, uma menor diferença de pressão proporciona maior expansão de células e aumento do diâmetro do vaso como forma de melhor aproveitar os recursos hídricos (HACKE et al., 2001).

A temperatura se destacou como a variável meteorológica mais influente na modificação das características anatômicas da madeira deste clone *E. urophylla*, que é o material genético mais plantado no Brasil. Os sítios 9-Estrela do Sul e 13-Três Lagoas, apesar de médias anuais semelhantes em déficit hídrico e IMA, foram separados em grupos diferentes em relação à DM e DLF, sendo a diferença média anual de temperatura entre os dois sítios de 1,4°C e de precipitação de 200 mm. O sítio 13 foi agrupado para DLF juntamente com o sítio 19, com ambos apresentando precipitação média anual semelhante (aproximadamente 1200 mm) e valores de temperatura mais elevados no sítio 19 (26 °C). Esses resultados indicaram que, para o clone avaliado, aumentos em temperatura podem promover maior impacto nas características da madeira do que oscilações em precipitação. A diferença em T mais acentuada entre os sítios 19-Peixe e 30-Buri (6,8°C), os colocam em situações opostas nas comparações, com o aumento da temperatura colaborando para o aumento do déficit hídrico e do déficit de pressão de vapor e, conseqüentemente, influenciando a produtividade do sítio.

É importante ressaltar que o gradiente climático avaliado não contempla locais com elevadas temperatura e precipitação, como climas Af (tropical úmido ou superúmido) e Am (tropical úmido ou subúmido), sendo que nesses locais a temperatura poderia deixar de ser um fator limitante e o crescimento seria favorecido, apesar da elevação da temperatura.

Sítios com temperaturas mais amenas, além de maior densidade da madeira, foram correlacionados com menor DLF e maior EPF; o que está associado a facilitação das trocas gasosas nesses ambientes pelo maior tempo de estômatos abertos, aumentando a fixação de carbono tanto na forma de crescimento e formação de novas células, como na densidade da madeira pelo espessamento de parede das fibras (MACFARLANE et al., 2004; HILL et al., 2014). Desse modo, esse material genético, em sítios mais úmidos, encontra melhores condições para crescer e

umentar a resistência das suas células, expressando seu fenótipo ideal. Esse resultado é importante em relação ao uso da madeira, uma vez que a espessura da parede das fibras é relacionada com as propriedades mecânicas da madeira (ZIEMIŃSKA et al., 2013), sendo que o maior ou menor espessamento promoveria maior impacto na qualidade da madeira do que a frequência ou diâmetro dos vasos.

7.4.3 Correlações entre clima e características químicas da madeira

Não foi observada relação entre o teor de extrativos e o clima para a madeira desse clone, apesar de trabalhos relatarem que a menor disponibilidade hídrica também pode induzir a uma maior produção de extrativos na madeira de eucalipto com intuito de defesa, fonte de energia e reserva funcional para biossíntese de componentes (FREDERICO, 2009; GOUVÊA et al., 2012).

No entanto, correlações significativas entre T e DEF com a lignina e a relação lignina Siringyl/Guaiacyl foram estabelecidas. Essas mesmas variáveis climáticas foram associadas ao aumento da EPF, o que confirma essa relação pois a lignina é um dos principais constituintes da lamela média e parede celular secundária (ROWELL et al., 2005; LIAO et al., 2020). Na maioria das plantas dicotiledôneas, o espessamento das paredes secundárias ocorre principalmente em células condutoras de água do xilema, que tendem a conter níveis mais elevados de unidades G, e em fibras estruturais, que são tipicamente enriquecidas em unidades S (CESARINO et al., 2012). O processo de diferenciação e lignificação mais prolongado e lento em traqueídes pode gerar mais lignina do tipo Siringyl nas plantas (WAGNER et al., 2015), o que também foi observado pela maior relação S/G associada a maiores T e DEF, ou seja, locais em que as árvores de *E. urophylla* apresentam crescimento mais lento.

A lignina é um dos mais importantes componentes químicos da madeira que afeta a produção de celulose (CARRILLO-VARELA et al., 2017). Ligninas do tipo Guaiacyl contêm ligações mais resistentes do que as unidades de Siringyl, de modo que uma maior relação S/G é desejável nos processos de polpação, o que foi observado em sítios mais secos. A lignina também é considerada o constituinte químico importante para a produção de carvão vegetal, pois têm implicações diretas no rendimento gravimétrico e teor de carbono fixo (GOUVÊA et al., 2015), com valores menores de relação S/G sendo mais desejáveis.

A madeira é constituída de aproximadamente 50% de carbono, com pouca variação em relação às diferentes espécies do gênero *Eucalyptus* (PEREIRA et al.,

2013). Apesar de valores muito similares, o sítio 33-Buri se diferenciou dos outros com maior concentração de carbono, sendo o sítio avaliado como mais produtivo e, conseqüentemente, o que mais retira nutrientes do solo. Em geral, árvores produtivas, que são altamente eficientes em produção de peso e de volume de madeira, são também mais eficientes no uso de nutrientes (FREDDO et al., 1999). O sítio 19 é o menos produtivo e por isso retira menos nutrientes do solo, mas o ingresso de nutrientes na fábrica por tonelada de madeira dos dois sítios seria semelhante.

Nessa pesquisa, o maior crescimento das árvores do clone de *E. urophylla* é associado a climas mais úmidos, no entanto, a quantidade de nutrientes constituindo a madeira não pôde ser diretamente associada às variáveis climáticas em si. O potássio (K) e o cálcio (Ca) são elementos essenciais para o metabolismo das árvores e vários processos fisiológicos relacionados ao crescimento (FROMM, 2010). K atua no potencial osmótico e possibilita rápido fechamento dos estômatos e alterações na transpiração para uma maior resistência à seca (HU et al., 2013), e foi encontrado em maior quantidade na madeira do sítio mais seco (19-Peixe), indicando maior absorção desse elemento. Ca participa da divisão celular, além de fazer parte da composição da lignina e polissacarídeos constituintes da parede (FROMM, 2010), e foi obtido em maior quantidade no sítio mais úmido (33-Buri), que além do maior crescimento foi caracterizado com maior densidade da madeira e espessura da parede das fibras.

A exportação de nutrientes na madeira, além do efeito silvicultural (retirada de elementos do solo), influencia a produção industrial pela quantidade de minerais que ingressarão com a madeira na fábrica e podem causar problemas na industrialização da madeira (FOELKEL, 2005). Diferenças nos valores de nutrientes exportados por sítio reforçam a importância da formulação da adubação com base, além das condições do solo, na produtividade esperada pelo clone, de modo a possibilitar uma reposição dos níveis de todos esses elementos minerais extraídos. No entanto, a escolha de sítios férteis e com condições climáticas que favoreçam o crescimento, se mantém como uma das principais formas de manipulação da qualidade da madeira, associado à escolha de clones adequados.

O clone A1 de *E. urophylla* é um material caracterizado como tolerante a seca e plástico com base na adequação esperada para uma ampla gama de condições ambientais (BINKLEY et al., 2017), e que, sem apresentar danos significativos ao crescimento da árvore, mostrou-se capaz de aclimatar à ambientes mais secos por meio de modificações dos elementos do xilema para sobrevivência (CÂMARA et al., 2020). Essa plasticidade é observada pelas modificações nas características da

madeira para manutenção do crescimento e da sobrevivência nos diferentes sítios, e pela expressão fenotípica de características ideais em parâmetros produtivos de sítios com condições favoráveis (em geral nos sítios mais úmidos e com menor temperatura).

CONCLUSÃO

A temperatura foi variável com uma maior influência nas características anatômicas e densidade da madeira, e variações em T podem promover maior modificação dessas características do que oscilações em precipitação, considerando regiões com condições de clima e crescimento semelhantes às avaliadas. DLF foi a característica anatômica mais plásticas. O aumento da densidade da madeira em sítios úmidos mais produtivos é considerado uma característica desejável na perspectiva industrial e foi validado pelas alterações na estrutura anatômica da madeira. Verificou-se que o aumento da densidade estava mais correlacionado com a diminuição da dimensão do lúmen ($r = -0,73$) do que o aumento da espessura da parede ($r = 0,62$).

A plasticidade e bom desempenho do clone avaliado pode ser associado, além das características da espécie, ao trabalho de melhoramento genético já estabelecido nesse material, o que o faz ser utilizado por diferentes empresas nos plantios comerciais do Brasil. Portanto, o desenvolvimento de árvores mais produtivas e eficientes na absorção e utilização dos nutrientes por cruzamento e clonagem, se mantém como uma metodologia adequada para obtenção de maior produtividade. Pesquisas que avaliem a influência da relação genótipo x ambiente de clones comerciais na qualidade da madeira são indicadas para auxiliar gestores na escolha de sítios, além da produtividade.

As características químicas da madeira apresentaram tendências e relações mais tênues com as variações climáticas. Algumas características são bastante estáveis, como as porcentagens de CHNS e alguns metais, sendo necessário avaliar com mais rigor se as variáveis que diferiram entre ambientes são realmente influenciadas pelo clima ou por condições intrínsecas de cada sítio. Na foi o nutriente mais abundante independente do sítio.

De modo geral, novos estudos de composição química da madeira, balanços nutricionais ou exportação de nutrientes são importantes e necessários, e precisam antes de tudo de um delineamento mais robusto e melhor aperfeiçoamento das técnicas de amostragem e de análise.

REFERÊNCIAS

- ALFONSO, V. A.; BASS, P.; CARLQUIST, S.; CHIMELO, J. P.; CORADIN, V. T. R.; GASSON, P.; GROSSER, D.; ILIX, J.; KURODA, K.; MILLER, R. B.; OGATA, K.; RICHTER, H.; WELLE, B.; WHEELER, E. IAWA list of microscopic features. **IAWA**, v. 10, n. 3, p. 219–332, 1989.
- ALMEIDA, M. N. F. DE; VIDAURRE, G. B.; PEZZOPANE, J. E. M.; LOUSADA, J. L. P. C.; SILVA, M. E. C. M.; CÂMARA, A. P.; ROCHA, S. M. G.; OLIVEIRA, J. C. L.; CAMPOE, O. C.; CARNEIRO, R. L.; ALVARES, C. A.; TOMAZZELO-FILHO, M.; FIGUEIREDO, F. M.; OLIVEIRA, R. F. Heartwood variation of *Eucalyptus urophylla* is influenced by climatic conditions. **Forest Ecology and Management**, v. 458, p. 1–10, 2020.
- ALVARES, C. A.; STAPE, L.; SENTELHAS, P. C.; GONC, L. D. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- BEGUM, S.; KUDO, K.; RAHMAN, H.; NAKABA, S. Climate change and the regulation of wood formation in trees by temperature. **Trees**, 2017. Springer Berlin Heidelberg.
- BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C.; CARNEIRO, R. L.; CEGATTA, I.; STAPE, J. L. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal *Eucalyptus* plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 405, n. September, p. 271–283, 2017. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.050>>.
- BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C. A.; CARNEIRO, R. L.; STAPE, J. L. Variation in whole-rotation yield among *Eucalyptus* genotypes in response to water and heat stresses: The TECHS project. **Forest Ecology and Management**, v. 462, n. January, p. 117953, 2020. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117953>>.
- BIONDI, F. From dendrochronology to allometry. **Forests**, v. 11, n. 2, p. 1–17, 2020.
- BURDON, R. D.; LI, Y.; SUONTAMA, M.; DUNGEY, H. S. Genotype x site x silviculture interactions in radiata pine: knowledge, working hypotheses and pointers for research. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 47, n. 1, p. 1–7, 2017. New Zealand Journal of Forestry Science.
- CALDEIRA, D. R. M.; ALVARES, C. A.; CAMPOE, O. C.; HAKAMADA, R. E.; GUERRINI, I. A.; CEGATTA, I. R.; STAPE, J. L. Multisite evaluation of the 3-PG model for the highest phenotypic plasticity *Eucalyptus* clone in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 462, n. February, p. 117989, 2020. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117989>>.
- CÂMARA, A. P.; VIDAURRE, G. B.; OLIVEIRA, J. C. L.; PICOLI, E. A. T.; ALMEIDA, M. N. F.; ROQUE, R. M.; TOMAZELLO FILHO, M.; SOUZA, H. J. P.; OLIVEIRA, T. R.; CAMPOE, O. C. Changes in hydraulic architecture across a water availability gradient for two contrasting commercial *Eucalyptus* clones. **Forest Ecology and Management**, v. 474, n. June, p. 118380, 2020. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118380>>.

CARRILLO-VARELA, I. VIDAL, C.; ELISSETCHE, J. P.; MENDONÇA, R. T. Wood anatomical and chemical properties related to the pulpability of *Eucalyptus globulus*: a review. **Southern Forests**, p. 1–8, 2017.

CESARINO, I.; ARAÚJO, P.; DOMINGUES, A. P.; MAZZAFERA, P. An overview of lignin metabolism and its effect on biomass recalcitrance. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 35, n. 4, p. 303–311, 2012.

CHOAT, B.; COBB, A. R.; JANSEN, S. Structure and function of bordered pits: new discoveries and impacts on whole-plant hydraulic function. **New Phytologist**, v. 177, p. 608–626, 2008.

CREGG, B. M.; DOUGHERTY, P. Growth and wood quality of young loblolly pine trees in relation to stand density and climatic factors. **Canadian Journal Forest Research**, v. 18, p. 851–858, 1988.

ELLI, E. F.; HUTH, N.; SENDELHAS, P. C.; CARNEIRO, R. L.; ALVARES, C. A. Global sensitivity-based modelling approach to identify suitable *Eucalyptus* traits for adaptation to climate variability and change. **In Silico Plants**, v. 2, n. 1, p. 1–17, 2020.

ELLI, E. F.; SENDELHAS, P. C.; FREITAS, C. H. DE; CARNEIRO, R. L.; ALVARES, C. A. Intercomparison of structural features and performance of Eucalyptus simulation models and their ensemble for yield estimations. **Forest Ecology and Management**, v. 450, n. June, p. 117493, 2019.

ENES, T.; ARANHA, J.; FONSECA, T.; MATOS, C.; BARROS, A.; LOUSADA, J. Residual agroforestry biomass-thermochemical properties. **Forests**, v. 10, n. 12, p. 1–21, 2019.

FLORES, T.; ALVARES, C. A.; SOUZA, V.; STAPE, J. L. **Eucalyptus in Brazil: Climatic Zoning and Identification Guide**. Piracicaba/SP: IPEF, 2018.

FOELKEL, C. **Minerais e nutrientes das árvores dos eucaliptos: Aspectos ambientais, fisiológicos, silviculturais e industriais acerca dos elementos inorgânicos presentes nas árvores**. 2005.

FONTI, P.; ARX, G. VON; GARCÍA-GONZÁLEZ, I.; EILMANN, B.; SASS-KLAASSEN, U.; GÄRTNER, H.; ECKSTEIN, D. Studying global change through investigation of the plastic responses of xylem anatomy in tree rings. **New Phytologist**, v. 185, n. 1, p. 42–53, 2010.

FOSTER, N. W.; BHATTI, J. S. Forest Ecosystems: Nutrient Cycling. **Encyclopedia of Soil Science**, p. 718–721, 2006.

FREDDO, A.; FOELKEL, C.; FIZZO, S.; SILVA, M. Elementos minerais em madeiras de eucaliptos e acácia negra e sua influência na indústria de celulose kraft branqueada. **Ciência Florestal**, v. 9, n. 1, p. 193–209, 1999.

FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**, 2009.

FROMM, J. Wood formation of trees in relation to potassium and calcium nutrition. **Tree Physiology**, v. 30, n. 9, p. 1140–1147, 2010.

GALLO, R.; PANTUZA, I. B.; SANTOS, G. A. DOS; RESENDE, M. D. V.; XAVIER, A.; SIMIQUELI, G. F.; BALDIN, T. SANTOS, O. P.; VALENTE, B. M. R. T. Growth and wood quality traits in the genetic selection of potential *Eucalyptus dunnii* Maiden clones for pulp production. *Industrial Crops and Products*, v. 123, n. July, p. 434–441, 2018.

GOUVÊA, A. DE F. G.; GOMES, C. M.; MATOS, L. M.; SOUZA, T.; KUMABE, F. J. B.; BENITES, P. K. R. M. Efeito do sítio nas características tecnológicas da madeira de *Eucalyptus* para produção de celulose Kraft. **Ciência da Madeira (Braz. J. Wood Sci.)**, v. 03, p. 102–114, 2012.

GOUVÊA, A. F. G.; TRUGILHO, P. F.; ASSIS, C. O.; ASSIS, M.R.; COLODETTE, J.L.; GOMES, C.M. Avaliação do Efeito da Relação Siringila/Guaiacila da Lignina de Eucalipto na Produção de Carvão Vegetal. **Revista Ciência da Madeira - RCM**, v. 6, n. 2, p. 71–78, 2015.

HACKE, U. G.; SPERRY, J. S.; POCKMAN, W. T.; DAVIS, S. D.; MCCULLOH, K. A. Trends in wood density and structure are linked to prevention of xylem implosion by negative pressure. **Oecologia**, v. 126, n. 4, p. 457–461, 2001.

HILL, K. E.; GUERIN, G. R.; HILL, R. S.; WATLING, J. R. Temperature influences stomatal density and maximum potential water loss through stomata of *Dodonaea viscosa* subsp. *angustissima* along a latitude gradient in southern Australia. **Australian Journal of Botany**, v. 62, n. 8, p. 657–665, 2014.

HU, L.; WANG, Z.; HUANG, B. Effects of cytokinin and potassium on stomatal and photosynthetic recovery of kentucky bluegrass from drought stress. **Crop Science**, v. 53, n. 1, p. 221–231, 2013.

KUHN, A. J.; SCHRÖDER, W. H.; BAUCH, J. On the distribution and transport of mineral elements in xylem, cambium and phloem of spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). **Holzforschung**, v. 51, n. 6, p. 487–496, 1997.

LENS, F.; TIXIER, A.; COCHARD, H.; SPERRY, J. S.; JANSEN, S.; HERBETTE, S. Embolism resistance as a key mechanism to understand adaptive plant strategies. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 16, n. 3, p. 287–292, 2013.

LIAO, J. J.; LATIF, N. H. A.; TRACHE, D.; BROSSE, N.; HUSSIN, M. H. Current advancement on the isolation, characterization and application of lignin. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 162, p. 985–1024, 2020. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.06.168>>.

LIRA-MARTINS, D.; HUMPHREYS-WILLIAMS, E.; STREKOPYTOV, S.; ISHIDA, F. Y.; QUESADA, C. A.; LLOYD, J. Tropical tree branch-leaf nutrient scaling relationships vary with sampling location. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, n. July, 2019.

LÜTTGE, U. From dendrochronology and dendroclimatology to dendrobiochemistry. **Trees - Structure and Function**, v. 31, n. 6, p. 1743–1744, 2017.

MACFARLANE, C.; WHITE, D. A.; ADAMS, M. A. The apparent feed-forward response to vapour pressure deficit of stomata in droughted, old-grown. **Plant, Cell and Environment**, v. 27, p. 1268–1280, 2004.

MATTOS, E. M.; BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C. A.; STAPE, J. L. Variation in canopy structure, leaf area, light interception and light use efficiency

among Eucalyptus clones. **Forest Ecology and Management**, v. 463, n. November 2019, p. 118038, 2020. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118038>>.

MCELTRONE, A. J.; POCKMAN, W. T.; MARTÍNEZ-VILALTA, J.; JACKSON, R. B.; MCELTRONE, A. J. Variation in xylem structure and function in stems and roots of trees to 20 m depth. **New Phytologist**, v. 163, p. 507–517, 2004.

NÓIA JÚNIOR, R. DE S.; AMARAL, G. C.; PEZZOPANE, J. E. M.; FONSECA, M. D. S.; CÂMARA, A. P.; XAVIER, T. M. T. Ecophysiological acclimatization to cyclic water stress in Eucalyptus. **Journal of Forestry Research**, v. 31, n. 3, p. 797–806, 2020.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. D. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, A. C.; FONTES, M. P. F. Influence of Chemical Composition of *Eucalyptus* Wood on Gravimetric Yield and Charcoal Properties. **BioResources**, v. 8, n. 3, p. 4574–4592, 2013.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. 2019. Vienna. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>.

RAYMOND, C. A. Genetics of Eucalyptus wood properties. **Annals of Forest Science**, v. 59, n. 5–6, p. 525–531, 2002. Disponível em: <<http://www.edpsciences.org/10.1051/forest:2002037>>.

ROCHA, S. M. G.; VIDAURRE, G. B.; PEZZOPANE, J. E. M.; ALMEIDA, M. N. F.; CARNEIRO, R. L.; CAMPOE, O. C.; SCOLFORO, H. F.; ALVARES, C. A.; NEVES, J. C. L.; XAVIER, A. C.; FIGURA, M. A. Influence of climatic variations on production, biomass and density of wood in eucalyptus clones of different species. **Forest Ecology and Management**, v. 473, n. 82, p. 118290, 2020. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118290>>.

ROWELL, R.; PETERSEN, R.; HAN, J.; ROWELL, J.; TSHABALALA, M. Cell-wall chemistry. In: R. Rowell (Ed.); **Handbook of wood chemistry and wood composites**. v. 1, p.504, 2005. Taylor & Francis.

SCHUETZ, M.; SMITH, R.; ELLIS, B. Xylem tissue specification, patterning, and differentiation mechanisms. **Journal of experimental botany**, v. 64, n. 1, p. 11–31, 2013. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22058406>><<http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=PMC3254685>>.

SETTE JUNIOR, C. R. **Aplicação de potássio e sódio no crescimento e na qualidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden**, 2010. USP.

SILVÉRIO, F. O.; BARBOSA, L. C. D. A.; GOMIDE, J. L.; REIS, F. P.; PILÓ-VELOSO, D. Metodologia de extração e determinação do teor de extrativos em madeiras de eucalipto. **Revista Arvore**, v. 30, n. 6, p. 1009–1016, 2006.

WAGNER, A.; TOBIMATSU, Y.; PHILLIPS, L.; FLINT, H.; GEDDES, B.; LU, F.; RALPH, J. Syringyl lignin production in conifers: Proof of concept in a Pine tracheary element system. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 112, n. 19, p. 6218–6223, 2015.

ZHANG, J.; NIEMINEN, K.; SERRA, J. A. A.; HELARIUTTA, Y. The formation of wood and its control. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 17, n. 1, p. 56–63, 2014.

ZHONG, R.; YE, Z. H. Secondary cell walls: Biosynthesis, patterned deposition and transcriptional regulation. **Plant and Cell Physiology**, v. 56, n. 2, p. 195–214, 2015.

ZIEMIŃSKA, K.; BUTLER, D. W.; GLEASON, S. M.; WRIGHT, I. J.; WESTOBY, M. Fibre wall and lumen fractions drive wood density variation across 24 Australian angiosperms. **AoB PLANTS**, v. 5, p. 1–14, 2013.

APÊNDICES

Apêndice 1

Abaixo são apresentados os quadros de análise de variância fatorial resultante da análise da interação entre características anatômicas da madeira e sítios.

Área de vaso

Quadro da análise de variância

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Sítio	3	1,98E+08	65883410	12,6654	0.00001
Anel	3	97829695	32609898	6,2689	0.00181
Sítio*Anel	9	33741253	3749028	0,7207	0.68638
Resíduo	32	1,66E+08	5201854		
Total	47	4,96E+08			

CV = 18,69 %

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk)

valor-p: 0,1576226

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

Interação não significativa: analisando os efeitos simples

Sítio

Teste de Scott-Knott

Grupos	Tratamentos	Medias
1	a	33 14308,2
2	a	9 14152,98
3	b	19 10175,2
4	b	13 10172,09

Anel

Teste de Scott-Knott

	Grupos	Tratamentos	Medias
1	a	1	14566,95
2	b	2	12030,24
3	b	4	11356,59
4	b	3	10854,68

Porcentagem de área de vaso

Quadro da análise de variância

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Sítio	3	41,162	13,7205	3,6481	0,02275
Anel	3	42,511	14,1702	3,7676	0,02011
Sítio*Anel	9	16,489	1,8321	0,4871	0,8723
Residuo	32	120,354	3,7611		
Total	47	220,515			

CV = 17,55 %

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk)

valor-p: 0,4106065

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significancia, os resíduos podem ser considerados normais.

Interação não significativa: analisando os efeitos simples

Sítio

Teste de Scott-Knott

Grupos	Tratamentos		Medias
1	a	9	12,14401
2	a	33	11,7853
3	b	13	10,22108
4	b	19	10,04725

Anel

Teste de Scott-Knott

Grupos	Tratamentos		Medias
1	a	1	12,37391
2	a	2	11,47177
3	b	4	10,38106
4	b	3	9,970904

Frequência de vaso

Quadro da análise de variância

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Sítio	3	40,269	13,4228	4,4907	0,00969
Anel	3	12,176	4,0586	1,3579	0,27326
Sítio*Anel	9	12,463	1,3848	0,4633	0,88819
Resíduo	32	95,648	2,9890		
Total	47	160,556			

CV = 12,81 %

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk)

valor-p: 0,5786121

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

Interação não significativa: analisando os efeitos simples

Sítio

Teste de Scott-Knott

	Grupos	Tratamentos	Medias
1	a	19	14,81944
2	a	13	13,875
3	b	9	12,79167
4	b	33	12,51389

Anel

De acordo com o teste F, as medias desse fator são estatisticamente iguais.

	Níveis	Medias
1	1	12,84722
2	2	13,73611
3	3	14,18056
4	4	13,23611

Espessura parede de fibra

Quadro da análise de variância

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Sítio	3	47,410	15,803	20,6401	0
Anel	3	1,241	0,413	0,5401	0,65827
Sítio*Anel	9	6,590	0,732	0,9563	0,49262
Resíduo	32	24,501	0,766		
Total	47	79,742			

CV = 12,73 %

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk)

valor-p: 0,7264469

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

Interação não significativa: analisando os efeitos simples

Sítio

Teste de Scott-Knott

	Grupos	Tratamentos	Medias
1	a	33	8,271415
2	b	9	7,345176
3	c	13	6,047358
4	c	19	5,82866

Anel

De acordo com o teste F, as medias desse fator são estatisticamente iguais.

	Níveis	Medias
1	1	6,637311
2	2	6,812717
3	3	7,010697
4	4	7,031883

Diâmetro Lúmen da Fibra

Quadro da análise de variância

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Sítio	3	652,75	217,583	70,617	0
Anel	3	3,37	1,124	0,365	0,77885
Sítio*Anel	9	32,33	3,592	1,166	0,34903
Resíduo	32	98,6	3,081		
Total	47	787,05			

CV = 12,67 %

Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk)

valor-p: 0,9865962

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância, os resíduos podem ser considerados normais.

Interação não significativa: analisando os efeitos simples

Sítio

Teste de Scott-Knott

	Grupos	Tratamentos	Medias
1	a	19	18,22695
2	a	13	16,76871
3	b	9	10,53515
4	b	33	9,883757

Anel

De acordo com o teste F, as medias desse fator são estatisticamente iguais.

	Níveis	Medias
1	1	14,00949
2	2	14,05504
3	3	13,95101
4	4	13,39903

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Correlações fortes e bem estabelecidas entre variáveis climáticas e algumas propriedades da madeira com a densidade e a espessura da parede de fibras já eram esperadas, no entanto, nossa principal descoberta para A1 – *Eucalyptus urophylla* foi identificar a temperatura como a variável com maior influência nas alterações da madeira desse clone.

As correlações estabelecidas entre temperatura e eficiência no uso da água (EUA) no capítulo 1 ($r = -0,81$), já indicaram uma maior associação da produção à capacidade de manutenção da abertura estomática do que pela oferta de água. Nossos resultados mostraram que para o clone avaliado, aumentos em temperatura podem promover maior impacto nas características da madeira do que oscilações em precipitação.

Não foi possível avaliar as características da madeira do clone de *E. urophylla* em locais com elevadas temperatura e precipitação, como climas Af (tropical úmido ou superúmido) e Am (tropical úmido ou subúmido). Nesses locais, devido à elevada umidade associada ao regime de chuvas, as relações estabelecidas com a temperatura podem ser diferentes das observadas, uma vez que no gradiente avaliado os aumentos de temperatura foram sempre associados ao aumento da restrição hídrica. Experimentos considerando esses modelos são necessários para confirmar se nesses casos, a temperatura passaria de um fator limitante à um que propicie o crescimento das árvores.

Entre os sítios, o clone A1 de *E. urophylla* foi plástico para características da madeira como densidade, porcentagem de cerne e características anatômicas, alterando sua expressão fenotípica devido à influência ambiental. A formação de cerne se mostrou uma característica mais correlacionada com o clima do que a densidade da madeira, com padrões de variação ao longo do gradiente climático mais fáceis de serem identificados. O aumento da densidade foi mais correlacionado com a diminuição da dimensão do lúmen do que o aumento da espessura da parede. A largura do lúmen é regulada pelo efeito conjunto da pressão de turgescência (diretamente relacionada pelo déficit hídrico (DEF)) e pela disponibilidade de auxinas.

Os resultados indicam que uma mudança para locais ligeiramente mais quentes ou mais secos já conseguem promover mudanças em algumas características e propriedades da madeira. Em geral, sítios mais úmidos e com temperaturas mais amenas apresentaram maior crescimento, maior densidade da madeira, maior

porcentagem de cerne, maior área de vaso, menor diâmetro do lúmen das células, maior espessura da parede das fibras, maior teor de lignina total e menor relação S/G. Nas pesquisas realizadas com o clone A1 pelo TECHS, sítios na região sul do Brasil apresentaram potencial para maior produtividade em produção volumétrica, o que associado com a maior densidade da madeira obtida nessa pesquisa, indicam essas regiões como maiores produtoras em biomassa da madeira desse clone de *E. urophylla*.

A possibilidade de modelar e projetar essas variáveis com base em fatores climáticos e dendrométricos fornece aos gestores florestais uma metodologia não invasiva de obtenção de atributos da qualidade da madeira. É importante lembrar que essas relações não são lineares, não ocorrem isoladamente e contabilizar a variação de todos esses fatores requer um sistema de modelagem complexo. Entretanto, um direcionamento inicial para estratégias de expansão das áreas de cultivo desse clone em relação às características da madeira já pode ser encontrado nos nossos resultados.

Com a expansão de climas secos (Aw e As) no Brasil nos dois cenários utilizados (RCP 4.5 e 8.5), os mapas de densidade futura (2011-2040) apresentaram uma tendência geral de diminuição da densidade do clone, o que condiz com a redução de áreas com características próximas ao seu clima de origem (Cfa, Cfb, Cwa e Cwb) pela metade no cenário mais otimista (ALVARES, 2020). Considerando a redução da produção de madeira de eucalipto de 10 a 15% para um aumento de 1°C na temperatura média apontada por Binkley et al. (2020), as mudanças climáticas modificarão o planejamento de grandes empreendimentos florestais que passarão a ter de considerar, juntamente com a redução da produção e densidade da madeira e conseqüentemente de biomassa, formas de suprir essa demanda. Em alguns casos, melhorias no manejo dos plantios podem contribuir, além da aquisição de novos clones mais tolerantes. No entanto, uma alternativa que também se apresentará é a expansão das áreas de plantios, o que retorna à necessidade de conhecer o clima e a produtividade dessas novas áreas, uma vez que a resposta produtiva do eucalipto frente às mudanças climáticas é altamente sítio-específica.

Considerando a variabilidade dos resultados obtidos e a importância da caracterização da madeira para sua adequação ao uso em novos cenários florestais, outro ponto a ser destacado é a validação de metodologias que determinem as características da madeira de forma mais rápida e efetiva pelas empresas. A densidade da madeira é uma propriedade já bastante estudada, mas metodologias

que possibilitem determinar a porcentagem de cerne em campo podem viabilizar a inclusão dessa variável no planejamento do gestor.

O câmbio de árvores de eucalipto começa a produzir lenho adulto, geralmente, a partir do 10^o ano (RAMOS et al., 2011), de modo que as árvores avaliadas nessa pesquisa ainda apresentam somente lenho juvenil e, portanto, os resultados relacionados principalmente de densidade e anatomia da madeira serão diferentes em pesquisas que avaliem rotações mais longas. Além disso, considerando a crescente condução de talhadia em plantios de eucalipto, as alterações no ritmo de crescimento das árvores pela adoção desse sistema silvicultural também pode promover modificações nas características avaliadas.

Apesar da quantidade de nutrientes constituindo a madeira não ser diretamente associada às variáveis climáticas, esse foi um tópico importante a ser avaliado. A influência do ingresso de minerais que podem causar problemas no processo industrial é uma demanda de estudos ainda em aberto, e pesquisas sobre balanços nutricionais ou exportação de nutrientes são importantes e necessárias.

O delineamento do projeto é um ponto de destaque que possibilitou uma maior robustez dos resultados. A interdisciplinaridade do projeto TECHS propiciou uma discussão mais ampla e uma comparação de resultados de manejo e silvicultura do clone com as avaliações da madeira, além da possibilidade de trabalhar com locais tão diferentes, mas com condições de manejo padronizadas. Essa é provavelmente a direção dos projetos de pesquisa florestal nas próximas décadas, que cada vez mais precisarão unir perspectivas de ecologia, tecnologia e fisiologia para avançar no entendimento dos controles sobre a produção florestal.