



**LUCIANE NAIMEKE SCHMIDT**

**MODELAGEM DE CRESCIMENTO EM PLANTIOS DE  
EUCALIPTO EM FUNÇÃO DA INTERAÇÃO  
FERTILIZAÇÃO - CLIMA - DESBASTE**

**LAVRAS – MG**

**2022**

**LUCIANE NAIMEKE SCHMIDT**

**MODELAGEM DE CRESCIMENTO EM PLANTIOS DE EUCALIPTO EM FUNÇÃO  
DA INTERAÇÃO FERTILIZAÇÃO - CLIMA - DESBASTE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para a obtenção do título de Doutora.

Prof. Dr. José Roberto Soares Scolforo  
Orientador

Dr. Henrique Ferrazo Scolforo  
Coorientador

**LAVRAS - MG  
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Schmidt, Luciane Naimeke.

Modelagem de crescimento em plantios de eucalipto em função  
da interação fertilização - clima - desbaste / Luciane Naimeke  
Schmidt. - 2022.

125 p. : il.

Orientador(a): José Roberto Soares Scolforo.

Coorientador(a): Henrique Ferraço Scolforo.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2022.

Bibliografia.

1. Manejo florestal intensivo. 2. Fertilização na rotação  
intermediária. 3. Histórico climático. I. Scolforo, José Roberto  
Soares. II. Scolforo, Henrique Ferraço. III. Título.

**LUCIANE NAIMEKE SCHMIDT**

**MODELAGEM DE CRESCIMENTO EM PLANTIOS DE EUCALIPTO EM FUNÇÃO  
DA INTERAÇÃO FERTILIZAÇÃO - CLIMA - DESBASTE**

**GROWTH MODELING IN EUCALYPTUS STANDS AS A FUNCTION OF  
FERTILIZATION - CLIMATE - THINNING INTERACTION**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para a obtenção do título de Doutora.

APROVADA em 30 de maio de 2022

Dr. José Roberto Soares Scolforo UFLA  
Dr. Henrique Ferrazo Scolforo SUZANO  
Dra. Ximena Mendes de Oliveira UNICENTRO  
Dr. Lucas Rezende Gomide UFLA  
Dr. Otávio Camargo Campoé UFLA

Prof. Dr. José Roberto Soares Scolforo  
Orientador

Dr. Henrique Ferrazo Scolforo  
Coorientador

**LAVRAS - MG  
2022**

*Ao meu filho amado, Davi Akinori Schmidt Sanquetta.*

*Dedico.*

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, sempre gratidão à Deus, em quem eu deposito toda minha fé para tornar possível as conquistas que desejo almejar. Gratidão à Universidade Federal de Lavras, especialmente aos docentes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, pela oportunidade e pelo aprendizado adquirido. Gratidão à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), código de financiamento 001, pela concessão da bolsa de doutorado. Gratidão ao Prof. Dr. José Roberto Soares Scolforo e Dr. Henrique Ferraço Scolforo pela orientação e valiosos ensinamentos. Gratidão a Prof. Dra. Ximena Mendes de Oliveira pela grande prestatividade e disponibilidade em ajudar no desenvolvimento da tese. Gratidão à minha família, em especial a minha mãe, Hilsenir, que sempre foi solícita, principalmente auxiliando com os cuidados do meu filho, Davi, nascido durante esse processo. Gratidão as minhas companheiras de república, Fernanda e Sibeles, que me acolheram gestante e cuidaram tão bem de mim e do meu filho em todos os momentos. Gratidão aos colegas e amigos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, em especial a Anny, Bruna, Daniel, Lorena, Paula, Thiza e Ximena, pela parceria, amizade e companhia. Gratidão as demais pessoas especiais que estiveram ao meu lado, seja nas conversas, risadas, apoio ou conselhos.

## RESUMO GERAL

O manejo intensivo de plantios florestais de eucalipto requer a compreensão dos fatores que impactam no crescimento das árvores e na produtividade do sistema. A tese foi estruturada em 2 artigos e, para isso, utilizou-se um conjunto de dados proveniente de povoamentos de *Eucalyptus grandis* implantados no ano de 1999 nos Estados da Bahia e do Espírito Santo. Foram conduzidos três experimentos, cada um deles com doze tratamentos de desbastes, os quais se diferem entre si em número, idade e intensidade. Cada tratamento de desbaste apresentou quatro parcelas idênticas, sendo duas fertilizadas e duas não fertilizadas na rotação intermediária. No artigo 1 foi desenvolvida uma modelagem em duas etapas: um modelo de regressão logística em função da interação do índice de desbaste e do espaçamento relativo para determinar a probabilidade de ganho em volume com a fertilização na rotação intermediária; e um modelo de predição de volume em função da intensidade de desbaste, sítio e uniformidade, para quantificar o ganho adicional na produtividade dos povoamentos no final da rotação com o tratamento de fertilização aplicado. Os resultados demonstraram que a abordagem proposta foi precisa para modelar as respostas em volume à fertilização em rotação intermediária nos plantios clonais de eucalipto conduzidos para produção de madeira serrada. No artigo 2, o conjunto de equações de crescimento em altura dominante baseado na formulação de Lundqvist teve sua assíntota expandida em função do índice de desbaste, do indicativo de fertilização e da temperatura mínima, permitindo estimativas precisas ao predizer e projetar a altura dominante dos plantios de eucalipto estudados. As equações desenvolvidas no artigo 2 podem ser utilizadas para realizar predições e projeções de curto, médio e longo prazo com maior precisão e segurança sobre o comportamento biológico comparadas as formulações tradicionais, sendo recomendadas para atualizar inventários e avaliar o potencial de crescimento de áreas sem registro prévio de plantios florestais baseado na combinação de fatores silviculturais e histórico climático.

**Palavras-chave: Manejo florestal intensivo. Fertilização na rotação intermediária. Histórico climático.**

## GENERAL ABSTRACT

Intensive management of eucalyptus plantations requires an understanding of the factors that impact tree growth and system productivity. The thesis was structured based on two articles and, for this, a set of data from *Eucalyptus grandis* implanted in 1999 in the states of Bahia and Espírito Santo was used. Three experiments were conducted, each one with twelve thinning treatments, which differ from each other in number, age and intensity. Each thinning treatment had four identical plots, two fertilized and two unfertilized in the mid-rotation. In the first article, a two-step modeling was developed: a logistic regression model as a function of the interaction of the thinning index and the relative spacing to determine the probability of volume gain with fertilization in the mid-rotation rotation; and a volume prediction model as a function of thinning intensity, site and uniformity, to quantify the additional gain in stand productivity at the end of the rotation with the applied fertilization treatment. The results showed that the proposed approach was accurate to model the volume responses to fertilization in mid-rotation in eucalyptus clonal plantations conducted for solid wood production. In the second article, the set of growth equations in dominant height based on the Lundqvist formulation had its asymptote expanded as a function of the thinning index, the fertilization indicator and the minimum temperature, allowing more accurate estimates when predicting and projecting the dominant height of the eucalyptus plantations studied. The equations developed in the second article can be used to make predictions and projections in the short, medium and long term with higher precision and security on the biological behavior compared to traditional formulations, being recommended to update inventories and evaluate the growth potential of areas without previous record of forest plantations based on a combination of silvicultural factors and climate history.

**Keywords: Intensive forest management. Mid-rotation fertilization. Climate history.**

## SUMÁRIO

	<b>PRIMEIRA PARTE .....</b>	<b>10</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Plantios de eucalipto .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Tratamentos silviculturais nos plantios de eucalipto.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Fertilização .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Desbaste.....</b>	<b>21</b>
<b>2.3</b>	<b>Modelos de crescimento e produção incluindo efeitos de práticas silviculturais</b>	<b>25</b>
<b>2.4</b>	<b>Efeitos do clima na produtividade de plantios de eucalipto.....</b>	<b>31</b>
<b>2.5</b>	<b>Modelos de crescimento e produção incluindo efeitos climáticos.....</b>	<b>33</b>
<b>3</b>	<b>CONSIDERAÇÕES GERAIS .....</b>	<b>36</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>37</b>
	<b>SEGUNDA PARTE – ARTIGOS .....</b>	<b>56</b>
	<b>ARTIGO 1: Uso da regressão logística e modelagem volumétrica para analisar as respostas à fertilização na rotação intermediária de plantios desbastados de <i>Eucalyptus grandis</i> no Brasil</b>	<b>57</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>59</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>61</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>69</b>
<b>4</b>	<b>DISCUSSÃO.....</b>	<b>77</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>81</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>83</b>
	<b>ARTIGO 2: Modelagem do crescimento em altura dominante com parâmetros expandidos por tratamentos silviculturais e variáveis climáticas para plantios clonais de eucalipto no Brasil.....</b>	<b>90</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>92</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>94</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>104</b>
<b>4</b>	<b>DISCUSSÃO.....</b>	<b>113</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>118</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>120</b>

**PRIMEIRA PARTE**

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil é referência mundial quando o assunto é produtividade de plantios florestais, com alto volume de produção anual de madeira por área e um curto ciclo. As árvores do gênero *Eucalyptus* são as mais plantadas no país, ocupando cerca de 7,5 milhões de hectares. Mais de 60% dos povoamentos de eucalipto concentram-se nos Estados de Minas Gerais, São Paulo e Mato Grosso do Sul (IBÁ, 2021). A expansão de áreas plantadas com espécies de eucalipto se devem principalmente as suas altas taxas de produtividade, as quais podem ser atribuídas ao sucesso em diferentes áreas da pesquisa florestal, que apoiaram a introdução de novas técnicas e produziram avanços no material genético, controle de pragas, doenças e ervas daninhas, preparação do solo e fertilização (GONÇALVES *et al.* 2017; MELO *et al.* 2016; PALLETT; SALE, 2004; STAPE *et al.* 2010).

Embora a maior parte da madeira produzida em plantios de eucalipto no mundo seja destinada a produção de celulose e energia (FAO, 2005), existe um grande potencial das espécies do gênero para a produção de produtos sólidos de madeira, com muitos exemplos comerciais de sucesso disponíveis. Especificamente no Brasil, o produto Lyptus® é uma madeira de eucalipto de alta qualidade seca em estufa para ser utilizada na fabricação de móveis e mesas de piso (TEIXEIRA *et al.* 2009). Dobner e Huss (2018) mencionam a existência potencial do Brasil para seguir o exemplo da Austrália, onde o eucalipto domina o mercado de produtos de madeira serrada, principalmente para revestimento de pisos, acessórios para a casa e para móveis.

Os plantios florestais conduzidos para a produzir madeira serrada demandam um manejo intensivo, incluindo intervenções silviculturais durante a rotação, como geralmente ocorre com os plantios de *Pinus* sp. nos Estados unidos, em que práticas como a fertilização e o desbaste já se tornaram regulares para aumentar a produtividade (ALBAUGH; ALLEN; FOX, 2007; TURNER; KNOTT; LAMBERT, 1996). Não há dúvida de que o desbaste leva a um aumento nas taxas de crescimento das árvores remanescentes, bem como a fertilização proporciona maior disponibilidade de nutrientes para o desenvolvimento arbóreo, no entanto, há poucas informações que possibilitam prever a duração e a magnitude dessas respostas, que podem variar com muitos fatores, incluindo local, espécie, idade e intensidade de desbaste, quantidade e tipo de fertilizante, tempo desde o tratamento e condições edafoclimáticas (FORRESTER *et al.* 2010; ALBAUGH *et al.*, 2004; GYAWALI; BURKHART, 2015; RAMÍREZ ALZATE *et al.*, 2016, ZAPATA *et al.*, 2020).

Os efeitos das condições edafoclimáticas na produtividade dos plantios de eucalipto já tem sido documentado em estudos no Brasil. Stape, Binkley e Ryan (2004) notaram um grande

impacto na produtividade de povoamentos de eucalipto causado pela variação da precipitação, que segundo os autores foi a variável mais correlacionada com o crescimento. De acordo com Spittlehouse (2003) a produtividade dos plantios clonais de eucalipto, assim como de outras espécies arbóreas, é limitada pela disponibilidade de água no solo, o que implica que a precipitação anual desempenha um papel fundamental para o desenvolvimento da floresta, bem como a evapotranspiração potencial e a capacidade de armazenamento de água no solo. O mais recente relatório do IBÁ (2021) mencionou que as mudanças climáticas podem ser um dos fatores que impactaram na queda de produtividade média por ano nos plantios de eucalipto entre o ano de 2019 ( $38,6 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ) e 2020 ( $36,8 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ).

Há escassez de estudos para plantios clonais de eucalipto no Brasil que consideram na modelagem do crescimento as respostas dos tratamentos silviculturais aplicados durante a rotação intermediária, bem como os efeitos de variáveis ambientais, em especial na identificação da variável mais adequada para aumentar a capacidade explicativa da modelagem (SHARMA *et al.*, 2015). O desenvolvimento de modelos de crescimento e produção que explicam de forma mais real possível o comportamento do crescimento das árvores diante da associação genótipo x ambiente x manejo podem auxiliar com maior precisão e segurança a tomada de decisão de gestores florestais quanto ao manejo adequado dos povoamentos, de forma a aumentar a produtividade e otimizar o orçamento, bem como ampliar as possibilidades de aplicação da modelagem comparado à abordagem tradicional.

Neste contexto, a tese partiu do pressuposto que a fertilização na rotação intermediária afeta positivamente as respostas de crescimento de povoamentos de eucalipto desbastados para a produção de madeira serrada, bem como alterações no histórico climático refletem na produtividade, e foi estruturada em duas partes. A primeira parte contém a introdução geral, a revisão de literatura e as considerações gerais. A segunda parte contém 2 artigos, os quais foram elaborados com dados de povoamentos de *Eucalyptus grandis* conduzidos até a idade de 15,5 anos, plantados na Bahia e no Espírito Santo, Brasil. No artigo 1, foi desenvolvida uma modelagem em duas etapas: um modelo de regressão logística em função de variáveis do povoamento para prever a probabilidade de ganho em volume com a fertilização na rotação intermediária; e um modelo de predição de volume para quantificar o ganho adicional na produtividade dos povoamentos no final da rotação com o tratamento de fertilização aplicado. No artigo 2 foi desenvolvido um conjunto de equações de crescimento em altura dominante, baseado na formulação de Lundqvist, com a assíntota expandida em função de variáveis representativas de desbaste, fertilização e clima, para predizer e projetar a altura dominante de plantios de eucalipto clonal no Brasil.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Plantios de eucalipto

O gênero *Eucalyptus* é um dos mais conhecidos da família Myrtaceae. A Austrália é a origem da maioria das espécies deste gênero, onde a paisagem local é dominada por aproximadamente 700 espécies (BROOKER, 2000; SMITH; HUGHES; WARDELL-JOHNSON, 2003; BENNETT, 2010). No entanto, outras regiões como Papua Nova Guiné, Filipinas e Timor também apresentam espécies endêmicas (ELDRIDGE *et al.*, 1993). Os eucaliptos são árvores perenes que atingem 50-70 m de altura em condições naturais, mas uma árvore chamada Centurion foi registrada na Tasmânia, Austrália, com aproximadamente 100 m de altura (TNG *et al.*, 2012).

Historicamente, as espécies de eucalipto desempenharam um papel importante no povo aborígene como remédio e fonte de alimento (VECCHIO; LOGANES; MINTO, 2016). No presente, sua madeira obtida em plantios florestais é a principal fonte de matéria-prima para diversos produtos. Algumas espécies de eucalipto se distinguem por seu crescimento muito rápido e sem tortuosidade (ELDRIDGE *et al.*, 1993; STAPE *et al.*, 2010). Além disso, as propriedades desejáveis da madeira e a grande flexibilidade a diferentes condições ambientais permitiram sua dispersão por mais de 90 países (BROOKER; KLEINIG, 2006; BENNETT, 2010). A área total de plantios de eucalipto já ultrapassou 22,57 milhões de hectares, se tornando a espécie de folhosa mais plantada no mundo (ZHANG; WANG, 2021).

Investimentos da indústria florestal em direção aos mercados de rápido crescimento tem sido observado no continente asiático (HETEMÄKI; HURMEKOSKI, 2016). A China e a Índia cobrem aproximadamente 8,5 milhões de hectares (CARLE; HOMGREN, 2008; MUGUNGA *et al.*, 2015; XIE *et al.*, 2017). Enquanto a área de plantio de eucalipto na Índia tem sido constante desde a década de 1990 (MUGUNGA *et al.*, 2015), a China apresentou um aumento significativo nos últimos anos, passando de 650.000 na década de 1990 para 4,5 milhões de hectares em 2015 (XIE *et al.*, 2017).

A expansão dos plantios de eucalipto na China é resultado de um consumo doméstico gigante e crescente de produtos de papel (TURNER *et al.*, 2006). No entanto, a produção doméstica nesse país não atende sua demanda, exigindo um grande volume de importação de celulose. Neste cenário, países da América do Sul, como Brasil e Uruguai, apresentam um papel importante na produção e exportação de celulose de eucalipto (QUEIROZ *et al.*, 2020). Entre 2009 e 2020, o Brasil aumentou 57,5% sua produção de celulose e 90,6% suas exportações (IBÁ, 2021). De fato, o país é o maior produtor mundial de eucalipto com 7,5 milhões de ha, e apresenta a maior taxa de produtividade do mundo (IBÁ, 2021; SANQUETTA *et al.*, 2018).

Assim, o correto entendimento dos processos que envolvam o cultivo do eucalipto é essencial, uma vez que a falta de matéria-prima pode impactar diretamente diversos setores industriais e trazer consequências para seus consumidores, principalmente em países emergentes. No Brasil, esforços recentes têm sido feitos para a adoção de práticas silviculturais e estratégias de melhoramento genético para clones mais adaptados (GONÇALVES *et al.*, 2013). Apesar de sua ampla adaptação ecológica, os plantios de eucalipto demandam condições climáticas específicas para seu pleno desenvolvimento (BINKLEY *et al.*, 2017; CAMPOE *et al.*, 2016), caso contrário, estresses físicos e biológicos, como falta de nutrientes, déficit hídrico (ELLI *et al.*, 2019) e temperaturas extremas (QUEIROZ *et al.*, 2020), acarretarão perdas de produtividade.

## **2.2 Tratamentos silviculturais nos plantios de eucalipto**

O manejo florestal baseia-se na produção contínua de recursos ao longo do tempo e visa o equilíbrio entre a produção de madeira e a manutenção das funções ecológicas dos ecossistemas florestais (WAKEEL *et al.*, 2005). Neste cenário, as práticas silviculturais, buscando atender aos objetivos do manejo, são aplicadas aos plantios florestais com o intuito de controlar o estabelecimento, o crescimento, a qualidade, a composição e a produtividade das áreas (SNOWDON, 2002). A fertilização e o desbaste são exemplos de tratamentos silviculturais comumente aplicados aos plantios florestais com essas finalidades (GYAWALI; BURKHART, 2015).

Entre os recursos naturais necessários para o crescimento das plantas, a disponibilidade de nutrientes é a mais facilmente manipulada pelos silvicultores por meio de práticas de preparação e conservação do solo e aplicações de fertilizantes (SILVA *et al.*, 2016). A fertilização florestal em plantios de eucalipto teve seus primeiros testes realizados na década de 1930 na Nova Zelândia, no entanto, esses registros foram perdidos (BALLARD, 1978). O primeiro teste documentado foi realizado em Madagascar em 1946, com *Eucalyptus robusta*, em que os transplantes eram criados em vasos 33% cheios de fertilizante orgânico (DOMMARGUES, 1953). Desde então, experimentos de fertilização foram conduzidos em muitas espécies de eucaliptos em diversos países, como na África, Austrália, América Latina, países do Mediterrâneo, Índia, Estados Unidos e França (SCHÖNAU; HERBERT, 1989).

No Brasil, a produtividade dos plantios de eucalipto era cerca de 12 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.ano na década de 1960 (CAMPINHOS JUNIOR, 1999). Com a introdução do manejo silvicultural intensivo, incluindo práticas de fertilização, bem como técnicas de melhoramento genético, as taxas de crescimento aumentaram drasticamente, com incremento médio anual (IMA) variando

de 20 a 60 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.ano (STAPE *et al.*, 2010). Nutto, Spathelf e Seling (2006) relataram que nos melhores sítios, utilizando clones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maide de alta produtividade e com manejo adequado, o IMA apresentou entre 60 e 80 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.ano aos 6 anos de idade, e alcançando, em alguns casos excepcionais, mais de 100 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.ano. Portanto, o manejo nutricional é uma prática fundamental para melhorar a produtividade da floresta quando há limitações de um ou mais nutrientes (STAPE *et al.*, 2006).

O desbaste, por sua vez, são cortes parciais no povoamento, realizados a partir do fechamento do dossel, ou em florestas imaturas no caso de manejo intensivo (FERRAZ FILHO, 2013; GYAWALI; BURKHART, 2015). Nos plantios de eucalipto os desbastes são aplicados em povoamentos destinados à produção de madeira serrada, madeira laminada ou postes de linhas de transmissão (SCHÖNAU; COETZEE, 1989). Nestes povoamentos são removidas as árvores pequenas ou defeituosas com a finalidade de melhorar a forma média do caule e acelerar o crescimento dos indivíduos remanescentes (WEST, 2014). Além disso, os desbastes também são utilizados para controlar pragas e doenças (WARING; O'HARA, 2005) e para reduzir o estresse hídrico do povoamento (WHITE *et al.*, 2009), uma vez que a remoção de folhas aumenta a disponibilidade de água no solo para as árvores residuais (RAMOS *et al.*, 2014). Quando o objetivo do manejo nos plantios de eucalipto é a produção máxima de madeira para celulose ou carvão, conduzidos em rotação curta, os desbastes não são aplicáveis (SCHÖNAU; COETZEE, 1989).

### 2.2.1 Fertilização

O gênero mais plantado nas regiões tropicais é o *Eucalyptus*, porém a sustentabilidade desses plantios é preocupante, já que, em geral, são estabelecidos em solos de baixa fertilidade e com a ocorrência de grandes exportações de nutrientes a cada rotação devido a remoção de biomassa (GONÇALVES *et al.*, 1997; CORBEELS *et al.*, 2005; LACLAU *et al.*, 2010). Além disso, os solos em que são instalados esses plantios normalmente apresentam acidez elevada e altos teores de alumínio (SILVEIRA; GAVA; MALAVOLTA, 2005). No Brasil o cenário não é diferente, pois embora não apresente limitações físicas no solo, a baixa fertilidade nutricional restringe o crescimento e a produtividade dos plantios de eucalipto (LEITE *et al.*, 2011).

Os distúrbios nutricionais foram registrados em quase todas as regiões geográficas no mundo onde plantios comerciais de eucalipto foram estabelecidos, principalmente pelo suprimento inadequado de macronutrientes (nitrogênio, fósforo e potássio), resultando em queda prematura das folhas e redução no volume de madeira (DELL *et al.*, 2002). Neste contexto, a fertilização se apresenta como uma prática de manejo importante para melhorar a

fertilidade do solo, sustentar a taxa de crescimento das árvores, aumentar a produtividade dos plantios e garantir a qualidade do solo nas rotações sucessivas (GONÇALVES *et al.*, 2008; PULITO *et al.*, 2015).

Nos plantios de eucalipto, considerando as densidades de estoque comumente utilizadas no Brasil, a maior parte da demanda nutricional ocorre durante os primeiros anos de crescimento do povoamento (GONÇALVES *et al.*, 2008). Portanto, levando em consideração a mobilidade dos nutrientes no solo e nas plantas, tanto no plantio como durante as fases de desenvolvimento do povoamento, é importante compreender a forma e o momento mais adequado da aplicação dos fertilizantes. Essa prática possibilita o melhor aproveitamento e eficiência no uso dos nutrientes pelas árvores, bem como reduz desperdícios de fertilizantes.

De acordo com Melo *et al.* (2016), os ganhos com a fertilização nos plantios de eucalipto variam de 5 a 90% na produção de madeira dependendo do nutriente e tipo de fertilizante, da idade do povoamento e das condições edafoclimáticas do local. Além disso, os ganhos em produtividade também estão associados a seleção de genótipos mais eficientes na absorção e utilização dos nutrientes (WADT *et al.*, 1999; ROSIM; HSING; PAULA, 2016). Rosim, Hsing e Paula (2016) verificaram que clones de eucalipto diferiram quanto à produção e alocação de biomassa e ao uso eficiente de nutrientes nos diversos compartimentos da parte aérea das árvores, e ressaltaram a importância da recomendação de genótipos que sejam eficientes no uso de nutrientes para locais com baixa fertilidade do solo, buscando otimizar a produtividade sem exigir grandes quantidades de fertilizantes.

Um dos nutrientes que mais limita a produção de eucalipto no Brasil é o potássio (K), sendo sua aplicação relevante para rotações sucessivas. As quantidades de K<sup>+</sup> geralmente são baixas nos solos tropicais altamente intemperizados, resultado da ausência de minerais primários com potássio e das perdas por drenagem devido à alta mobilidade desse íon (GAVA, 1997; ALMEIDA *et al.*, 2010). Os solos das regiões do bioma Cerrado, os quais apresentam baixa fertilidade e déficits hídricos acentuados, geralmente apresentam limitações na disponibilidade desse nutriente (GAVA *et al.*, 1997; OLIVEIRA NETO *et al.*, 2010; GAZOLA *et al.*, 2019), diferente dos argissolos e espodosolos da região Sul da Bahia, onde a deficiência de cálcio, nitrogênio (N) e fósforo (P) é mais frequente que a do K (SILVEIRA; GAVA; MALAVOLTA, 2005). Silveira, Gava e Malavolta (2005) monitorando as concentrações foliares de K em plantios de *Eucalyptus* em diferentes regiões do Brasil, constataram que o teor mais elevado foi encontrado na região Sul da Bahia, e levantaram as seguintes hipóteses: maior e melhor distribuição da precipitação durante o ano favorece uma maior absorção de K, e; a proximidade da região litorânea pode influenciar na adição de K pelos ventos marítimos.

O K é o segundo ou terceiro nutriente mais acumulado no eucalipto, principalmente nos troncos e no total das partes aéreas (LACLAU *et al.*, 2003; ANDRADE *et al.*, 2006; FARIA *et al.*, 2008). Portanto, quando a madeira é extraída do local, o K também é fortemente removido, resultando em alta demanda desse nutriente em ciclos posteriores da cultura. Essa demanda varia entre materiais genéticos, ou seja, clones ou híbridos com maior eficiência nutricional requerem quantidades menores de nutrientes para produzir a mesma quantidade de biomassa em relação aos menos eficientes (ROSIM; HSING; PAULA, 2016; GAZOLA *et al.*, 2019).

O P é outro nutriente que frequentemente apresenta baixa disponibilidade nos solos em que os plantios de eucalipto são estabelecidos (XU *et al.*, 2002; COSTA *et al.*, 2016). No Brasil, a deficiência e a alta capacidade de fixação do fósforo são características dos solos com alto grau de intemperismo (VILLANUEVA *et al.*, 2006; COSTA *et al.*, 2016; BASSACO *et al.*, 2018). Considerando que o fósforo frequentemente controla o incremento da biomassa e, portanto, o acúmulo de matéria orgânica do solo na maioria dos plantios de eucalipto, a deficiência desse nutriente provoca quedas na produtividade (XU *et al.*, 2002). O tronco geralmente apresenta a menor concentração de P, no entanto, Valadares *et al.* (2020) verificaram que a idade do povoamento influencia na redistribuição desse nutriente na planta, tal que, à medida que a floresta cresce e se desenvolve, a sua alocação nos troncos tende a aumentar, sendo afetada positivamente pela maior precipitação anual ou menor teor de argila, e negativamente pelos maiores espaçamentos.

Tais fatores também influenciam na eficiência do uso do P pelas árvores de eucalipto. Locais com maior percentual de argila, menor espaçamento e menor precipitação média anual apresentam maior eficiência no seu uso (VALADARES *et al.*, 2020). No Brasil, locais que apresentam solos com maior teor de argila são mais produtivos (GONÇALVES *et al.*, 2013), porém requerem alta fertilização com P (VALADARES *et al.*, 2020). Além disso, maior disponibilidade hídrica, associada a maior precipitação anual, favorece a mineralização de P e o transporte desse nutriente para as raízes das plantas (TINKER; NYE, 2000).

O N, por sua vez, tem sua disponibilidade no solo associada a quantidade de matéria orgânica do solo (BARRETO *et al.*; 2012). Em áreas recém-florestadas com o eucalipto, a mineralização de fontes orgânicas de N pode atender as demandas das árvores ao longo da rotação (BARRETO *et al.*; 2010, BARRETO *et al.*, 2012; GONÇALVES; MENDES; SASAKI, 2001; SILVA *et al.*; 2013). No entanto, por ser um dos nutrientes mais acumulados nas árvores de eucalipto, conseqüentemente é o mais exportado pela colheita da madeira (BARRETO *et al.*, 2012; GAZOLA *et al.*; 2018; MAQUERE *et al.*, 2008). Sua disponibilidade é muito baixa na maioria das áreas de plantios no Brasil, principalmente nos solos do Cerrado,

os quais apresentam baixo teor de matéria orgânica, refletindo em quedas na produtividade (HARIDASAN, 2008; SILVA; BATALHA, 2008; GAZOLA *et al.*, 2018). Na Tasmânia, Austrália, limitações no crescimento de árvores em plantios de eucalipto também foram associados a baixa disponibilidade de N no solo (SMETHURST *et al.*, 2004).

A eficiência no uso do N pelas plantas varia de acordo com diferentes fatores. Stape, Binkley e Ryan (2004) verificaram que locais mais úmidos apresentaram maior eficiência no uso de luz e N, e associaram essa resposta ao efeito conjunto de maiores taxas de assimilação e alocação de carbono acima do solo. Binkley *et al.* (2002) observaram que as árvores dominantes apresentaram maior eficiência no uso N, luz e água, comparada as árvores do estrato inferior em plantios de eucalipto próximo ao final da rotação.

A demanda do N nos plantios de eucalipto aumenta à medida que as árvores envelhecem. Na maioria dos locais essa demanda é sustentada após o fechamento da copa pela redistribuição de nutrientes (BARRETO *et al.*, 2012), no entanto, na rotação intermediária, principalmente quando se trata de plantios conduzidos em rotações longas, a disponibilidade de N no solo diminui devido à captação contínua pelo povoamento, a competição por recursos, o surgimento de plantas daninhas e a imobilização do solo da floresta (RAMÍREZ ALZATE *et al.*, 2016). Neste cenário, a adição de fertilizantes nessa fase do desenvolvimento do povoamento ganhou considerável atenção da indústria florestal, com o intuito de combinar a disponibilidade de nutrientes do solo com a demanda da planta e assim melhorar a produtividade do povoamento (FOX *et al.*, 2007).

Em uma variedade de sítios e condições de povoamento já foram relatadas respostas positivas a adição de N e P na rotação intermediária de plantios de *Pinus* nos Estados unidos (HYNYNEN; BURKHART; ALLEN, 1998; FOX *et al.*, 2007; ALBAUGH *et al.*, 2012; RAMÍREZ ALZATE *et al.*, 2016), com ganhos de crescimento em torno de  $3,5 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}$  durante os primeiros 6 a 8 anos após a fertilização (FOX *et al.*, 2007; ANTONY *et al.*, 2009). Para plantios de eucalipto conduzidos para produção de madeira serrada, embora essas respostas sejam pouco conhecidas no Brasil, Ferraz Filho *et al.* (2018) verificaram que a fertilização pós-desbaste na rotação intermediária permitiu uma vantagem de crescimento em comparação ao tratamento não fertilizado.

A aplicação de N em plantios de eucalipto tem apresentado efeitos contraditórios (GAZOLA *et al.*, 2015). Em algumas regiões tropicais e subtropicais, a primeira rotação dos plantios de eucalipto de rápido crescimento não respondeu ao fertilizante N, indicando que o solo foi capaz de suprir a demanda desse nutriente pelas plantas (GAMA-RODRIGUES *et al.*, 2005; PULITO *et al.*, 2015). Essa falta de resposta ocorre possivelmente devido a taxas

significativas de mineralização do N orgânico e à deposição atmosférica de N (MAYER *et al.*, 2000; GONÇALVES; MENDES; SASAKI, 2001; GONÇALVES *et al.*, 2004; GONÇALVES *et al.*, 2008; LACLAU *et al.*, 2010).

A matéria orgânica do solo, rica em nutrientes, principalmente em N (GONÇALVES; MENDES; SASAKI, 2001), é originada da decomposição da serapilheira pelos microrganismos do solo, os quais tem a sua atividade acelerada a partir da manutenção dos resíduos florestais no solo após a colheita e das condições climáticas favoráveis no Brasil (MELO *et al.*, 2016). Neste contexto, a aplicação de fertilizantes nitrogenados em plantios de eucalipto sofre uma redução nas suas respostas, principalmente após o fechamento do dossel, período em que ocorre a deposição da serapilheira e a intensificação do ciclo biogeoquímico (STAPE, 2002; GONÇALVES *et al.*, 2008). Além disso, dois anos após o plantio, o déficit hídrico se intensifica devido à competição intraespecífica, e, portanto, uma redução na disponibilidade de água também tende a influenciar negativamente as respostas à aplicação dos fertilizantes nitrogenados (BOUILLET *et al.*, 2013; MELO *et al.*, 2016).

No entanto, florestas manejadas intensivamente podem responder a aplicação de N após uma ou mais rotações (GONÇALVES *et al.*, 2004; MELO *et al.*, 2016), principalmente em locais com baixas concentrações de matéria orgânica e N no solo. Alguns estudos sugerem a existência potencial para resposta do eucalipto à aplicação de fertilizantes nitrogenados até mesmo em solos com maior teor de matéria orgânica (JESUS *et al.*, 2012). Além disso, tem se observado que a aplicação de P melhora a absorção de N, e, portanto, as respostas no crescimento são maiores quando os dois nutrientes são combinados (GRACIANO *et al.*, 2006). Em plantios clonais de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* no sul da China, Xu *et al.* (2002) verificaram que a aplicação de P aumentou significativamente o crescimento das árvores, a produção de biomassa e a absorção de N e K.

No Brasil tem se observado que os ganhos em produtividade em plantios de eucalipto com a adição de fertilizantes fosfatados ocorrem principalmente nos primeiros anos após a aplicação, apresentando uma redução à medida que o povoamento envelhece (MELO *et al.*, 2016; BASSACO *et al.*, 2018). Diferente disso, alguns autores têm verificado que a aplicação de K tende a apresentar respostas positivas com o avanço na idade do povoamento, uma vez que o nível crítico desse nutriente no solo aumenta ao longo do tempo (GONÇALVES *et al.*, 2008; MELO *et al.* 2016; GAZOLA *et al.*, 2019).

Os principais fatores que interferem na magnitude e na duração das respostas à fertilização intermediária são: doses aplicadas, tipos de fertilizantes, condições edafoclimáticas, material genético, tempo desde a aplicação. Ramírez Alzate *et al.* (2016) verificaram, em

povoamentos de *Pinus radiata* no Chile, que a fertilização na rotação intermediária melhorou as limitações nutricionais em locais com solos graníticos e arenosos, e que o tratamento com maior dosagem de N combinado com P apresentou melhores respostas à longo prazo. Esses autores observaram que o crescimento nos locais de argila vermelha não respondeu à aplicação de fertilizantes, uma vez que, aparentemente, apresentavam maior disponibilidade de nutrientes no solo. Portanto, a magnitude e a duração das respostas à fertilização intermediária são uma função de como os tratamentos silviculturais aplicados afetam a disponibilidade de recursos do local e a capacidade das plantas em adquiri-los, uma vez que mais de um recurso pode ser afetado com efeitos de curto a longo prazo (ALBAUGH *et al.*, 2004).

Snowdon and Waring (1981, 1984) abordam dois padrões básicos de respostas à longo prazo dos plantios aos tratamentos silviculturais: tipo 1 e tipo 2. As respostas do tipo 1 são mais comuns e são caracterizadas por um aumento inicial no crescimento que não é sustentado ao longo da rotação (NILSSON; ALLEN, 2003). Neste tipo de resposta, ocorre aceleração do crescimento das árvores, no entanto, após atingir um determinado estágio de maturidade ou desenvolvimento do povoamento, os locais tratados e não tratados seguem trajetórias de crescimento paralelas com uma constante separação no tempo. Portanto, plantios florestais que apresentam altos incrementos de produtividade nos primeiros anos após a fertilização, podem reduzir com o tempo, sendo que no momento da colheita, as respostas serão mínimas ou inexistentes, dependendo da duração da rotação. A aplicação de fertilizante no plantio em locais férteis, o controle de plantas daninhas e aplicação de fertilizante nitrogenado após desbaste ou poda são exemplos de práticas silviculturais que resultam em respostas do tipo 1 (SNOWDON, 2002).

Em contrapartida, as repostas do tipo 2 são sustentadas à longo prazo e podem ser consideradas uma alteração na qualidade do sítio. Quando se trata de fertilização, essas respostas geralmente ocorrem quando a capacidade do local de fornecer um nutriente limitante é aprimorada e a melhoria na capacidade do seu fornecimento é mantida à longo prazo. As repostas de crescimento do tipo 2 tendem a aumentar com o tempo, de modo que as curvas de produção para locais tratados e não tratados se tornem divergentes. A aplicação moderada de P em locais com deficiência desse nutriente, irrigações ou aplicações repetidas de fertilizante nitrogenado, são exemplos de práticas silviculturais que podem apresentar respostas do tipo 2 (SNOWDON, 2002).

### 2.2.2 Desbaste

Além dos programas de melhoramento genético, a adoção de regimes silviculturais adequados podem melhorar a qualidade da madeira. As principais intervenções silviculturais para o manejo de plantios destinados a produção de madeira para serraria são a fertilização, a poda e o desbaste, e isto é especialmente verdadeiro para os eucaliptos (DOBNER; HUSS, 2018; FORRESTER, 2013; NUTTO; SPATHELF; SELING, 2006). De acordo com Ferraz Filho (2013) a realização de desbastes tem o propósito de concentrar o potencial de produção da madeira do povoamento em um número limitado de árvores selecionadas, que ao atingirem grandes dimensões produzirão o máximo de rendimento.

As maneiras de se aplicar os desbastes variam em função da espécie, da estrutura do povoamento, da qualidade do plantio e do uso final da madeira. Tal diversificação permite a geração de diferentes regimes de desbastes, os quais se diferem em tipo, intensidade, frequência e época (FERRAZ FILHO, 2013; SCHÖNAU; COETZEE, 1989). O tipo de desbaste pode ser classificado como sistemático ou seletivo. Quando o objetivo é facilitar operacionalmente outros tratamentos silviculturais, como a entrada de máquinas a partir da retirada de linhas de plantio, pode-se aplicar um desbaste sistemático. No entanto, quando o propósito é selecionar as árvores que devem ser removidas por algum critério específico, aplica-se um desbaste seletivo (FERRAZ FILHO, 2013).

Os desbastes seletivos podem ser classificados quanto ao método de seleção da seguinte maneira: desbaste por baixo, em que árvores do estrato inferior são removidas para liberar futuras árvores na classe dominante; desbaste por cima, em que dominantes e codominantes com características indesejáveis são removidos para liberar dominantes adequadas para a colheita final; desbaste de seleção, em que todos os dominantes e possíveis codominantes são removidos para liberar árvores dominadas (SCHÖNAU; COETZEE, 1989).

O conceito de intensidade de desbaste está relacionado a quantidade de indivíduos, volume ou área basal retirada do povoamento, e pode ser leve, moderada ou severa. Em intensidades muito severas, o povoamento pode não conseguir utilizar todos os benefícios com a abertura do espaço criado e com isso reduzir a produção acumulada de madeira comercial (MÄKINEN; ISOMÄKI, 2004), além da possibilidade de apresentar problemas com ervas daninhas, madeira com tensão de crescimento ou danos causados pelo vento (MÄKINEN; ISOMÄKI, 2004; SMITH; BRENNAN, 2006). Já em desbastes de intensidades muito leves, a superestocagem dos povoamentos permite o estabelecimento da competição, e posterior mortalidade (ROLLINSON, 1988). Portanto, a definição da melhor intensidade de desbaste deve ser determinada para cada povoamento de acordo com o uso final da madeira, levando em

consideração aspectos econômicos e biológicos envolvidos na dinâmica de crescimento das florestas submetidas ao desbaste (DIAS, 2005). Ferraz Filho *et al.* (2018) verificaram que regime de desbaste mais intensivo em plantios clonais de eucalipto produz árvores de grande diâmetro em um curto período de tempo. No entanto, a produção total de área basal foi menor quando comparada aos demais regimes, concentrando o crescimento em algumas árvores selecionadas do povoamento.

Para a definição da época mais adequada para aplicação do desbaste deve ser considerado o início da competição intraespecífica. Cada árvore necessita de um espaço vital adequado para que possa utilizar de forma eficiente os recursos locais (água, luz e nutrientes), e à medida que crescem, esse espaço é reduzido e a competição estabelecida, o que resulta em estagnação do crescimento. Neste momento a densidade inicial não é mais recomendada e é necessário o início do desbaste para garantir um novo período de crescimento das árvores (SMITH, 1962). O ponto de inflexão das curvas de crescimento, onde o incremento médio anual e o incremento corrente anual se cruzam, pode ser utilizado como critério para intervenção na floresta (PRODAN, 1965). No entanto, há um consenso entre a maioria dos pesquisadores de que o desbaste deve ser realizado um pouco antes do momento de estagnação do crescimento (LEITE; NOGUEIRA; DIAS, 2004). Smith e Brennan (2006) recomendaram a sua aplicação o mais cedo possível com o intuito de maximizar o crescimento em diâmetro de árvores e aproveitar as rápidas taxas de crescimento iniciais. É o primeiro desbaste que determinará em grande parte quais tamanhos e qualidade de toras são possíveis em um determinado período de produção (EVANS; TURNBULL, 2004).

Dobner, Higa e Urbano (2012) estudaram a idade e intensidade ótimas para realização do primeiro desbaste em um povoamento de *Eucalyptus dunnii* no estado de Santa Catarina, Brasil. Os autores concluíram que o primeiro desbaste deve ser realizado quando a área basal atingir aproximadamente  $20 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ , sendo que nas condições estudadas ocorreu aos 3 anos de idade, e que a intensidade do desbaste deve ser planejada de forma a reduzir a área basal remanescente para 12 a  $14 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ . Medhurst, Beadle e Neilsen (2001) recomendaram uma densidade final na faixa de 200 a 300 árvores. $\text{ha}^{-1}$  para plantios de *Eucalyptus nitens*. Estes autores concluíram que essa densidade melhoraria o crescimento de árvores individuais durante um período de rotação de 20 a 25 anos sem utilizar intensamente os recursos do local.

A frequência em que o desbaste é realizado em plantios de eucalipto está associada ao uso final da madeira. O regime de desbaste caracterizado por um manejo intensivo, geralmente, aplica um desbaste em alta intensidade, e visa remover qualquer tensão de crescimento em árvores selecionadas para produzir toras de alto valor em um curto espaço de tempo (FERRAZ

FILHO *et al.* 2018; FERRAZ FILHO *et al.* 2015). Já os regimes de desbaste com duas ou mais operações caracterizam uma gestão de multiprodutos (FERRAZ FILHO *et al.* 2016), em que o crescimento das árvores da colheita final é um pouco reduzido, mas as operações de desbaste fornecem madeira de dimensões comerciais (FERRAZ FILHO *et al.* 2018). A aplicação de quatro desbastes em plantios de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden na África do Sul foram recomendados por Schönau e Coetzee (1989), que reduziram a densidade de 1333 para 250 árvores.ha<sup>-1</sup>. Já na Austrália, os regimes de desbaste em vários estágios foram considerados por muito tempo caros para serem implementados em escala industrial (MEDHURST; BEADLE; NEILSEN, 2001).

No que se refere as respostas ao desbaste, não há dúvidas de que essa prática proporciona um aumento nas taxas de crescimento das árvores remanescentes, como já relatado para muitas espécies. No entanto, há necessidade de mais informações que permitam prever a magnitude dessas respostas, que possivelmente variam em função de fatores como sítio, idade e espécie (FORRESTER *et al.*, 2010). A qualidade do sítio pode disponibilizar ou limitar os recursos para o crescimento das árvores. Pretzsch e Biber (2010) mencionam dois modos de competição entre as árvores, a de tamanho assimétrico que é determinada pela concorrência por luz, e a de tamanho simétrico que é governada pela disponibilidade de recursos abaixo do solo. De acordo com esses autores, a vantagem de ser grande o suficiente para proteger os vizinhos diminui à medida que os recursos subterrâneos se tornam relativamente mais limitantes ao crescimento e isso ocorre com a queda da qualidade do local.

Nos sítios mais pobres a competição por recursos abaixo do solo é relativamente maior do que por luz. Nestes casos, a vantagem das árvores dominantes será reduzida e possivelmente elas serão mais sensíveis ao desbaste quando comparadas as árvores dominantes de um sítio de qualidade superior, onde a competição por luz é mais importante e as árvores maiores já apresentam vantagem quanto a obtenção desse recurso (FORRESTER; BAKER, 2012). Locais de qualidade superior podem apresentar respostas absolutas maiores ao desbaste, já que apresentam taxas de crescimento mais rápidas, no entanto, as respostas relativas tendem a ser maiores nos sítios de qualidade inferior já que apresentam uma competição mais simétrica (FORRESTER; BAKER, 2012; PRETZSCH; BIBER, 2010).

A idade em que os plantios são desbastados também pode influenciar nas respostas ao desbaste. Geralmente, as respostas absolutas são maiores em desbastes aplicados antes do fechamento do dossel, em idades mais jovens. Forrester e Baker (2012) verificaram que *Eucalyptus globulus*, submetidos a desbaste em idades superiores (10 anos), apresentaram 9 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> a mais de volume 4,5 anos após o desbaste, quando comparado ao tratamento não

desbastado. No mesmo estudo, em outras regiões, verificaram 11-17 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> a mais de volume 4,5 anos após o desbaste precoce (2,7 - 3,5 anos).

Nas árvores dominantes remanescentes, as respostas relativas podem sofrer um declínio quando o desbaste é realizado em idades mais tardias (MEDHURST; BEADLE; NEILSEN, 2001). Este fato pode ser explicado pela intensificação da competição por luz e a diferenciação da população em classes de tamanho à medida que os povoamentos se desenvolvem. Como resultado, a competição tende a se tornar mais assimétrica em tamanho, de modo que árvores dominantes, que já obtêm uma quantidade de luz desproporcional, são menos responsivas do que quando eram mais jovens, não tão dominantes, e experimentando mais competição por luz em relação aos recursos do solo (SCHWINNING; WEINER 1998; FORRESTER; BAKER, 2012). Já as respostas absolutas do crescimento das árvores dominantes tendem a ser maiores comparadas as árvores dominadas, conforme verificado por Medhurst, Beadle e Neilsen (2001) em plantios de *Eucalyptus nitens* na Tasmania, e McKenzie e Hawke (1999) em plantios de *Eucalyptus regnans* aos 19 anos na Nova Zelândia.

As variáveis área basal e volume, geralmente, apresentam maiores respostas de crescimento ao desbaste em árvores dominantes e codominantes (FORRESTER; BAKER, 2007), sendo que o crescimento em altura apresenta respostas divergentes. Forrester *et al.* (2010) mencionam que, em geral, as árvores intermediárias são mais propensas a apresentar maior crescimento em altura, enquanto as dominantes não mostram mudanças ou reduções nas taxas de crescimento em altura. Ferraz Filho *et al.* (2018), em plantios de eucalipto clonal no Brasil, verificaram que o crescimento em altura média e altura dominante apresentou maiores valores para os tratamentos de desbaste precoce.

O tamanho do dossel é outra variável importante na determinação da produtividade da floresta e pode ser afetada pelos desbastes. Frequentemente, o tamanho do dossel é medido como índice de área foliar e tem uma contribuição relevante nos modelos de interceptação (LANDSBERG; HINGSTON, 1996). Além disso, a estrutura da copa das árvores individuais também desempenha um papel fundamental na produção dos povoamentos, por seu efeito na penetração da luz e no microclima da copa, incluindo temperatura, déficit de pressão de vapor e velocidade do vento (GARY, 1974). Os desbastes de alta intensidade podem alterar drasticamente o índice de área foliar, bem como a estrutura das copas das árvores, já que o dossel descontínuo afeta a radiação disponível para árvores individuais (MEDHURST; BEADLE, 2001). Medhurst e Beadle (2001) verificaram que o desbaste propiciou galhos maiores na copa inferior das árvores remanescentes e aumentou a área foliar no aspecto norte da copa em plantios de *Eucalyptus nitens*. Esses autores observaram que o índice de área foliar,

estimado a partir de medições de interceptação de luz, aumentou a uma taxa constante logo após o desbaste, independente do estoque residual.

### 2.3 Modelos de crescimento e produção incluindo efeitos de práticas silviculturais

Os modelos de crescimento e produção que permitem a entrada de variáveis de manejo são essenciais para a tomada de decisão sobre quais tratamentos silviculturais devem ser aplicados, em quais momentos e níveis (BURKHART; TOMÉ, 2012). No entanto, a maioria dos modelos existentes foram desenvolvidos a partir de dados limitados de áreas não tratadas e geneticamente não melhoradas e por isso tendem a subestimar o crescimento das áreas florestais manejadas intensivamente (GYAWALI; BURKHART, 2015). Além disso, os tratamentos silviculturais são frequentemente aplicados em conjunto, por exemplo, no momento do desbaste, também pode ser realizado a fertilização e o controle da vegetação. No entanto, não existem estudos que abranjam todas as combinações de tratamentos que possam ser de interesse, bem como não são viáveis. Portanto, a inclusão dos efeitos do tratamento silvicultural é um problema de modelagem que vai muito além do ajuste de equações aos dados (BURKHART; TOMÉ, 2012).

Bailey, Burgan e Jokela (1989) estão entre os primeiros modeladores a construir funções respostas para a fertilização. Estes autores desenvolveram três equações de projeção em nível de povoamento para altura dominante (1), sobrevivência (2) e área basal (3) em função da mudança de idade, grupo de solo e dosagem de fertilização para plantios de *Pinus elliottii* na rotação intermediária. As funções desenvolvidas são independentes e não há uma lógica sequencial para empregá-las, podendo ser utilizadas para locais tratados e não tratados.

$$hd_2 = f(hd_1, i_1, i_2, \text{grupo de solo, dosagem de fertilização}) \quad (1)$$

$$N_2 = f(N_1, i_1, i_2, \text{grupo do solo, dosagem de fertilização}) \quad (2)$$

$$G_2 = f(G_1, i_1, i_2, \text{grupo do solo, dosagem de fertilização}) \quad (3)$$

$hd_1$  e  $hd_2$ : altura dominante em ft ou m;  $i_1$  e  $i_2$ : idade do povoamento em anos;  $N_1$  e  $N_2$ : número de árvores/acre ou número de árvores/hectare;  $G_1$  e  $G_2$ : área basal em ft<sup>2</sup>/acre ou m<sup>2</sup>/hectare; subscritos 1 e 2 representam, respectivamente, o tempo 1 e 2.

Posteriormente, Pienaar e Rheney (1995) propuseram adicionar um termo a uma função de produção com o intuito de representar as respostas de tratamentos silviculturais (4), onde os parâmetros do componente adicional e do padrão foram estimados simultaneamente por meio de regressão não-linear.

$$R = a_1(yst) \exp^{-a_2 yst} \quad (4)$$

$R$ : resposta em ft (ou m), ft<sup>2</sup>/acre (ou m<sup>2</sup>/hectare) ou ft<sup>3</sup>/acre (m<sup>3</sup>/hectare);  $yst$ : anos desde o tratamento;  $a_i$ : parâmetros a serem estimados.

Pienaar e Rheney (1995) afirmaram que a resposta cumulativa máxima é obtida quando  $yst = \left(\frac{-1}{a_2}\right)$  e a magnitude da resposta cumulativa máxima é dada por  $\left(\frac{a_1}{a_2}\right) \exp^{-1}$ . Essa função foi descrita pela primeira vez na literatura florestal por Wenger (1984) como uma função especial de Hoerl, e foi incluída por Pienaar e Rheney (1995) dentro de um sistema recursivo de equações de predição ao nível de povoamento para as variáveis altura dominante (5), área basal (6) e volume (7).

$$hd = \beta_0(1 - \exp^{-\beta_1 i})^{\beta_2} + Rhd \quad (5)$$

$$G = \exp^{\beta_3 + \left(\frac{\beta_4}{i}\right)} hd^{\beta_5 + \left(\frac{\beta_6}{i}\right)} N^{\beta_7} + RG \quad (6)$$

$$V = \exp^{\left(\frac{\beta_8}{i}\right)} hd^{\beta_9} N^{\beta_{10} + \left(\frac{\beta_{11}}{i}\right)} G^{\beta_{12}} \quad (7)$$

$hd$ : altura dominante em ft ou m;  $i$ : idade do povoamento (em anos);  $G$ : área basal em ft<sup>2</sup>/acre ou m<sup>2</sup>/hectare;  $N$ : número de árvores/acre ou árvores/hectare;  $V$ : volume em ft<sup>3</sup>/acre ou m<sup>3</sup>/hectare;  $\beta_s$ : parâmetros a serem estimados.

Neste sistema, a altura dominante é estimada em função da idade e do termo resposta para altura dominante ( $Rhd$ ). A área basal por sua vez, é estimada em função da altura dominante e do termo resposta em área basal ( $RG$ ), o qual representa o ganho incremental na área basal sobre o seu aumento já explicado pela resposta em altura dominante ( $Rhd$ ). A equação de volume não necessitou da adição do termo resposta, uma vez que as variáveis predictoras já consideraram os efeitos do tratamento adicional. Os autores forneceram exemplos para demonstrar que esse termo é capaz de refletir a resposta dos tratamentos tanto a curto quanto a longo prazo no crescimento de florestas.

Quicke, Glover e Glover (1999) empregaram o termo proposto por Piennar e Rheney (1995) para modelar respostas de crescimento em plantios de *Pinus taeda* para o controle da vegetação herbácea em diferentes densidades de plantio e verificaram efeito positivo a curto prazo para o crescimento em altura e a longo prazo para o crescimento em área basal. Snowdon (2002) comparando com outros modelos, também testou a abordagem proposta por Piennar e Rheney (1995) para dados de *Pinus radiata* e verificou que seu melhor desempenho na forma de projeção.

No estudo de Amateis *et al.* (2000) uma abordagem diferente foi empregada para modelar o efeito da fertilização no desenvolvimento de altura dominante (8) e área basal (9) de *Pinus taeda* na idade intermediária. Ao invés de um sistema recursivo de equações, os autores construíram modelos respostas para povoamentos fertilizados usando apenas os termos  $Rhd$  e  $RG$  como variáveis dependentes, os quais foram definidos como a diferença entre os valores das variáveis altura dominante e área basal em povoamentos fertilizados e não fertilizados (controle) no tempo  $t$  após o tratamento. Os parâmetros  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  dos modelos foram definidos em função da quantidade de N e P, e de características particulares do povoamento e do sítio na fertilização.

$$hdF_t - hdC_t = \left( (1 - \exp(\beta_1 Ni)) \left( \frac{hd}{10} \right)^{\beta_2} \left( \frac{i}{10} \right)^{\beta_3} \left( \frac{s}{10} \right)^{\beta_4} \left( \frac{N}{10} \right)^{\beta_5} (D_1 \beta_6) \right) yst^{\gamma} \exp\{(\beta_7 + \beta_8 \log(1+Ph)) yst\} = Rhd \quad (8)$$

$$GF_t - GC_t = \left( (1 - \exp(\beta_1 Ni)) \left( \frac{hd}{10} \right)^{\beta_2} \left( \frac{N}{10} \right)^{\beta_3} \left( \frac{G}{10} \right)^{\beta_4} \right) yst^{\gamma} \exp\{(\beta_5 + (D_1 \beta_6 + D_2 \beta_7 + \beta_8) \log(1+Ph)) yst\} = RG \quad (9)$$

$hdF_t$  e  $hdC_t$ : altura dominante (ft) em locais fertilizados e não fertilizados, respectivamente, no tempo  $t$  (em anos) seguinte ao tratamento;  $GF_t$  e  $GC_t$ : área basal (ft<sup>2</sup>/ac) em locais fertilizados e não fertilizados, respectivamente, no tempo  $t$  seguinte ao tratamento;  $Ni$ : quantidade de Nitrogênio aplicado em lb/acre ou kg/hectare;  $s$ : índice de sítio em ft ou m (idade de referência de 25 anos);  $D_1$  e  $D_2$ : variáveis dummy relacionadas as classes de drenagem;  $Ph$ : quantidade de fósforo aplicado em lb/acre ou kg/hectare; as demais variáveis já foram descritas anteriormente.

Rojas (2005) também desenvolveu uma abordagem de modelagem para demonstrar os ganhos da fertilização N+P na rotação intermediária com dados de *Pinus taeda*. A partir de um procedimento de padronização dos valores das respostas, esse autor desenvolveu um modelo linear (10) em que as variáveis ecofisiológicas índice de área foliar, N foliar e eficiência de crescimento, bem como outras variáveis relacionadas as características do povoamento, crescimento  $\left( \left( \frac{\bar{D}_q^2}{A} \right)^2 \right)$  e tamanho  $(\bar{D}_q^2)$  da árvore, explicaram 66% na variação das respostas padronizadas.

$$SR = \beta_0 + \beta_1 \log(LAI) + \beta_2 GE + \beta_3 \left( \frac{\bar{D}_q^2}{A} \right)^2 + \beta_4 \bar{D}_q^2 + \beta_5 \log(N \text{ foliar}) \quad (10)$$

$SR$ : resposta padronizada;  $LAI$ : índice de área foliar;  $GE$ : eficiência de crescimento em ft<sup>3</sup>/acre/ano/unidade de área foliar;  $\bar{D}_q^2$ : diâmetro quadrático médio em polegadas; demais variáveis já foram descritas anteriormente.

McTague (2008) empregou a abordagem de efeitos mistos para modelar as respostas da fertilização na altura dominante (11) e na área basal (12) de povoamentos jovens de *Pinus taeda*. Esse autor menciona que no sistema de equações ao nível de povoamento descrito por Pienaar e Rheney (1995), o primeiro termo no lado direito da equação (5) descreve o crescimento da altura dominante média de um povoamento não tratado, e que, muito provavelmente, um ou a combinação de todos parâmetros estimados seria diferente caso houvesse observações suficientes disponíveis para modelar a altura dominante em parcela por parcela ou em povoamento por povoamento. Portanto, o autor encontra na abordagem de modelos mistos uma oportunidade de concentrar as predições da equação (5) por parcela ou povoamento.

$$\frac{i_{ijk}^2}{hd_{ijk}} = (\beta_0 + b_{0ij}) + (\beta_1 + b_{1i})i_{ijk} + (\beta_2 + b_{2i})i_{ijk}^2 + \beta_3 yst_{ijk} + \beta_4 yst_{ijk}^2 + e_{ijk} \quad (11)$$

$$G_{ijk} = e^{\{\beta_0 + b_{0ij}\} + \beta_1 / i_{ijk}} N_{ijk}^{\beta_2} hd_{ijk}^{\{\beta_3 + b_{3i}\} + \beta_4 / i_{ijk}} + \beta_5 (yst_{ijk}) e^{\beta_6 yst_{ijk}} + e_{ijk} \quad (12)$$

$b_{0ij}$ ,  $b_{1i}$ ,  $b_{2i}$  e  $b_{3i}$ : coeficientes aleatórios, tal que  $j$  representa a  $j$ -ésima parcela e  $i$  representa o  $i$ -ésimo povoamento;  $e_{ijk}$ : erro aleatório normalmente distribuído, tal que  $K$  representa a  $k$ -ésima idade; as demais variáveis já foram descritas anteriormente.

No sistema recursivo de equações proposto, McTague (2008) verificou que os maiores ganhos previstos na área basal de povoamentos fertilizados ocorrem devido ao aumento da altura dominante em vez do acréscimo marginal do termo:  $\beta_5 (yst_{ijk}) e^{\beta_6 yst_{ijk}}$ .

Gyawali e Burkhart (2015) também modelaram respostas a tratamentos silviculturais para *Pinus taeda* no sul dos Estados Unidos. Modelos de crescimento para povoamentos tratados foram desenvolvidos multiplicando modelos de crescimento clássicos com funções respostas que contabilizam os efeitos do desbaste, fertilização e controle da vegetação concorrente. Os modelos foram desenvolvidos para as variáveis área basal (13), altura dominante (14) e sobrevivência (15), e separadamente para cada tratamento silvicultural. A função resposta ao desbaste foi baseada nos parâmetros de duração e taxa, sendo sensível à idade do povoamento no momento do desbaste, tempo desde a aplicação do desbaste e intensidade do desbaste.

$$G_2 = G_1 \left( \frac{1 - \exp^{-ai_2}}{1 - \exp^{-ai_1}} \right)^{\frac{1}{b}} \times \left( \frac{1}{B_r} \right)^{\frac{r[-(i_2 - i_t)^2 + k(i_2 - i_t)]}{i_2^2}} \quad (13)$$

$$hd_2 = hd_1 \left( \frac{1 - \exp^{-ai_2}}{1 - \exp^{-ai_1}} \right)^{\frac{1}{b}} \times \left( \frac{1}{B_r} \right)^{\frac{r[-(i_2 - i_t)^2 + k(i_2 - i_t)]}{i_2^2}} \quad (14)$$

$$N_2 = \left[ N_1^{b_1} + b_2 B_r \left( \frac{s}{100} \right)^{b_3} (i_2^{b_4} - i_1^{b_4}) \right]^{\frac{1}{b_1}} \quad (15)$$

para  $i_2 - i_t \leq k$ , tal que:

$i_t$ : idade do povoamento no momento do desbaste (em anos);  $B_r$ : razão da área basal depois do desbaste pela área basal antes do desbaste;  $k$ : parâmetro que representa a duração do efeito do desbaste (em anos);  $r$ : parâmetro que representa a taxa;  $a$ ,  $b$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  e  $b_4$ : parâmetros dos modelos; as demais variáveis já foram descritas anteriormente.

Já as funções resposta à fertilização para área basal (16) e altura dominante (17) foram baseadas na distribuição Weibull, sendo que a magnitude das respostas varia com o tempo desde a aplicação dos fertilizantes, o tipo de fertilizante aplicado e a taxa de aplicação.

$$G_2 = G_1 \left( \frac{1 - \exp^{-\alpha i_2}}{1 - \exp^{-\alpha i_1}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \times \left( 1 + [(\delta_0 + \delta_1 P) Ni] \frac{1}{\beta} \exp^{-\left(\frac{y_{st}}{\beta}\right)} \right) \quad (16)$$

$$hd_2 = hd_1 \left( \frac{1 - \exp^{-\alpha i_2}}{1 - \exp^{-\alpha i_1}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \times \left( 1 + [(\delta_0 + \delta_1 P) Ni] \frac{\gamma}{\beta} \left(\frac{y_{st}}{\beta}\right)^{\gamma-1} \exp^{-\left(\frac{y_{st}}{\beta}\right)^\gamma} \right) \quad (17)$$

$P$ : variável binária igual a 1 se fertilizado com fósforo, caso contrário igual a 0;  $\delta_0$ ,  $\delta_1$ ,  $\gamma$  e  $\beta$  são parâmetros a serem estimados; as demais variáveis já foram descritas anteriormente.

Em um estudo recente, Scolforo *et al.* (2020) desenvolveram um modelo de resposta limitada (18) para avaliar o ganho relativo de resposta em volume à adição de fertilizante na rotação intermediária em povoamentos de *Pinus taeda*. De acordo com os autores, existem modelos de resposta de volume bem-sucedidos que permitem aos usuários quantificar o ganho na produtividade do povoamento devido a fertilização, no entanto, esses modelos dependem de relações empíricas que não são limitadas pela resposta biológica, o que significa que maiores adições de fertilizantes continuam a criar mais ganhos de volume, independentemente dos limites fisiológicos. Diante disso, os autores incluíram como parâmetros do modelo o índice de sítio e o espaçamento relativo com a finalidade de fornecer estimativas mais realistas.

$$rv_{xt} = \alpha_0^P s^{\alpha_1} (1 - \exp(-\alpha_2 Ni_x)) (1 - \exp(-(b_0 + b_1 RS)y_{st})) \quad (18)$$

$rv_{xt}$ : resposta relativa do volume;  $RS$ : espaçamento relativo =  $\frac{\sqrt{\frac{10000}{N}}}{H}$ ;  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $b_1$  e  $b_2$ : parâmetros a serem estimados;  $x$  representa o tratamento em questão;  $t$  representa os anos desde que o tratamento foi estabelecido; as demais variáveis já foram descritas anteriormente.

Scolforo *et al.* (2020) mencionam que a resposta de volume relativo é tipicamente maior em sítio de menor qualidade, e, portanto, a qualidade do sítio deve ser representada na equação. Além disso, o espaçamento relativo foi incluído por estar relacionado com o índice de área

foliar, variável diretamente relacionada ao nível de resposta. O índice de espaçamento relativo estima com precisão a proporção de copas, variável que convencionalmente é utilizada para fornecer uma medida de espaço de cultivo das árvores, bem como sua competição por luz, nutrientes e água, já que a proporção de copas e o índice de área foliar são medidas dificilmente disponíveis na maioria dos inventários florestais.

Zapata *et al.* (2020) desenvolveram um novo sistema de modelo dinâmico de crescimento para povoamentos de *Pinus taeda* respondendo a tratamentos de rotação intermediária. O sistema incluiu altura dominante (19), densidade (20) e área basal (21) do povoamento. O modelo de crescimento base para  $hd$  segue a equação diferencial de von Bertalanffy, e teve seus parâmetros modificados em função da localização da região fisiográfica e da intensidade de desbaste. Além disso,  $hd$  foi empregado como componente para os modelos de sobrevivência e área basal. A função de densidade de probabilidade Weibull foi usada como função modificadora acoplada no modelo de crescimento da área basal.

$$hd_2 = \left[ \frac{\alpha}{k} + \left[ hd_{th}^{(1-m)} - \frac{\alpha}{k} \right] \exp\{-k(1-m)(i - i_{th})\} \right]^{\frac{1}{1-m}} \quad (19)$$

Tal que:

$$\alpha = a_0 + a_1R + a_2IUC + a_3IPI$$

$$m = a_4 + a_5R + a_6IUC + a_7IPI$$

$\alpha, m, k, a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$ : parâmetros a serem estimados; R: intensidade de desbaste definida pela razão de árvores por hectare removidas no desbaste e árvores por hectare antes do desbaste; IUC e IPI: variáveis binárias para as regiões fisiográficas;  $H_{th}$  altura dominante determinada antes do desbaste quando  $A = A_{th}$ ;  $A_{th}$ : idade do desbaste em anos.

$$N_2 = \left[ N_1^{1-n_3} + \left( \frac{n_1}{1e+16} \right) \frac{n_3-1}{n_2+1} [hd_2^{n_2+1} - hd_1^{n_2+1}] \right]^{\frac{1}{(1-n_3)}} \quad (20)$$

Tal que:

$$n_3 = n_{30} + n_{31}R$$

$n_1, n_2, n_3, n_{30}, n_{31}$ : parâmetros a serem estimados.

$$G_2 = \left[ G_1^{(1-b_2)} \left( \frac{N_{th}}{N_2} \right)^{b_3(1-b_2)} + (b_{01} + b_{02}IUC + b_{03}IPI)(1 - b_2)N_2^{b_3(1-b_2)}(hd_2 - hd_{th}) + \frac{b_{04}}{i_{th}}(If + Ir + Ifr) \left( 1 - \exp \left\{ - \left( \frac{hd_2 - hd_{th}}{d} \right)^c \right\} \right) (1 - b_2)N_2^{b_3(1-b_2)} \right]^{\frac{1}{(1-b_2)}} \quad (21)$$

Tal que:

$$b_3 = b_{30} + b_{31}IT + b_{32}R$$

$$c = 1 + (c_1If + c_2Ir + c_3Ifr)$$

$$d = 1 + (d_1If + d_2Ir + d_3Ifr)$$

$b_2, b_3, b_{30}, b_{31}, b_{32}, c, c_1, c_2, c_3, d, d_1, d_2, d_3$ : parâmetros a serem estimados;  $N_{th}$ : número de árvores por hectare no momento do desbaste;  $If, Ir$  e  $Ifr$ : variáveis que indicam fertilização, controle de vegetação herbácea, e a combinação de ambos, respectivamente;  $IT$ : variável indicadora para a condição de desbaste, tal que assume valor 1 se o povoamento receber um segundo desbaste, e assume valor 0 se receber o primeiro desbaste.

Portanto, os modelos empíricos de crescimento e produção existentes foram adaptados para incluir indicadores de tratamento, tempo e parâmetros de intensidade para alcançar as predições ajustadas desejadas (ZAPATA *et al.*, 2020). As respostas de práticas silviculturais são incorporadas a modelos clássicos por meio da multiplicação ou adição de termo resposta ou ainda pelo desenvolvimento de novos modelos para incluir diretamente os efeitos dos tratamentos. As respostas de curto e longo prazo de características importantes do povoamento após práticas silviculturais na rotação intermediária, como a fertilização, desbastes e controle da vegetação, ou a combinação dessas, são de grande interesse de silvicultores e proprietários de terras (ZAPATA *et al.*, 2020), uma vez que possibilitam determinar melhores estratégias de manejo.

#### **2.4 Efeitos do clima na produtividade de plantios de eucalipto**

O crescimento das árvores é determinado pela composição genética da espécie em interação com as características do ambiente, as quais incluem os fatores climáticos, pedológicos, topográficos e a competição entre os indivíduos (LAMPRECHT, 1990). De acordo com Fritzens *et al.* (2012) o clima é um fator limitante e condicionante do plantio das espécies florestais, e ao definir áreas aptas ao cultivo é importante considerar as informações do ambiente físico (clima e solo) e as necessidades ambientais da espécie em questão. Neste sentido, a produção e a pesquisa florestal devem priorizar e considerar a influência direta que as condições climáticas exercem no crescimento das árvores e na produtividade do sistema. Além disso, é importante identificar as variáveis mais relevantes do ponto de vista biológico, possíveis de serem medidas, estimadas ou mapeadas no local (FRITZONS *et al.*, 2012).

Castro Neto (2015) menciona que na modelagem da produção florestal, como em modelos ecofisiológicos, as variáveis precipitação e temperatura do ar são as mais importantes. Benavides *et al.* (2007) destacam que a temperatura do ar é a variável que mais interfere nos

processos fisiológicos das plantas, especialmente na velocidade das reações químicas e na translocação de assimilados (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002). Mantovani e Fritzsons (2010) mencionam que a precipitação é fundamental na fase do plantio de mudas no campo e na germinação das sementes, quando a umidade do solo deve ser favorável. Segundo esses autores, considerando as fases iniciais de plantio, as espécies florestais são tão suscetíveis à falta e/ou excesso de água e à ocorrência de geadas quanto as culturas agrícolas.

A temperatura do ar e precipitação também foram as principais variáveis utilizadas no zoneamento bioclimático para identificar regiões climáticas semelhantes entre a origem das espécies de *Eucalyptus* na Austrália e no Brasil (GOLFARI; CASER; MOURA, 1978). Além disso, essas variáveis geralmente apresentam boa correlação com variáveis do povoamento. Ferraz Filho *et al.* (2011) verificaram que a variável precipitação foi a que melhor explicou a variância do incremento anual da altura dominante de povoamentos de eucalipto, seguida da radiação solar. Em plantios de *Eucalyptus grandis*, Scolforo *et al.* (2013) observaram que a temperatura média e a precipitação média mensal foram as variáveis mais bem correlacionadas com o incremento médio anual da altura dominante. Sette Junior *et al.* (2016) constataram que a taxa de crescimento do tronco ao nível do DAP de árvores de *Eucalyptus grandis* foi afetada pela sazonalidade, principalmente pela precipitação, temperatura média e umidade relativa do ar, com períodos de incremento máximo e mínimo.

Portanto, além de ser afetado por fatores genéticos e de manejo, o incremento médio anual das árvores de eucalipto é impactado pelas variáveis climáticas (BINKLEY *et al.*, 2017; ELLI *et al.*, 2017; ELLI *et al.*, 2019; GONÇALVES *et al.*, 2004; RYAN *et al.*, 2010; SCOLFORO *et al.*, 2017; SCOLFORO *et al.*, 2019; STAPE *et al.*, 2010), no entanto, o clima é o único fator que os silvicultores têm pouco ou nenhum controle (ELLI; SENTELHAS; BENDER, 2020), o que tem causado preocupações sobre os impactos que as mudanças climáticas podem ocasionar na produtividade do eucalipto (ALMEIDA *et al.*, 2009; BOOTH, 2013), especialmente quando se trata dos plantios conduzidos em rotações curtas, os quais são mais sensíveis as flutuações do clima e um período seco durante sua rotação pode diminuir drasticamente seu rendimento (ALMEIDA *et al.*, 2004).

O efeito das mudanças climáticas na produtividade do eucalipto e como um ano árido pode impactar dramaticamente seu rendimento final já foram discutidos por Almeida *et al.* (2004). Esses autores observaram que os efeitos da chuva podem variar dependendo da idade e do estágio de crescimento do povoamento em que ocorrem os períodos de seca. Em um cenário climático pessimista, com redução de 20% da precipitação e dos dias de chuva anuais, Scolforo *et al.* (2017) verificaram que o índice de sítio reduziu para os três clones estudados. Almeida *et*

*al.* (2009) avaliaram a variação espacial do incremento médio anual do *Eucalyptus* sob climas futuros em uma área próxima à costa atlântica do Brasil e observaram que a produtividade florestal pode aumentar em até 6 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.ano até 2030, e 10 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.ano até 2050, correspondendo a incrementos de 17% e 26% em relação ao período histórico. Pinkard *et al.* (2010) avaliaram o volume de tronco de eucalipto sob climas futuros para seis locais na Austrália e observaram mudanças médias de rendimento variando de -5,5% a +30,4% em 2030, dependendo da localização e do cenário climático.

As alterações ocorridas no clima impactam no rendimento e produção da biomassa dos plantios de eucalipto uma vez que estão altamente associadas aos processos fisiológicos da planta como fotossíntese, respiração, transpiração e desenvolvimentos fenológicos (JALOTA *et al.* 2018). Em plantas C3 como o eucalipto, a taxa fotossintética se eleva à medida que aumenta a concentração de CO<sub>2</sub>, o que pode ocasionar o fechamento estomático parcial e assim reduzir a condutância estomática e transpiração, resultando em maior eficiência no uso da água pelas plantas (AINSWORTH; LONG, 2004; AINSWORTH; ROGERS, 2007). Quando as temperaturas são mais altas, os estresses fisiológicos podem aumentar em plantios de eucalipto, principalmente em regiões tropicais, elevando o déficit de pressão de vapor, o que resulta em incrementos na evapotranspiração potencial e, conseqüentemente, no déficit hídrico (JALOTA *et al.*, 2018; PAN *et al.*, 2015). Stape, Binkley e Ryan (2004) observaram que a relação inversa do déficit de precipitação e pressão de vapor levou a uma maior eficiência no uso da água nos povoamentos mais produtivos.

## **2.5 Modelos de crescimento e produção incluindo efeitos climáticos**

A variabilidade climática é essencial para lidar com as atuais interações entre genótipo x ambiente x manejo, e nesse contexto, as avaliações de risco climático se tornam uma ferramenta muito importante para o planejamento florestal. Por exemplo, uma das principais causas da lacuna na produção de eucalipto no Brasil é o déficit hídrico (ELLI *et al.*, 2020). E apesar disso, esses plantios continuam a se expandir cada vez mais para ambientes tropicais menos adequados, onde o déficit hídrico é mais intenso e duradouro, e acompanhado por altas temperaturas (BINKLEY *et al.* 2017; ELLI *et al.* 2019, ELLI *et al.*, 2020). De acordo com Gonçalves *et al.* (2017) as anormalidades climáticas que estão pressionando os plantios de eucalipto nos últimos anos ocorrem devido a temperaturas médias anuais mais altas, ocorrências de chuva mais intensas, períodos de maior estresse hídrico e eventos climáticos mais frequentes e extremos.

Portanto, considerando a influência que o clima exerce na produtividade dos plantios de eucalipto, muitos autores tem incorporando variáveis ambientais ao modelar o crescimento e produção dos povoamentos. De acordo com Maestri *et al.* (2013) o modelo de altura dominante interfere em todo o procedimento de inferência posterior - modelo de mortalidade, de área basal e de volume. Portanto, a inclusão de variáveis ambientais somente é necessária dentro de sua formulação, mantendo o restante do sistema de prognose de produção inalterado, resguardando a concepção original da modelagem descritiva (sítio é a expressão da capacidade produtiva), porém dentro de um novo conceito: o de modelo híbrido.

Maestri (2003) propôs modificadores dos coeficientes do modelo de Chapman-Richards para inclusão das variáveis ambientais, tal que a adição acontece em dois momentos distintos: no modelo que estima o incremento anual em altura dominante e no modelo que estima o índice de sítio. O incremento em altura dominante está relacionado com o coeficiente que expressa a inclinação da curva de produção, já a capacidade produtiva do sítio está relacionada ao valor assintótico que a função pode atingir (TEMPS, 2005). Esses autores verificaram que a inclusão de variáveis ambientais no modelo de Chapman-Richards, tanto para estimar o incremento em altura dominante quanto o índice de sítio de plantios de eucalipto, permitiu estimativas mais precisas. Essas constatações também foram observadas por Temps (2005) para a modificação do parâmetro de inclinação, no entanto, verificaram que a modelagem do índice de sítio com a adição da variável climática não apresentou ganhos significativos, apesar de que aumentou a flexibilidade do ajuste.

Ferraz Filho *et al.* (2011) avaliaram a modificação do parâmetro de inclinação do modelo de Chapman-Richards em função da precipitação média mensal e da radiação solar para a projeção de altura dominante (22), e verificaram o ganho de 19,8% em relação ao modelo sem variáveis climáticas. Já Scolforo *et al.* (2013) expandiram o parâmetro assintótico do modelo de Chapman-Richards em função da temperatura média e da precipitação média mensal (23), e observaram um ganho de precisão de 33%.

$$hd_2 = a \left( \frac{hd_1}{a} \right)^{\frac{\ln(1 - \exp^{b((b_1 Pm) + (b_2 RS))})_{i_2}}{\ln(1 - \exp^{b((b_1 Pm) + (b_2 RS))})_{i_1}}} \quad (22)$$

$$hd = a(a_1 Tmed + a_2 Pm)(1 - \exp(bi))^c \quad (23)$$

*Pm*: precipitação média (mm.mês<sup>-1</sup>); *RS*: radiação solar diária (MJ.m<sup>-2</sup>); *Tmed*: temperatura média (°C); as demais variáveis já foram descritas anteriormente.

Scolforo *et al.* (2016) testaram 15 equações dinâmicas para modelar o crescimento em altura dominante, e após a seleção do melhor modelo, um de seus parâmetros foi ampliado com

a adição de variáveis climáticas. O modelo de Von Bertalanffy-Richards modificado polimórfico com única assíntota foi o melhor para os regimes de manejo estudados. Os melhores desempenho foram obtidos pelo condicionamento do parâmetro de inclinação pela precipitação média mensal para o regime de corte raso, e o parâmetro assíntota condicionado pela precipitação média mensal e sua distribuição ao longo do ano para o manejo de talhadia. Esses autores concluíram que a inclusão dos modificadores climáticos acrescentou flexibilidade aos modelos. Além disso, a expansão dos parâmetros não descaracterizou o comportamento do modelo estudado.

Os modelos com fator modificador do coeficiente de inclinação geralmente são aplicados na atualização de inventários florestais, desde que a coleta das variáveis ambientais também seja realizada no período de interesse. Em locais sem histórico de plantios, onde não existe qualquer embasamento biométrico para estimativa da produtividade potencial, os modelos com fator modificador do coeficiente assintótico são os mais recomendados e as variáveis ambientais devem ser baseadas na média histórica da área (MAESTRI *et al.*, 2013). Portanto, a aplicação de modelos de crescimento e produção com a inclusão de variáveis climáticas é uma importante ferramenta de gestão para os manejadores florestais, principalmente quando se considera a possibilidade de mudanças significativas no clima em escala global. O uso de variáveis climáticas permite que a modelagem possa refletir o efeito dessas alterações sobre o desenvolvimento da árvore (CASTRO NETO, 2015).

### 3. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O manejo dos plantios de eucalipto para a produção de madeira serrada demanda práticas silviculturais como o desbaste e a fertilização ao longo da rotação com a finalidade de melhorar o crescimento, a qualidade, a composição e a produtividade das áreas. As respostas à fertilização na rotação intermediária dependem de fatores como doses aplicadas, tipos de fertilizantes, condições edafoclimáticas, material genético e tempo desde a aplicação. No que se refere aos desbastes, o tipo, a frequência, a idade e a intensidade do desbaste, bem como suas interações com as condições de solo e clima são os principais fatores que interferem na magnitude e na duração das respostas.

Dois padrões básicos de respostas à longo prazo dos plantios florestais aos tratamentos silviculturais são relatados: tipo 1 e tipo 2. As respostas do tipo 1 são mais comuns e são caracterizadas por um aumento inicial no crescimento que não é sustentado ao longo da rotação. Já as respostas do tipo 2 são sustentadas à longo prazo e podem ser consideradas uma alteração na qualidade do sítio.

Os efeitos de tratamentos silviculturais na rotação intermediária podem ser incorporados diretamente em modelos de crescimento e produção florestal por meio de termos multiplicativos ou aditivos. Para modelar as respostas ao desbaste e a fertilização na rotação de intermediária de plantios de *Pinus* sp. existem muitos modelos disponíveis na literatura. Em contrapartida, a modelagem dessas respostas para os plantios de eucalipto ainda é incipiente.

Além disso, os plantios de eucalipto também são altamente sensíveis as mudanças climáticas, sendo esse o único fator que os silvicultores têm pouco ou nenhum controle. Portanto, diante das incertezas sobre os impactos que podem ser ocasionados na produtividade do eucalipto pelas alterações climáticas, e considerando que as avaliações de risco climático são uma ferramenta muito importante para o planejamento florestal, também é fundamental incluir diretamente os efeitos do clima em modelos de crescimento e produção.

## REFERÊNCIAS

AINSWORTH, E. A.; LONG, S. P. What have we learned from 15 years of free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO<sub>2</sub>. **New Phytologist**, Tartu, v. 165, n. 2, p. 351-372, 2004. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2004.01224.x.

AINSWORTH, E. A.; ROGERS, A. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO<sub>2</sub>]: mechanisms and environmental interactions. **Plant Cell Environment**, Oxford, v. 30, p. 258-270, 2007. DOI: 10.1111/j.1365-3040.2007.01641.x.

ALBAUGH, T. J.; ALLEN, H. L.; FOX, T. R. Historical Patterns of Forest Fertilization in the Southeastern United States from 1969 to 2004. **Southern Journal of Applied Forestry**, Washington, v. 31, n. 3, p. 129-137, 2007. DOI: 10.1093/sjaf/31.3.129.

ALBAUGH, T. J. *et al.* Midrotation vegetation control and fertilization response in *Pinus taeda* and *Pinus elliottii* across the southeastern United States. **Southern Journal of Applied Forestry**, Washington, v. 36, n. 1, p. 44-53, 2012. DOI: 10.5849/sjaf.10-042.

ALBAUGH, T. J. *et al.* Radiata pine response to tillage, fertilization, and weed control in Chile. **Bosque**, Valdivia, v. 25, n. 2, p. 5-15, 2004. DOI:10.4067/S0717-92002004000200002.

ALMEIDA, A. C. *et al.* Needs and opportunities for using a process-based productivity model as a practical tool in *Eucalyptus* plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 167-177, 2004. DOI: 10.1016/j.foreco.2004.01.044.

ALMEIDA, A. C. *et al.* Use of a spatial process-based model to quantify forest plantation productivity and water use efficiency under climate change scenarios. *In: WORLD IMACS / MODSIM CONGRESS*, 18, 2009, Cairns. **Anais...** Australia, 2009. p. 1816-1822.

ALMEIDA, J. C. R. *et al.* A positive growth response to NaCl applications in *Eucalyptus* plantations established on K-deficient soils. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1786-1795, 2010. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.08.032.

AMATEIS, R. L. *et al.* Modeling response to midrotation nitrogen and phosphorus fertilization in loblolly pine plantations. **Southern Journal of Applied Forestry**, Washington, v. 24, n. 4, p. 207-212, 2000. DOI: 10.1093/sjaf/24.4.207.

ANDRADE, G. C. *et al.* Acúmulo de nutrientes na biomassa e na serapilheira de *Eucalyptus grandis* em função da aplicação de lixo urbano e de nutrientes minerais. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 53, p. 109-136, 2006.

ANTONY, F. *et al.* Effect of midrotation fertilization on growth and specific gravity of loblolly pine. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 39, n. 5, p. 928-935, 2009. DOI: 10.1139/X09-021.

BAILEY, R. L.; BURGAN, T. M. ; JOKELA, E. J. Fertilized midrotation-aged slash pine plantations - stand structure and yield prediction models. **Southern Journal of Applied Forestry**, Washington, v. 13, n. 2, p. 76-80, 1989. DOI:10.1093/sjaf/13.2.76.

BALLARD, R. Use of fertilisers at establishment of exotic forest plantations in New Zealand. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Rotorua, v. 8, n. 1, p. 70-104, 1978.

BARRETO, P. A. B. *et al.* Mineralização de nitrogênio e carbono em solos sob plantações de eucalipto, em uma sequência de idades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 735-745, 2010. DOI:10.1590/S0100-06832010000300015.

BARRETO, P. A. B. *et al.* Nitrogen balance in soil under *Eucalyptus* plantations. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 4, p. 1239-1248, 2012. DOI: 10.1590/S0100-06832012000400018.

BASSACO, M. V. M. *et al.* Nitrogen, phosphorus, and potassium requirements for *Eucalyptus urograndis* plantations in southern Brazil. **New Forests**, v. 49, n. 2, p. 681-697, 2018. DOI: 10.1007/s11056-018-9658-0.

BENAVIDES, R. *et al.* Geostatistical modelling of air temperature in a mountainous region of Northern Spain. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 146, n. 3-4, p. 173-188, 2007. DOI: 10.1016/j.agrformet.2007.05.014.

BENNETT, B. M. The El Dorado of forestry: The *Eucalyptus* in India, South Africa, and Thailand, 1850-2000. **International Instituut voor Sociale Geschiedenis**, Amsterdam, v. 55 (S18), p. 27-50, 2010. DOI: 10.1017/S0020859010000489.

BINKLEY, D. *et al.* Age-related decline in forest ecosystem growth: an individual-tree, stand-structure hypothesis. **Ecosystems**, New York, v. 5, p. 58-67, 2002. DOI: 10.1007/s10021-001-0055-7.

BINKLEY, D. *et al.* The interactions of climate, spacing and genetics on clonal *Eucalyptus* plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 405, 271-283, 2017. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.09.050.

BOOTH, T. H. Eucalypt plantations and climate change. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 28-34, 2013. DOI: 10.1016/J.FORECO.2012.04.004.

BOUILLET, J. P. *et al.* *Eucalyptus* and *Acacia* tree growth over entire rotation in single- and mixed-species plantations across five sites in Brazil and Congo. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 89-101, 2013. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.09.019.

BROOKER, M. I. H. A new classification of the genus *Eucalyptus* L'Her. (Myrtaceae). **Australian Systematic Botany**, Melbourne, v. 13, n. 1, p. 79-148, 2000. DOI: 10.1071/sb98008.

BROOKER, M. I. H.; KLEINIG, D. A. **Field Guide to Eucalyptus**. 3. ed. Melbourne: Blooming Books, 2006. 356 p.

BURKHART, H. E.; TOME, M. **Modeling forest trees and stands**. 2 ed. New York: Springer, 2012. 458 p.

CAMPINHOS JUNIOR, E. Sustainable plantations of high-yield *Eucalyptus* trees for production of fiber: the Aracruz case. **New Forests**, v. 17, p. 129-143, 1999. DOI: 10.1023/A:1006562225915.

CAMPOE, O. C. *et al.* Meteorological seasonality affecting individual tree growth in forest plantations in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 380, p. 149-160, 2016. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.08.048.

CARLE, J.; HOMGREN, P. Wood from planted forests: a global outlook 2005-2030. **Forest Products Journal**, Madison, v. 58, n. 12, p. 6-18, 2008.

CASTRO NETO, F. **Uso de variáveis climáticas para classificação de sítios em povoamentos de eucalipto**. 136 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

CORBEELS, M. *et al.* Long-term changes in productivity of eucalypt plantations under different harvest residue and nitrogen management practices: a modelling analysis. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 217, n. 1, p. 1-18, 2005. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.05.057.

COSTA, M. G. *et al.* Labile and non-labile fractions of phosphorus and its transformations in soil under *Eucalyptus* plantations, Brazil. **Forests**, Basileia, v. 7, n. 1, p. 1-15, 2016. DOI: 10.3390/f7010015.

DELL, B. *et al.* **Nutrient disorders in plantation eucalypts**. 2 ed. Canberra: ACIAR Monograph n° 74, 2002. 188 p.

DIAS, A. N. **Um modelo para gerenciamento de plantações de eucalipto submetidas a desbaste**. 147 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

DOBNER, M.; HIGA, A. R.; URBANO, E. Determinação da idade e intensidade ótimas para realização do primeiro desbaste em um povoamento de *Eucalyptus dunnii*. **Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 3, p. 485-494, 2012. DOI: 10.5380/rf.v42i3.21028.

DOBNER, M.; HUSS, J. Crown thinning on *Eucalyptus dunnii* stands for saw- and veneer logs in southern Brazil. **New Forests**, v. 50, n. 3, p. 1-15, 2018. DOI:10.1007/s11056-018-9661-5.

DOMMERGUES, Y. Influence de la fumure des plants d'*Eucalyptus robusta* sur la croissance de cette essence et sur l'activité biologique du sol: interprétation de l'analyse bactériologique des sols. **Memoires de l'Institut Scientifique de Madagascar** (Série D), v. 5, p. 315-325, 1953.

ELDRIDGE, K. *et al.* **Eucalypt domestication and breeding**. Claredon Press Oxford, 1993. 312 p.

ELLI, E. F. *et al.* Assessing the growth gaps of *Eucalyptus* plantations in Brazil – magnitudes, causes and possible mitigation strategies. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 451, 117464, 2019. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.117464.

ELLI, E. F. *et al.* Climatic factors defining the height growth curve of forest species. **iForest - Biogeosciences and Forestry**, Viterbo, v. 10, n. 3, p. 547-553, 2017. DOI: DOI:10.3832/ifor2189-010.

ELLI, E. F. *et al.* Gauging the effects of climate variability on *Eucalyptus* plantations productivity across Brazil: A process-based modelling approach. **Ecological Indicators**, v. 114, 106325, 2020. DOI:10.1016/j.ecolind.2020.106325.

ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; BENDER, F. D. Impacts and uncertainties of climate change projections on *Eucalyptus* plantations productivity across Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 474, 118365, 2020. DOI:10.1016/j.foreco.2009.08.029.

EVANS, J.; TURNBULL, J. W. **Plantation forestry in the tropics: the role, silviculture, and use of planted forests for industrial, social, environmental, and agroforestry purposes**. 3 ed. Oxford University Press, Oxford, 2004. 480 p.

FAO. Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura. **The Potential for fast-growing commercial forest plantations to supply high value roundwood**. *Planted Forests and Trees Working Paper* FP/33(February): 49. <http://www.fao.org/forestry>.

FARIA, G. E. *et al.* Evaluation of the productivity, content and nutrient use efficiency in

genotypes of *Eucalyptus* spp. in Jequitinhonha valley, MG. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 3, p. 363-373, 2008. DOI: 10.5902/19805098448.

FERRAZ FILHO, A. C. *et al.* Dominant height projection model with the addition of environmental variables. **Cerne**, Lavras, n. 17, v. 3, p. 427-433, 2011. DOI: 10.1590/S0104-77602011000300018.

FERRAZ FILHO, A. C. *et al.* Modeling growth and yield of loblolly pine stands under intensive management. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 8, p. 707-717, 2015. DOI: 10.1590/S0100-204X2015000800009.

FERRAZ FILHO, A. C. *et al.* Pruning effect in *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* clone growth. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 111, p. 729-738, 2016. DOI: 10.18671/scifor.v44n111.19.

FERRAZ FILHO, A. C. *et al.* Thinning regimes and initial spacing for *Eucalyptus* plantations in Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciência**, Rio de Janeiro, v. 90, n. 1, p. 255-265, 2018. DOI: 10.1590/0001-3765201720150453.

FERRAZ FILHO, A. C. **Management of *Eucalyptus* plantations for solid wood production.** 127 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

FORRESTER, D. I.; BAKER, T. G. Growth responses to thinning and pruning in *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus nitens*, and *Eucalyptus grandis* plantations in southeastern Australia. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 42, n. 1, p. 75-87, 2012. DOI: 10.1139/x11-146.

FORRESTER, D. I.; BAKER, T. G. Growth response to thinning in a productive *Eucalyptus globulus* plantation in Victoria, Australia. *In: International Conference on Plantation Eucalyptus*, 2007. **Anais...** Science Press, 2007. p. 30-37.

FORRESTER, D. I. *et al.* Growth and physiological responses to silviculture for producing solid-wood products from *Eucalyptus* plantations: an australian perspective. **Forest Ecology**

**and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1819-1835, 2010. DOI:10.1016/j.foreco.2009.08.029.

FORRESTER, D. I. Growth responses to thinning, pruning and fertiliser application in *Eucalyptus* plantations: a review of their production ecology and interactions. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 310, p. 336-347, 2013. DOI:10.1016/j.foreco.2013.08.047.

FOX, T. R. *et al.* Tree nutrition and forest fertilization of pine plantations in the southern United States. **Southern Journal of Applied Forestry**, Washington, v. 31, n. 1, p. 5-11, 2007. DOI: 10.1093/sjaf/31.1.5.

FRITZONS, E., AGUIAR, A., GRABIAS, J., FREITAS, M., WREGE, M., MANTOVANI, L. Zoneamento climático para plantio experimental de *Pinus maximinoi* no Estado de São Paulo. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 69, p. 79-92, 2012. DOI: 10.4336/2012.pfb.32.69.79.

GAMA-RODRIGUES, E. F. *et al.* Carbon, nitrogen and activity of microbial biomass in soil under eucalypt plantations. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 893–901, 2005. DOI: 10.1590/S0100-06832005000600007.

GARY, H. L. Canopy weight distribution affects windspeed and temperature in a lodgepole pine forest. **Forest Science**, Lawrence, v. 20, n. 4, p. 369-371, 1974.

GAVA, J. L. Efeito da adubação potássica em plantios de *E. grandis* conduzidos em segunda rotação em solos com diferentes teores de potássio trocável. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 11, n. 30, p. 89-94, 1997.

GAVA, J. L. *et al.* Eficiência relativa de fertilizantes fosfatados no crescimento inicial de eucalipto cultivado em solos do cerrado. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 3, p. 497-504, 1997.

GAZOLA, R. N. *et al.* Acúmulo de nutrientes na cultura do eucalipto em função da adubação nitrogenada. In: ENCONTRO PAULISTA DE CIÊNCIA DO SOLO, 3, 2018, Ilha Solteira. **Resumos [...]**. São Paulo, 2018. p. 1-3.

GAZOLA, R. N. *et al.* Doses de N, P e K na cultura do eucalipto em solo originalmente sob cerrado. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 36, n. 36, p. 1895-1912, 2015.

GAZOLA, R. N. *et al.* Potassium fertilization of *Eucalyptus* in an entisol in low-elevation cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 43, p. 1-17, 2019. DOI: 10.1590/18069657rbc20180085.

GOLFARI, L.; CASER, R. L.; MOURA, V. P. G. Zoneamento ecológico esquemático para reflorestamento no Brasil: segunda aproximação. **Série técnica PRODEPEF**, Belo Horizonte, n. 11, p. 1 - 66, 1978.

GONÇALVES, J. L. M. *et al.* Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the brazilian experience. **Southern Forests**, Oxford, v. 70, n. 2, p. 105-118, 2008. DOI: 10.2989/south.for.2008.70.2.6.534.

GONÇALVES, J. L. M. *et al.* Eucalypt plantation management in regions with water stress. **Southern Forests**, Oxford, v. 79, n. 3, p. 169-183, 2017. DOI: 10.2989/20702620.2016.1255415.

GONÇALVES, J. L. M. *et al.* Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 6-27, 2013. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.12.030.

GONÇALVES, J. L. M. *et al.* Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, n. 1-2, p. 45-61, 2004. DOI:10.1016/j.foreco.2004.01.022.

GONÇALVES, J. L. M. *et al.* **Soil and stand management for short-rotation plantations.** In: NAMBIAR, E. K. S.; BROWN, A. G. (eds) Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests. Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra, p 379-418, 1997.

GONÇALVES, J. L. M.; MENDES, K. C. F. S.; SASAKI, C. M. Mineralização de nitrogênio

em ecossistemas florestais naturais e implantados do estado de São Paulo. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 601-616, 2001. DOI: 10.1590/S0100-06832001000300009.

GRACIANO, C. *et al.* Fertilization with phosphorus increases soil nitrogen absorption in young plants of *Eucalyptus grandis*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 236, n. 2, p. 202-210, 2006. DOI:10.1016/j.foreco.2006.09.005.

GYAWALI, N.; BURKHART, H. General response functions to silvicultural treatments in loblolly pine plantations. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 45, p. 252-265, 2015. DOI: 10.1139/cjfr-2014-0172.

HARIDASAN, M. Nutritional adaptations of native plants of the cerrado biome in acid soils. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campos dos Goytacazes, v. 20, n. 3, p. 183-195, 2008. DOI: 10.1590/S1677-04202008000300003.

HETEMÄKI, L.; HURMEKOSKI, E. Forest products markets under change: review and research implications. **Current Forestry Reports**, v. 2, p. 177-188, 2016. DOI: 10.1007/s40725-016-0042-z.

HYYNEN, J.; BURKHART, H. E.; ALLEN, H. L. 1998. Modeling tree growth in fertilized midrotation loblolly pine plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 107, n. 1-3, p. 213-229, 1998. DOI: 10.1016/S0378-1127(97)00334-4.

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório anual IBÁ 2021**, 2021.

JALOTA, S. K. *et al.* **Understanding climate change impact on crop productivity and field water balance**. In: Understanding climate change impacts on crop productivity and water balance. 1. ed. Academic Press, p. 87-148, 2018. DOI:10.1016/B978-0-12-809520-1.00003-3.

JESUS, G. L. *et al.* Doses e fontes de nitrogênio na produtividade do eucalipto e nas frações da matéria orgânica em solo da região do cerrado de Minas Gerais. **Revista brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 1, p. 201-214, 2012. DOI: 10.1590/S0100-06832012000100021.

LACLAU, J. P. *et al.* Biogeochemical cycles of nutrients in tropical *Eucalyptus* plantations: main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, 1771-1785, 2010. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.06.010.

LACLAU, J. P. *et al.* Nutrient dynamics throughout the rotation of *Eucalyptus* clonal stands in Congo. **Annals of Botany**, Oxford, v. 91, n. 7, p. 879-892, 2003. DOI:10.1093/aob/mcg093.

LAMPRECHT, H. **Silvicultura nos trópicos: ecossistemas florestais e respectivas espécies-possibilidades e métodos de aproveitamento sustentado**. Eschborn: GTZ, 1990. 343 p.

LANDSBERG, J. J.; HINGSTON, F. J. Evaluating a simple radiation/dry matter conversion model using data from *Eucalyptus globulus* plantations in western Australia. **Tree Physiology**, Oxford, v. 16, n. 10, p. 801-808, 1996. DOI: 10.1093/treephys/16.10.801.

LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; DIAS, A. N. Desbastes e seus efeitos sobre a produção e a qualidade de povoamentos florestais. *In: Seminário sobre Silvicultura em florestas plantadas*, 1, 2004, Vitória. **Anais...** Viçosa: SIF - UFV, 2004. p. 165-195.

LEITE, F. P. *et al.* Nutrient relations during an *eucalyptus* cycle at different population densities. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 949-959, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000300029.

MAESTRI, R. **Modelo de crescimento e produção para povoamentos clonais de *Eucalyptus grandis* considerando variáveis ambientais**. 143 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

MAESTRI, R. *et al.* Modelagem do crescimento florestal considerando variáveis do ambiente: revisão. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 14, n. 3, p. 103-110, 2013. DOI: 10.5380/rsa.v14i3.40908.

MÄKINEN, H.; ISOMÄKI, A. Thinning intensity and growth of scots pine stands in Finland. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 201, n. 2-3, p. 311-325, 2004. DOI: 10.1016/j.foreco.2004.07.016.

MANTOVANI, L.; FRITZSONS, E. **Uso e meteorológicas e climáticas no setor agroflorestal e ambiental**. Colombo: Embrapa Florestas, 2010. 31 p.

MAQUERE, V. *et al.* Influence of land use (savanna, pasture, *Eucalyptus* plantations) on soil carbon and nitrogen stocks in Brazil. **European Journal of Soil Science**, Malden, v. 59, n. 5, p. 863-877, 2008. DOI:10.1111/j.1365-2389.2008.01059.x.

MAYER, R. *et al.* Atmospheric pollution in a tropical rain forest: effects of deposition upon biosphere and hydrosphere i. concentrations of chemicals. **Water, Air, and Soil Pollution**, Guelph, v. 121, n. 1, p. 59-78, 2000. DOI:10.1023/A:1005249615589.

MCKENZIE, H.; HAWKE, A. Growth response of *Eucalyptus regnans* dominant trees to thinning in New Zealand. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Rotorua, v. 29, n. 2, p. 301-310, 1999.

MCTAGUE, J. P. Modelling the response of loblolly pine to juvenile fertilization. **The Open Forest Science Journal**, v. 1, n. 1, p. 80-88, 2008. DOI:10.2174/1874398600801010080.

MEDHURST, J. L.; BEADLE, C. L. Crown structure and leaf area index development in thinned and unthinned *Eucalyptus nitens* plantations. **Tree Physiology**, Oxford, v. 21, n. 12-13, p. 989-999, 2001. DOI:10.1093/treephys/21.12-13.989.

MEDHURST, J. L.; BEADLE, C. L.; NEILSEN, W. A. Early-age and later-age thinning affects growth, dominance, and intraspecific competition in *Eucalyptus Nitens* plantations. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 31, n. 2, p. 187-197, 2001. DOI: 10.1139/x00-163.

MELO, E. A. S. C. *et al.* Responses of clonal eucalypt plantations to N, P and K fertilizer application in different edaphoclimatic conditions. **Forests**, Basiléia, v. 7, n. 1, p. 1-15, 2016. DOI: 10.3390/f7010002.

MUGUNGA, C. P. *et al.* Water use by short rotation *Eucalyptus* woodlots in southern Rwanda. **Agroforestry Systems**, v. 89, p. 1119-1139, 2015. DOI: 10.1007/s10457-015-9843-5.

NILSSON, U.; ALLEN, H. L. Short- and long-term effects of site preparation, fertilization and vegetation control on growth and stand development of planted loblolly pine. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 175, n. 1-3, p. 367-377, 2003. DOI:10.1016/S0378-1127(02)00140-8.

NUTTO, L.; SPATHELF, P.; SELING, I. Management of individual tree diameter growth and implications for pruning for brazilian *Eucalyptus Grandis* Hill Ex Maiden. **Floresta**, Curitiba, v. 36, n. 3, p. 397-413, 2006. DOI: 10.5380/rf.v36i3.7519.

OLIVEIRA NETO, S. N. *et al.* Crescimento e distribuição diamétrica de *Eucalyptus camaldulensis* em diferentes espaçamentos e níveis de adubação na região de cerrado de Minas Gerais. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 4, p. 755-762, 2010. DOI:10.5380/rf.v40i4.20327.

PALLET, R. N.; SALE, G. The relative contributions of tree improvement and cultural practice toward productivity gains in *Eucalyptus* pulpwood stands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, n. 1, p. 33-43, 2004. DOI:10.1016/j.foreco.2004.01.021.

PAN, S. *et al.* Responses of global terrestrial evapotranspiration to climate change and increasing atmospheric CO<sub>2</sub> in the 21st century. **Earth's Future**, v. 3, p. 1-21, 2015. DOI: 10.1002/2014EF000263.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

PIENAAR, L.; RHENEY, J. Modeling stand level growth and yield response to silvicultural treatments. **Forest Science**, Lawrence, v. 41, n. 3, p. 629-638, 1995. DOI: 10.1093/forestscience/41.3.629.

PINKARD, E. A. *et al.* Process-based modelling of the severity and impact of foliar pest attack on eucalypt plantation productivity under current and future climates. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 839-847, 2010. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.06.027.

PRETZSCH, H.; BIBER, P. Size-symmetric versus size-asymmetric competition and growth partitioning among trees in forest stands along an ecological gradient in central Europe.

**Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 40, n. 2, p. 370-384, 2010. DOI: 10.1139/x09-195.

PRODAN, M. **Holzmesselehre**. Frankfurt: Sauerländer's Verlag, 1965. 659 p.

PULITO, A. P. *et al.* Available nitrogen and responses to nitrogen fertilizer in brazilian eucalypt plantations on soils of contrasting texture. **Forests**, Basiléia, v. 6, n. 4, p. 973-991, 2015. DOI: 10.3390/f6040973.

QUEIROZ, T. B. *et al.* Temperature thresholds for *Eucalyptus* genotypes growth across tropical and subtropical ranges in South America. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 472, 118248, 2020. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118248.

QUICKE, H.; GLOVER, G.; GLOVER, R. Loblolly pine growth response to herbaceous vegetation control at different planting densities. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 29, n. 7, p. 960-967, 1999. DOI: 10.1139/x99-069.

RAMÍREZ ALZATE, M. V. *et al.* Mid-rotation response to fertilizer by *Pinus radiata* D. Don at three contrasting sites. **Journal of Forest Science**, v. 62, n. 4, p. 153-162, 2016. DOI: 10.17221/106/2015-JFS.

RAMOS, D. C. *et al.* Efeito do desbaste sobre o crescimento de plantas de clone de eucalipto desramado. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 38, n. 3, p. 495-503, 2014. DOI: 10.1590/S0100-67622014000300012.

ROJAS, J. **Factors influencing responses of loblolly pine stands to fertilization**. 147 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - North Carolina State University, Raleigh, 2005.

ROLLINSON, T. J. D. **Thinning control**. 3. ed. London: Her Majesty's Stationery Office, 1988. 56 p.

ROSIM, C. C.; HSING, T. Y.; PAULA, R. C. Nutrient use efficiency in interspecific hybrids of eucalypt. **Revista Ciencia Agronômica**, Fortaleza, v. 47, n. 3, p. 540-547, 2016. DOI: 10.5935/1806-6690.20160065.

RYAN, M. G. *et al.* Factors controlling *Eucalyptus* productivity: How water availability and stand structure alter production and carbon allocation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1695–1703, 2010. DOI: 10.1016/j.foreco.2010.01.013.

SANQUETTA, C. R. *et al.* Dynamics of carbon and CO<sub>2</sub> removals by Brazilian forest plantations during 1990–2016. **Carbon Balance and Management**, v. 13, n. 20, p. 1-12, 2018. DOI: 10.1186/s13021-018-0106-4.

SCHÖNAU, A. P. G.; COETZEE, J. Initial spacing, stand density and thinning in *Eucalypt* plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 29, n. 4, p. 245-266, 1989. DOI: 10.1016/0378-1127(89)90097-2.

SCHÖNAU, A. P. G.; HERBERT, M. A. Fertilizing eucalypts at plantation establishment. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 29, n. 4, p. 221-244, 1989. DOI: 10.1016/0378-1127(89)90096-0.

SCHWINNING, S; WEINER, J. Mechanisms the degree of size asymmetry determining in competition among plants. **Oecologia**, v. 113, n. 4, p. 447-455, 1998. DOI:10.1007/s004420050397.

SCOLFORO, H. F. *et al.* A new approach for modeling volume response from mid-rotation fertilization of *Pinus taeda* L. Plantations. **Forests**, Basileia, v. 11, n. 6, p. 1-14, 2020. DOI:10.3390/f11060646.

SCOLFORO, H. F. *et al.* Incorporating rainfall data to better plan eucalyptus clones deployment in eastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 391, 145-153, 2017. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.02.025.

SCOLFORO, H. F. *et al.* Modeling dominant height growth of eucalyptus plantations with parameters conditioned to climatic variations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 380, p. 182-195, 2016. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.09.0010378-1127.

SCOLFORO, H. F. *et al.* Yield pattern of eucalypt clones across tropical Brazil: an approach to clonal grouping. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 432, p. 30-39, 2019. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.08.051.

SCOLFORO, J. R. S. *et al.* Dominant height model for site classification of *Eucalyptus grandis* incorporating climatic variables. **International Journal of Forestry Research**, Cairo, p. 1-7, 2013. DOI: 10.1155/2013/139236.

SETTE, C. R. *et al.* Relationship between climate variables, trunk growth rate and wood density OF *Eucalyptus grandis* W. Mill ex Maiden trees. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 40, n. 2, p. 337-346, 2016. DOI: 10.1590/0100-67622016000200016.

SHARMA, M. *et al.* Modeling climatic effects on stand height/site index of plantation-grown Jack Pine and Black Spruce trees. **Forest Science**, Lawrence, v. 61, n. 1, p. 25-34, 2015. DOI: 10.5849/forsci.13-190.

SILVA, D. M.; BATALHA, M. A. Soil-vegetation relationships in cerrados under different fire frequencies. **Plant and Soil**, The Hague, v. 311, n. 1, p. 87-96, 2008. DOI 10.1007/s11104-008-9660-y.

SILVA, P. H. M. *et al.* Fertilizer management of eucalypt plantations on sandy soil in Brazil: initial growth and nutrient cycling. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 67-78, 2013. DOI:10.1016/j.foreco.2012.10.033.

SILVA, R. M. L. *et al.* Fertilization response, light use, and growth efficiency in *Eucalyptus* plantations across soil and climate gradients in Brazil. **Forests**, Basileia, v. 7, n. 6, p. 1-12, 2016. DOI: 10.3390/f7060117.

SILVEIRA, R. L. V. A.; GAVA, J. L.; MALAVOLTA, E. Nutrição e adubação potássica em *Eucalyptus*. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2005. p. 523-590.

SMETHURST, P. *et al.* Nitrogen management in *Eucalyptus nitens* plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, n. 1, p. 63-80, 2014. DOI:

10.1016/j.foreco.2004.01.023.

SMITH, D. M. **The practice of silviculture**. New York: John Wiley & Sons, 1962. 578 p.

SMITH, R. G. B.; BRENNAN, P. First thinning in sub-tropical eucalypt plantations grown for high-value solid-wood products: a review. **Australian Forestry**, v. 69, n. 4, p. 305-312, 2006. DOI: 10.1080/00049158.2006.10676251.

SMITH, S.; HUGHES, J.; WARDELL-JOHNSON, G. High population differentiation and extensive clonality in a rare mallee eucalypt: *Eucalyptus curtisii*. **Conservation Genetics**, v. 4, p. 289-300, 2003. DOI: 10.1023/a:1024077315820.

SNOWDON, P. Modeling type 1 and type 2 growth responses in plantations after application of fertilizer or other silvicultural treatments. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 163, p. 229-244, 2002. DOI:10.1016/S0378-1127(01)00582-5.

SNOWDON, P.; WARING, H. D. **Forest fertilisation and thinning practice**. *In*: Proceedings of the IUFRO Regional Thinning Meeting, Economics and Techniques of Thinned Plantations in Australia and New Zealand. CSIRO Division of Forest Research, Canberra, p. 159-162, 1981.

SNOWDON, P.; WARING, H. D. **Long-term nature of growth responses obtained to fertilizer and weed control applied at planting and their consequences for forest management**. *In*: GREY, D. C.; SHÖNAU, A. P. G.; SHUTZ, C. J. (Eds.), Proceedings of the IUFRO Symposium on Site and Productivity of Fast-Growing Plantations. Forest Research Institute, Pretoria, p. 701-711, 1984.

SPITTLEHOUSE, D. L. Water availability, climate change and the growth of Douglas-Fir in the Georgia Basin. **Canadian Water Resources Journal**, v. 28, n. 4, p. 673-688, 2003. DOI: 10.4296/cwrj2804673.

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**, Amsterdam, v. 193, n. 1-2, p. 17-31, 2004. DOI:

10.1016/j.foreco.2004.01.020.

STAPE, J. L. *et al.* A twin-plot approach to determine nutrient limitation and potential productivity in *Eucalyptus* plantations at landscape scales in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 223, n. 1-3, p. 358-362, 2006. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.11.015.

STAPE, J. L. *et al.* The Brazil *Eucalyptus* potential productivity project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, 1684-1694, 2010. DOI: 10.1016/j.foreco.2010.01.012.

STAPE, J. L. **Production ecology of clonal *Eucalyptus* plantations in Management northeastern Brazil.** 225 p. Tese (Doutorado em Filosofia Florestal) - Colorado State University, Colorado, 2002, 225p.

TEIXEIRA, T. O. B. *et al.* A percepção sobre o uso da madeira de eucalipto pelos fabricantes do polo moveleiro de Ubá-MG. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 5, p.969-975, 2009. DOI: 10.1590/S0100-67622009000500019.

TEMPS, M. **Adição da precipitação pluviométrica na modelagem do crescimento e da produção florestal em povoamentos não desbastados de *Pinus taeda* L.** 83 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

TINKER, P. B. H.; NYE, P. H. **Solute Transport in the Rhizosphere.** Oxford University Press, Oxford, 2000. 464 p.

TNG, D. Y. P. *et al.* Giant eucalypts – globally unique fire-adapted rain-forest trees? **New Phytologist**, Lancaster, v. 196, n. 4, p. 1001-1014, 2012. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2012.04359.x.

TURNER J. A. *et al.* World wood industries outlook: 2005-2030. **Forest Research Bulletin**, New Zealand, v. 230, 2006. 75 p.

TURNER, J.; KNOTT, J. H.; LAMBERT, M. Fertilization of *Pinus Radiata* plantations after

thinning. I. Productivity gains. **Australian Forestry**, v. 59, n. 1, p. 7-21, 1996. DOI: 10.1080/00049158.1996.10674664.

VALADARES, S. V. *et al.* Predicting phosphorus use efficiency and allocation in eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 460, 117859, 2020. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.117859.

VECCHIO, M. G; LOGANES, C.; MINTO, C. Beneficial and healthy properties of *Eucalyptus* plants: a great potential use. **The Open Agriculture Journal**, v. 10, p. 52-57, 2016. DOI: 10.2174/1874331501610010052.

VILLANUEVA, F. P. A. *et al.* Improving phosphorus availability from patos phosphate rock for *Eucalyptus*: a study with <sup>32</sup>P radiotracer. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, n. 1, p. 65-69, 2006. DOI: 10.1590/S0103-90162006000100010.

WADT, P. G. S. *et al.* Variações no estado nutricional de eucaliptos por influência do material genético e da idade da árvore. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 10, p. 1797-1803, 1999. DOI: 10.1590/S0100-204X1999001000005.

WAKEEL, A. *et al.* Forest management and land use/cover changes in a typical micro watershed in the mid elevation zone of central Himalaya, India. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 213, p. 229-242, 2005. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.03.061.

WARING, K. M.; O'HARA, K. L. Silvicultural strategies in forest ecosystems affected by introduced pests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 209, n. 1-2, p. 27-41, 2005. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.01.008.

WENGER, K. F. **Forestry Handbook**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1986. 1360 p.

WEST, P. W. **Growing Plantation Forest**. Springer, 2014. 304 p.

WHITE, D. A. *et al.* Managing productivity and drought risk in *Eucalyptus globulus* plantations in south-western Australia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 33-44, 2009. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.09.039.

XIE, Y. *et al.* Advances in eucalypt research in China. **Frontiers of Agricultural Science and Engineering**, v. 4, n. 4, p. 380-390, 2017. DOI: 10.15302/j-fase-2017171.

XU, D. *et al.* Effects of P fertilisation on productivity and nutrient accumulation in a *Eucalyptus Grandis* x *E. Urophylla* plantation in southern China. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 161, n. 1-3, p. 89-100, 2002. DOI: 10.1016/S0378-1127(01)00485-6.

ZAPATA-CUARTAS, M. *et al.* A dynamic stand growth model system for loblolly pine responding to mid-rotation treatments. **Forests**, Basiléia, v. 12, n. 5, p. 1-29, 2021. DOI: 10.3390/f12050556.

ZHANG, Y.; WANG, X. Geographical spatial distribution and productivity dynamic change of *Eucalyptus* plantations in China. **Scientific Reports**, v. 11, n. 19764, p. 1-15, 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-97089-7.

**SEGUNDA PARTE – ARTIGOS**

Os artigos foram redigidos conforme a norma para publicação periódica científica NBR

6022 (ABNT, 2003)

**ARTIGO 1: Uso da regressão logística e modelagem volumétrica para analisar as respostas à fertilização na rotação intermediária de plantios desbastados de *Eucalyptus grandis* no Brasil**

**RESUMO**

A fertilização na rotação intermediária é uma prática silvicultural muito utilizada nos Estados Unidos para aumentar o crescimento e a produtividade, bem como melhorar o retorno econômico de povoamentos florestais conduzidos para produção de madeira serrada. O objetivo desse estudo foi desenvolver uma abordagem em duas etapas para modelar os ganhos na produtividade final (aos 15,5 anos) com a aplicação complementar de fertilizantes na rotação intermediária em plantios clonais de *Eucalyptus grandis* submetidos a diferentes tratamentos de desbaste. Três experimentos foram instalados nos estados da Bahia e do Espírito Santo, cada um deles com doze tratamentos de desbaste, os quais se diferem em número, idade e intensidade. Em cada experimento, dois blocos foram instalados: sem fertilização e com fertilização (aplicação aos 4,5 e 5,5 anos). Na primeira etapa foi desenvolvido um modelo para prever a probabilidade de ganho adicional na produtividade final com a fertilização complementar utilizando regressão logística. Na segunda etapa o modelo exponencial negativo foi modificado em função de características do povoamento para quantificar o ganho volumétrico com a fertilização. O modelo de regressão logística mostrou que as chances de sucesso com a aplicação adicional de fertilizantes aumentam à medida que diminui a intensidade e idade de desbaste e o espaçamento relativo das árvores. O modelo de predição de volume mostrou que melhores sítios combinados com menores intensidades de desbaste acumuladas e maior amplitude diamétrica das árvores, aumentam os ganhos absolutos em produtividade. A modelagem proposta é inovadora para retratar as respostas de crescimento em função da fertilização na rotação intermediária para plantios de eucalipto desbastados no Brasil destinados a produção de madeira serrada.

**PALAVRAS-CHAVE: Ganho adicional em produtividade. Tratamentos silviculturais adicionais. Índice de espaçamento relativo. Índice de uniformidade.**

**Use of logistic regression and volumetric modeling to analyze responses to fertilization in the mid-rotation of thinning *Eucalyptus grandis* plantations in Brazil**

**ABSTRACT**

Fertilization in the mid-rotation is a silvicultural practice widely used in the United States to increase growth and productivity, as well as improve the economic return of forest stands conducted for the production of sawn timber. The objective of this study was to develop a two-step approach to model the gains in final productivity (at 15.5 years) with the complementary application of fertilizers in the mid-rotation in clonal *Eucalyptus grandis* plantations submitted to different thinning treatments. Three experiments were installed in the states of Bahia and Espírito Santo, each with twelve thinning treatments, which differ in number, age and intensity. In each experiment, two fertilization blocks were installed: without fertilization and with fertilization (application at 4.5 and 5.5 years). In the first step, a model was developed to predict the probability of additional gain in final productivity with complementary fertilization using logistic regression. In the second stage, the negative exponential model was modified as a function of stand characteristics to quantify the volumetric gain with fertilization. The logistic regression model showed that the chances of success with the additional application of fertilizers increase as the intensity and age of thinning and the relative spacing of the trees decrease. The volume prediction model showed that better sites combined with lower accumulated thinning intensities and greater tree diameter increase the absolute gains in productivity. The proposed modeling is innovative to portray the growth responses as a function of fertilization in the mid-rotation for thinned eucalyptus plantations in Brazil intended for the production of sawn timber.

**KEYWORDS:** Additional gain in productivity. Additional silvicultural treatments. Relative spacing index. Uniformity index.

## 1. INTRODUÇÃO

A busca pela maximização do valor e da produtividade por hectare.ano<sup>-1</sup> da madeira ao menor custo possível está associada a necessidade e utilização de melhores ferramentas para alocar de forma eficiente os insumos disponíveis ou adicionados em locais e momentos mais adequados (ROJAS, 2005). Nesse sentido, a fertilização na rotação intermediária se tornou uma prática bastante regular para aumentar a produtividade em plantios de *Pinus* nos Estados Unidos (ALBAUGH; ALLEN; FOX, 2007; ANTONY *et al.*, 2009; RAMÍREZ ALZATE *et al.*, 2016; SCOLFORO *et al.*, 2020), uma vez que severas limitações nutricionais, principalmente de nitrogênio (N) e fósforo (P), ocorrem entre 5 e 8 anos de idade (ALLEN; DOUGHERTY; CAMPBELL, 1990; ALLEN; FOX; CAMPBELL, 2005).

Para os plantios clonais de eucalipto no Brasil essa prática não é muito comum, uma vez que a maior parte da madeira produzida do gênero *Eucalyptus* é destinada a produção de papel e celulose, lenha industrial e carvão (IBÁ, 2019), e, portanto, os plantios são conduzidos por rotações curtas, em torno de 5 a 7 anos (NUTTO; SPATHELF; SELING, 2006), geralmente fertilizados nos dois primeiros anos pós-plantio (MARTINS, 2004). No entanto, as espécies desse gênero apresentam potencial para gerar produtos e subprodutos de maior valor agregado (FERRAZ FILHO *et al.*, 2018). Nesse caso, o manejo dos povoamentos demanda práticas silviculturais adicionais ao longo do tempo, incluindo desramas ou podas para eliminação dos galhos, desbastes para regulação do espaçamento, controle de plantas daninhas e fertilização (FERRAZ FILHO, 2013).

À medida que as árvores envelhecem, a demanda de nutrientes aumenta, principalmente quando se consideram as condições de solo em que o plantio foi estabelecido. No Brasil, embora os solos não apresentem limitações físicas, a baixa fertilidade nutricional geralmente restringe o crescimento e a produtividade dos plantios de eucalipto (LEITE *et al.* 2011). Por exemplo, quando se trata do N, a demanda pelas plantas é sustentada após o fechamento da copa por meio da redistribuição de nutrientes (BARRETO *et al.*, 2012) aplicados durante o plantio e pós-plantio. No entanto, quando os povoamentos são conduzidos em rotações longas, a disponibilidade desse nutriente no solo diminui com o tempo devido à captação contínua pelas árvores, a competição por recursos, o surgimento de plantas daninhas e a imobilização do solo da floresta (RAMÍREZ ALZATE *et al.* 2016). Neste cenário, a fertilização complementar na rotação intermediária apresenta-se como uma ferramenta silvicultural fundamental para combinar a disponibilidade de nutrientes no solo com a demanda nutricional das plantas, e assim melhorar a produtividade final dos povoamentos (FOX *et al.* 2007).

Na literatura diversos modelos de respostas estão disponíveis para estimar com sucesso os ganhos de produtividade em plantios florestais de *Pinus* por meio da fertilização em rotação intermediária (CARLSON *et al.*, 2008; MCINNIS *et al.*, 2004; PIENAAR; RHENEY, 1995; WOOLLONS; WHYTE; MEAD, 1988). Rojas (2005) desenvolveu um modelo linear para demonstrar os ganhos na produtividade com a fertilização de N+P na rotação intermediária de plantios de *Pinus taeda*, inserindo como variáveis preditoras o índice de área foliar, N foliar e eficiência do crescimento, bem como outras variáveis relacionadas as características do povoamento, o qual explicou 66% da variação nas respostas padronizadas. Scolforo *et al.* (2020) também avaliaram o ganho no volume com a adição de fertilizante na rotação intermediária em povoamentos de *Pinus taeda*, e para isso, desenvolveram um modelo de resposta limitada incluindo como parâmetros o índice de sítio e o espaçamento relativo. Os autores destacaram que o modelo desenvolvido produziu resultados biologicamente sólidos para uma variedade de cenários empregando as variáveis mencionadas.

No entanto, quando se trata de plantios de eucalipto no Brasil, modelos capazes de explicar os ganhos na produtividade com aplicação de fertilizantes em idades mais avançadas do povoamento ainda não foram descritos na literatura, embora alguns estudos já tenham mostrado o potencial dessas plantações ao redor do mundo para respostas positivas a esse tipo de tratamento silvicultural adicional. Stoneman *et al.* (1997) estudaram as respostas ao desbaste e fertilização, realizados a partir dos 40 anos de idade, no crescimento e nas relações hídricas de povoamentos de *Eucalyptus marginata* (jarrah), e verificaram que aplicação de fertilizantes promoveu o aumento do crescimento e da eficiência de crescimento tanto em locais desbastados quanto não desbastados. Forrester *et al.* (2013) verificaram em plantios de *Eucalyptus nitens* na Austrália que a aplicação de fertilizantes, realizada aos 3,2 anos e avaliada aos 8,1 anos de idade, aumentou o crescimento da biomassa acima do solo, da madeira do tronco por unidade de radiação fotossinteticamente ativa absorvida e a eficiência do uso da luz.

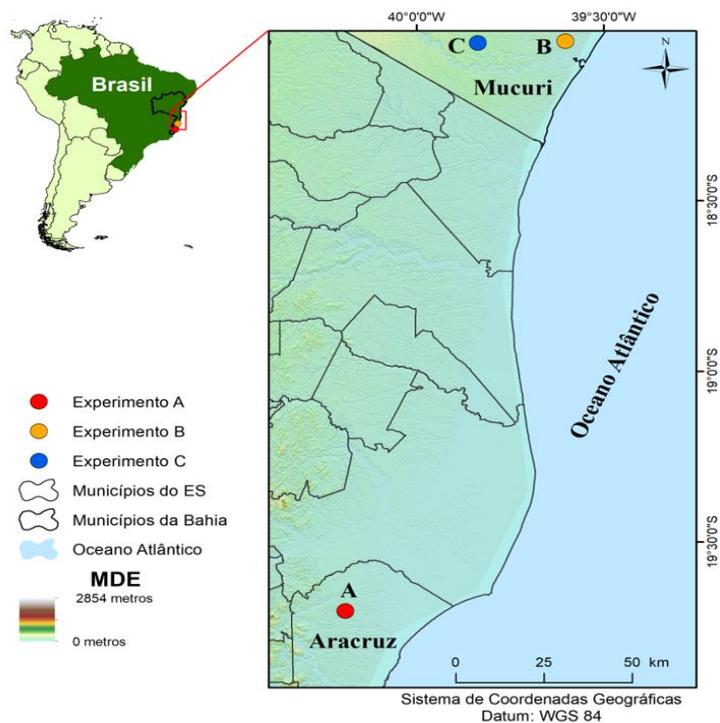
Portanto, o objetivo do estudo foi desenvolver modelos que possam explicar e quantificar os ganhos na produtividade final com a aplicação complementar de fertilizantes na rotação intermediária em plantios de eucalipto desbastados, conduzidos em rotações longas, no Brasil. Para isso foi proposta uma abordagem em duas etapas: 1º) Ajustar um modelo com regressão logística capaz de prever a probabilidade de ganho adicional no volume final com a fertilização complementar utilizando todo o conjunto de dados; 2º) Considerando apenas os dados que apresentaram a probabilidade de respostas positivas na primeira etapa, ajustar um modelo de predição de volume capaz de quantificar o ganho adicional na produtividade dos povoamentos no final da rotação com o tratamento de fertilização aplicado.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Área de estudo

As áreas de estudo (experimentos A, B e C) estão localizadas nos municípios de Aracruz, no estado do Espírito Santo, e Mucuri, no estado da Bahia, entre as coordenadas 18°01'54"S a 19°41'55"S de latitude e 39°36'09"W a 40°12'11"W de longitude (Figura 1). De acordo com Alvares *et al.* (2013), os climas dos locais são caracterizados como tropical de inverno seco (Aw) no Estado do Espírito Santo, e tropical sem estação seca (Af) no Estado da Bahia, sendo que essas tipologias climáticas apresentam precipitação média anual variando entre 1300 e 1600 mm, altitude média abaixo de 100 metros e temperatura média anual entre 22 e 24°C. O relevo é plano, e conforme os resultados da análise de solo, as regiões apresentam Argissolo Amarelo distrófico de textura arenosa/média a arenosa/argilosa.

Figura 1 - Localização dos experimentos A, B e C.



### 2.2 Caracterização dos experimentos

Os dados provêm de povoamentos de *Eucalyptus grandis* implantados no ano de 1999, plantados no espaçamento 3,0 m x 3,0 m (densidade inicial de 1111 árvores por hectare). Foram conduzidos em três experimentos (Tabela 1), cada um deles com doze tratamentos de desbastes (seletivo e sistemático), os quais se diferem em número (nenhum, um ou dois desbastes), idade e intensidade (número de árvores remanescentes após o desbaste).

Tabela 1 - Caracterização dos tratamentos de desbaste (Trat.) de cada experimento (Exp.).

<b>Exp.</b>	<b>Trat.</b>	<b>N.ha<sup>-1</sup> inicial</b>	<b>Idade 1º desbaste</b>	<b>N.ha<sup>-1</sup> após 1º desbaste</b>	<b>Idade 2º desbaste</b>	<b>N.ha<sup>-1</sup> após 2º desbaste</b>	
A	1		-	-	-	-	
	2		3,5	600	6,4	300	
	3		3,5	300	-	-	
	4		3,5	150	-	-	
	5		3,5	600	6,4	150	
	6	1111		5	450	-	-
	7			5	450	7	250
	8			2,5	600	5,5	300
	9			2,5	600	5,5	150
	10			2,5	300	-	-
	11			2,5	150	-	-
	12			-	-	-	-
B	1		-	-	-	-	
	2		3,5	600	6,3	300	
	3		3,5	300	-	-	
	4		3,5	150	-	-	
	5		3,5	600	6,3	150	
	6	1111		5	450	-	-
	7			5	450	7	250
	8			2,5	600	5,5	300
	9			2,5	600	5,5	150
	10			2,5	300	-	-
	11			2,5	150	-	-
	12			-	-	-	-
C	1		-	-	-	-	
	2		3,1	600	6,1	300	
	3		3,1	300	-	-	
	4		3,1	150	-	-	
	5		3,1	600	6,1	150	
	6			4,6	450	-	-
	7	1111		4,6	450	6,6	250
	8			2,1	600	5,1	300
	9			2,1	600	5,1	150
	10			2,1	300	-	-
	11			2,1	150	-	-
	12			-	-	-	-

N.ha<sup>-1</sup> representa o número de árvores por hectare.

Todos os tratamentos de desbaste foram constituídos de quatro parcelas (repetições) idênticas, instaladas de forma contínua, totalizando quarenta e oito parcelas por experimento (Quadro 1). O tamanho das parcelas variou de acordo com o número de árvores remanescentes, tal que os tratamentos com desbastes mais intensos receberam parcelas maiores. As áreas das parcelas variaram entre 438 m<sup>2</sup> (não desbastadas) a 1034 m<sup>2</sup> (tratamentos com densidade final de 150 árvores por hectare).

Quadro 1 - Distribuição das parcelas nos diferentes tratamentos de desbaste (T1 a T12) e blocos de fertilização complementar (BI – com fertilização e BII – sem fertilização) de cada experimento.

<b>Experimento A</b>												
	<b>T9</b>	<b>T5</b>	<b>T1</b>	<b>T8</b>	<b>T7</b>	<b>T4</b>	<b>T12</b>	<b>T3</b>	<b>T2</b>	<b>T10</b>	<b>T11</b>	<b>T6</b>
<b>BII</b>	4	5	12	13	20	21	28	29	36	37	44	45
	3	6	11	14	19	22	27	30	35	38	43	46
<b>BI</b>	2	7	10	15	18	23	26	31	34	39	42	47
	1	8	9	16	17	24	25	32	33	40	41	48
<b>Experimento B</b>												
	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T1</b>	<b>T4</b>	<b>T6</b>	<b>T7</b>	<b>T5</b>	<b>T8</b>	<b>T12</b>	<b>T10</b>	<b>T11</b>	<b>T9</b>
<b>BII</b>	4	5	12	13	20	21	28	29	36	37	44	45
	3	6	11	14	19	22	27	30	35	38	43	46
<b>BI</b>	2	7	10	15	18	23	26	31	34	39	42	47
	1	8	9	16	17	24	25	32	33	40	41	48
<b>Experimento C</b>												
	<b>T9</b>	<b>T5</b>	<b>T1</b>	<b>T8</b>	<b>T7</b>	<b>T4</b>	<b>T12</b>	<b>T3</b>	<b>T2</b>	<b>T10</b>	<b>T11</b>	<b>T6</b>
<b>BII</b>	4	5	12	13	20	21	28	29	36	37	44	45
	3	6	11	14	19	22	27	30	35	38	43	46
<b>BI</b>	2	7	10	15	18	23	26	31	34	39	42	47
	1	8	9	16	17	24	25	32	33	40	41	48

Para instalar o tratamento de fertilização complementar na rotação intermediária, cada tratamento de desbaste foi dividido em dois blocos com duas parcelas (repetições) contínuas (Quadro 1). No bloco I as parcelas receberam fertilizações complementares em dois momentos: setembro de 2003 (aproximadamente aos 4,5 anos), com 37 kg.ha<sup>-1</sup> de nitrogênio (N), 60 kg.ha<sup>-1</sup> de fósforo (P), 110 kg.ha<sup>-1</sup> de potássio (K) e 1,4 t.ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico; e setembro de 2004 (aproximadamente aos 5,5 anos), com 37 kg.ha<sup>-1</sup> de N e 110 kg.ha<sup>-1</sup> de K. No bloco II as parcelas não receberam nenhuma fertilização complementar na rotação intermediária.

As demais operações silviculturais executadas antes, durante e depois do plantio foram as mesmas para todos os experimentos. No pré-plantio foram realizados o controle de plantas daninhas com glifosato (duas aplicações 1 ano antes) e subsolagem de 40 a 60 cm de profundidade. A fertilização executada durante o plantio foi de 2 t.ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico,

14 kg.ha<sup>-1</sup> de N, 29 kg.ha<sup>-1</sup> de P, 11 kg.ha<sup>-1</sup> de K, e ainda 56 kg.ha<sup>-1</sup> de P aplicados durante a operação de subsolagem. Já para fertilização pós-plantio foram aplicados 100 kg.ha<sup>-1</sup> de K na idade de um ano e seis meses; e 20 kg.ha<sup>-1</sup> de N e 50 kg.ha<sup>-1</sup> de K na idade de dois anos e nove meses. Também foram realizadas aplicações de glifosato para combater a mato competição periodicamente, conforme a necessidade, até a idade de 9 anos.

### 2.3 Banco de dados e variáveis utilizadas

O inventário florestal foi conduzido periodicamente de 2001 a 2014, e em cada ocasião foram mensurados o diâmetro à altura de 1,3 metros (dap) e a altura total (ht) de todos os indivíduos das parcelas. A altura dominante (hd) seguiu o conceito de Assmann (1970), sendo considerada a média da altura total das 100 árvores com maior dap por hectare. As informações obtidas nos inventários permitiram calcular as variáveis necessárias para o desenvolvimento dos modelos.

A variável índice de uniformidade (iu) foi obtida a partir da amplitude dos diâmetros percentis 10 e 63 (1), os quais estão suficientemente afastados para fornecer a amplitude da distribuição e identificar a heterogeneidade no crescimento florestal (MCTAGUE; BAILEY, 1987). Quanto maior for a amplitude diamétrica da parcela, menor o valor de uniformidade obtido no índice.

$$iu_{ijnk}(cm^{-1}) = \frac{1}{dap63_{ijnk} - dap10_{ijnk}} \quad (1)$$

$iu_{ijnk}(cm^{-1})$ : índice de uniformidade;  $dap63_{ijnk}$  e  $dap10_{ijnk}$ : dap (cm) localizado, respectivamente, no percentil 63 e percentil 10. Os subscritos  $ijnk$  representam a *i*-ésima parcela no *j*-ésimo tratamento de desbaste do *n*-ésimo experimento na idade *k*.

Adicionalmente, para fornecer uma medida de espaço de crescimento das árvores foi calculado o índice de espaçamento relativo ou índice de Hart-Becking (2). De acordo com Zhao, Kane e Borders (2012), o índice de espaçamento relativo prevê com precisão a proporção de copa, variável convencionalmente usada para fornecer uma medida do espaço de crescimento das árvores, bem como sua competição por nutrientes, água e luz (SCOLFORO *et al.*, 2020). A proporção de copa apresenta boa correlação com o índice de área foliar, que por sua vez, está fortemente associado ao nível de resposta do volume à fertilização (ROJAS, 2005).

$$ier_{ijnk} = \frac{\sqrt{\frac{10000}{N_{ijnk}}}}{hd_{ijnk}} \quad (2)$$

$ier_{ijnk}$ : índice de espaçamento relativo;  $N_{ijnk}$ : número de árvores por hectare;  $hd_{ijnk}$ : altura dominante (metros). Os subscritos  $ijnk$  já foram descritos anteriormente.

Outra variável importante obtida com as informações do inventário foi o índice de desbaste de cada tratamento. Primeiramente, o índice (3) foi calculado com base no termo  $Nb$ , que representa o número de árvores sobreviventes por hectare antes do último desbaste, conforme proposto por Pienaar e Rheney (1993). Posteriormente, calculou-se o índice acumulado, considerando o número de árvores removidas em todos os desbastes aplicados ao longo do tempo (4).

$$id_{jn} = \frac{Nt_{jn}It_{jn}}{Nb_{jn}I} \quad (3)$$

$id_{jn}$ : índice de desbaste;  $Nt_{jn}$ : número de árvores por hectare removidas no último desbaste;  $Nb_{jn}$ : número de árvores por hectare sobreviventes anterior ao último desbaste;  $It_{jn}$ : idade (anos) do último desbaste;  $I$ : idade do povoamento (anos). Os subscritos  $jn$  já foram descritos anteriormente.

$$ida_{jn} = \frac{ni_{jn} - nr1_{jn} - nr2_{jn}}{ni_{jn}} \quad (4)$$

$ida_{jn}$ : índice de desbaste acumulado;  $ni_{jn}$ : número inicial de árvores por hectare ou densidade inicial;  $nr1_{jn}$ : número de árvores removidas por hectare no primeiro desbaste;  $nr2_{jn}$ : número de árvores removidas por hectare no segundo desbaste. Os subscritos  $jn$  já foram descritos anteriormente.

## 2.4 Análise dos dados

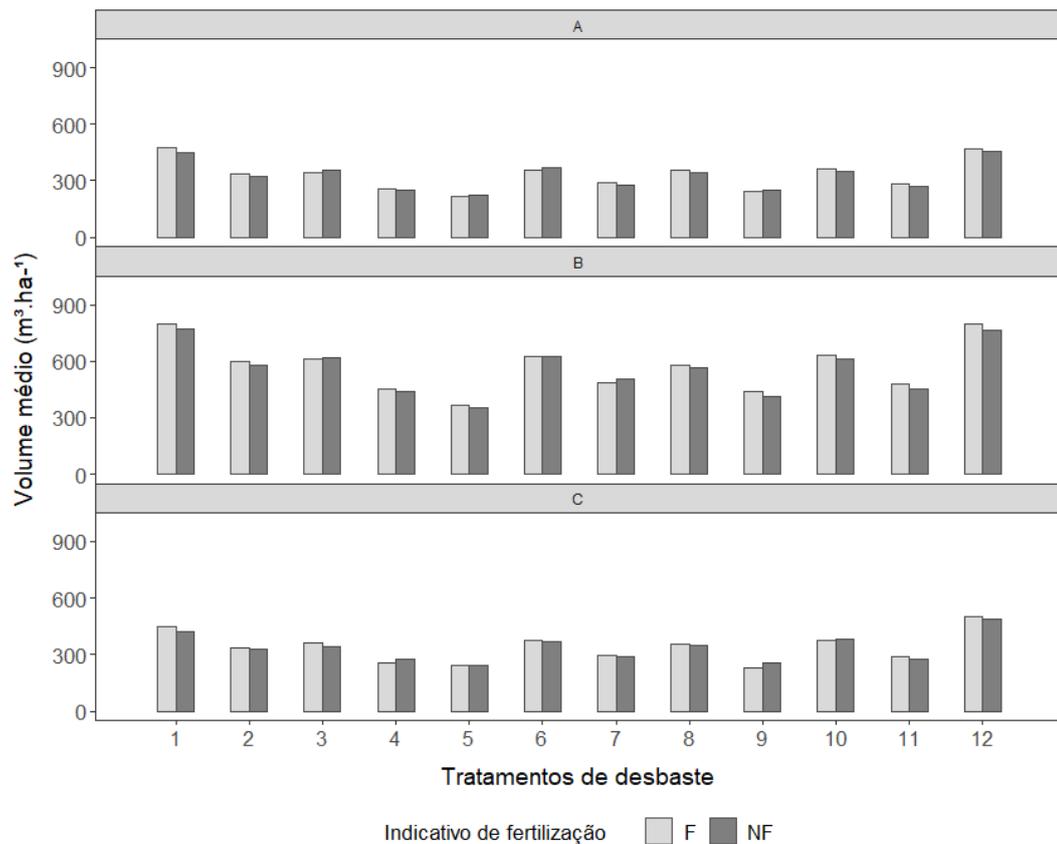
Para desenvolver modelos que possam verificar a probabilidade e quantificar a resposta volumétrica à fertilização complementar na rotação intermediária foi avaliada a relação do volume com outras variáveis do povoamento que possam ser utilizadas como preditoras. Considerando que o interesse do estudo foi analisar o ganho volumétrico com a fertilização complementar na produtividade final dos plantios foram utilizados os dados da última medição, idade aproximada de 15,5 anos.

A variável resposta do volume foi obtida em termos absolutos por meio da diferença do volume médio do local fertilizado e do controle (5). A diferença no volume médio fertilizado x não fertilizado para cada tratamento de desbaste nos diferentes experimentos na idade de 15,5 anos foi avaliada por meio de análise gráfica (Figura 2).

$$rv_{jn} = Vf_{jn} - Vnf_{jn} \quad (5)$$

$rv_{jn}$ : resposta absoluta do volume ( $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$ );  $Vf_{jn}$ : volume médio das parcelas fertilizadas;  $Vnf_{jn}$ : volume médio das parcelas controle (não fertilizadas). Os subscritos  $jn$  já foram descritos anteriormente.

Figura 2 - Volume médio ( $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$ ) dos locais fertilizados (F) e não fertilizados (NF) para os tratamentos de desbastes (1 a 12) de cada experimento (A, B e C) na idade de 15,5 anos.



As variáveis do povoamento que foram escolhidas para serem correlacionadas com a resposta absoluta do volume foram: sítio, índice de uniformidade, índice de espaçamento relativo, índice de desbaste e índice de desbaste acumulado (Tabela 2). Para a variável sítio foi empregada a média da altura dominante das parcelas não fertilizadas de cada tratamento de desbaste para cada experimento na idade de 15,5 anos (considerada como idade de referência). Para os índices também foi considerada a média dos valores de locais não fertilizados, uma vez que, dessa forma é possível verificar de fato a existência ou não de ganho adicional com a fertilização complementar.

Tabela 2 - Estatísticas descritivas das variáveis do povoamento para cada experimento na idade de 15,5 anos.

Variável	Experimento	Mínimo	Média	Máximo	Desvio
Resposta absoluta do volume (m <sup>3</sup> . ha <sup>-1</sup> )	A	-12,40	7,06	30,20	13,56
	B	-19,00	13,46	31,90	15,12
	C	-20,90	4,76	28,20	14,37
Sítio (m)	A	36,84	38,40	40,07	0,95
	B	42,76	44,15	45,69	0,84
	C	35,30	37,55	40,04	1,26
Índice de uniformidade (cm <sup>-1</sup> )	A	0,138	0,285	0,514	0,108
	B	0,107	0,195	0,350	0,075
	C	0,140	0,348	0,557	0,118
Índice de espaçamento relativo	A	0,081	0,155	0,210	0,045
	B	0,075	0,130	0,186	0,036
	C	0,090	0,163	0,222	0,046
Índice de desbaste	A	0,000	0,161	0,305	0,091
	B	0,000	0,152	0,301	0,091
	C	0,000	0,147	0,292	0,087
Índice de desbaste acumulado	A	0,137	0,363	1,000	0,309
	B	0,170	0,425	1,000	0,290
	C	0,137	0,381	1,000	0,303

Adicionalmente, a análise de variância considerando o delineamento em blocos casualizados (DBC) em esquema fatorial foi utilizada para avaliar estatisticamente o efeito da fertilização complementar e da sua interação com os tratamentos de desbaste na média do volume dos povoamentos. Considerou-se dados desbalanceados, uma vez que parcelas com altas taxas de mortalidade de cada experimento foram removidas da base, sem eliminar tratamentos por completo.

## 2.5 Abordagem em duas etapas

A abordagem proposta consiste em duas partes de modelagem complementares: um modelo de regressão logística que prevê a probabilidade de ganho adicional no volume final com a fertilização complementar utilizando todo o conjunto de dados com respostas positivas e negativas; e um modelo de volume que quantifica a resposta absoluta do volume empregando

apenas os dados com respostas positivas na etapa anterior para compreender de fato a magnitude do ganho em volume.

### 2.5.1 Etapa 1 - Modelo de regressão logística

Os modelos com regressão logística, por meio do uso da função “logit”, geralmente são empregados para prever a probabilidade de acontecimentos (6). Na área florestal a aplicação desses modelos é bastante comum para estimar a probabilidade de não ocorrência da mortalidade de árvores entre intervalos de medição (SCOLFORO *et al.*, 2019; ZHAO *et al.* 2007). Portanto, na abordagem proposta, a primeira etapa foi prever a probabilidade de ganho adicional na produtividade final com a fertilização complementar utilizando regressão logística (7). Para isso, valores de 0 a 1 foram atribuídos para cada resposta absoluta do volume ( $m^3 \cdot ha^{-1}$ ), de modo que, as respostas negativas receberam o valor 0, e as positivas o valor 1.

$$y = \text{logit} \left( \frac{\pi_{jn}}{1-\pi_{jn}} \right) = \beta_0 + \beta_1 \text{var}_1 + \beta_2 \text{var}_2 + \dots + \beta_n \text{var}_n + e \quad (6)$$

$$\pi_{jn} = \frac{\exp(y)}{1+\exp(y)} \quad (7)$$

$\pi_{jn}$ : probabilidade de ganho adicional no volume final com a fertilização complementar;  $\beta$ 's: parâmetros a serem estimados;  $\text{var}_1, \text{var}_2, \text{var}_n$ : variáveis do povoamento a serem inseridas no modelo;  $e$ : erro aleatório. Os subscritos  $jn$  já foram descritos anteriormente.

Adicionalmente, foram simulados cenários de probabilidade de ganho adicional em volume para diferentes condições da floresta, no intuito de identificar em quais limites as árvores deixam de ser responsivas à aplicação complementar de fertilizantes. Para isso foram considerados valores dentro da amplitude de dados das variáveis predictoras do modelo de regressão logística.

### 2.5.2 Etapa 2 - Modelo de predição do volume

Assumindo que o modelo logístico previu com precisão a probabilidade de ganho adicional no volume final com a fertilização complementar, a equação para quantificar esse ganho foi desenvolvida exclusivamente a partir dos tratamentos no qual a resposta absoluta do volume foi positiva. O modelo exponencial negativo (8) foi escolhido para quantificar a resposta absoluta do volume ( $m^3 \cdot ha^{-1}$ ), sendo frequentemente utilizado para ajustar dados de experimentos biológicos (RIBEIRO *et al.*, 2017).

$$rv_{jn} = \alpha (\exp(\beta x)) + e \quad (8)$$

$rv_{jn}$ : resposta do volume  $m^3.ha^{-1}$ ;  $\alpha$  e  $\beta$ : parâmetros a serem estimados,  $x$ : variável independente do modelo;  $e$ : erro aleatório. Os subscritos  $jn$  já foram descritos anteriormente.

O ajuste dos modelos foi realizado no software R (R CORE TEAM, 2021), empregando a função `glm` para a modelagem com regressão logística e a função `nls` para o modelo exponencial de volume, ambas pertencentes ao R base.

## 2.6 Validação

Para fins de validação normalmente são utilizados conjuntos de dados independentes. No entanto, a limitação de dados neste estudo sugeriu que a divisão não seria eficaz para ajustar e validar a modelagem proposta. Neste sentido, adotou-se a estratégia recomendada por Kozak e Kozak (2003), no qual 1000 amostras aleatórias foram geradas por meio da técnica de *bootstrap* não paramétrico com reposição.

As estatísticas utilizadas para avaliar o desempenho do modelo de volume foram o erro médio (T, 9), erro médio absoluto (MAE, 10), raiz do erro quadrático médio (RMSE, 11), eficiência do modelo (EF, 12) e análises gráficas utilizando o pacote `ggplot2` (WICKHAM, 2009) no software R. Para avaliar o modelo logístico foi utilizada a área sob a curva (AUC) e a acurácia obtida pela matriz de confusão (CHANG *et al.*, 2013, HILBE, 2015).

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O - Pr) \quad (9)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O - Pr| \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O - Pr)^2}{n}} \quad (11)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O - Pr)^2}{\sum_{i=1}^n (O - \bar{O})^2} \quad (12)$$

$Pr$ : valores preditos;  $O$ : valores observados;  $\bar{O}$ : média dos valores observados;  $n$ : número de observações.

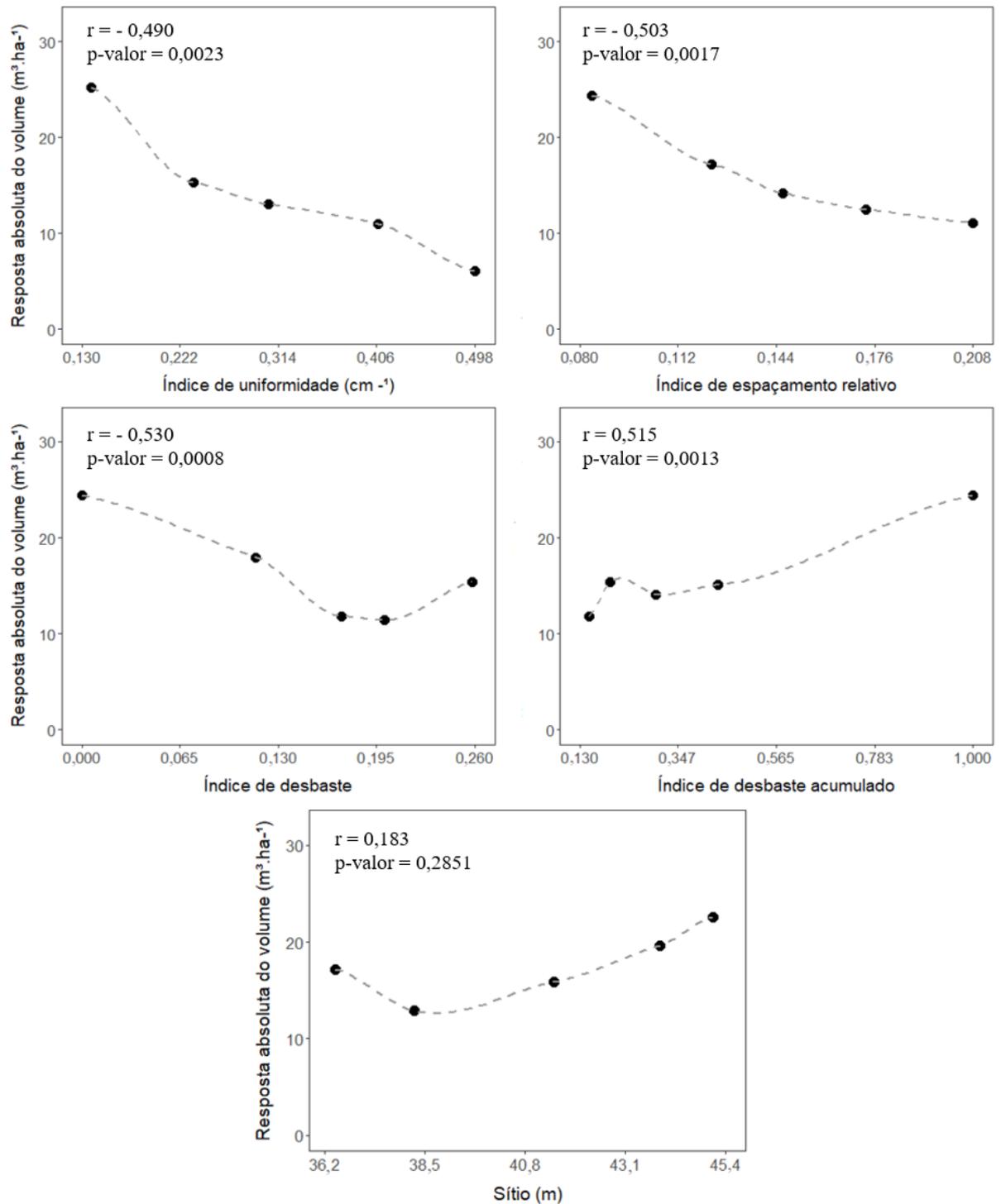
## 3. RESULTADOS

### 3.1 Correlação entre o volume e as variáveis utilizadas

As relações da resposta absoluta positiva do volume (agrupadas em classes) com as demais variáveis (Figura 3) mostraram haver uma correlação negativa com os índices de

uniformidade, espaçamento relativo e desbaste, e correlação positiva com o índice de desbaste acumulado e o sítio.

Figura 3 - Relação dos valores positivos da resposta absoluta do volume ( $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ) com as variáveis índice de uniformidade, índice de espaçamento relativo, índice de desbaste, índice de desbaste acumulado e sítio, agrupadas em classes de valores.



### 3.2 Análise de variância

Para atender os pressupostos de normalidade e homogeneidade dos resíduos na análise de variância, a variável volume foi transformada por meio do uso do logaritmo natural. A interação entre desbaste e fertilização não foi significativa (Tabela 3), e, portanto, esses fatores foram avaliados de forma independente. A diferença na média do volume ( $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$ ) entre os tratamentos de desbaste foi significativa estatisticamente ( $\alpha = 5\%$ ). Além disso, também foi diagnosticado diferença significativa ( $\alpha = 5\%$ ) em relação ao tratamento de fertilização. Esses resultados permitiram afirmar que a produção do volume ao final da rotação foi responsiva aos tratamentos de desbaste e fertilização aplicados, justificando a necessidade de modelos que possam explicar tais respostas.

Tabela 3 - Análise de variância do volume médio na idade de 15,5 anos.

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Bloco (Experimentos)	2	7,7132	3,8566	2125,4788	$< 2e^{-16}$ ***
Fator 1 (Desbaste)	11	5,2329	0,4757	262,1802	$< 2e^{-16}$ ***
Fator 2 (Fertilização)	1	0,0084	0,0084	4,6187	0,03422 *
Fator 1 x Fator 2	11	0,0127	0,0012	0,6344	0,79509
Resíduos	93	0,1687	0,0018		

### 3.3 Modelo de regressão logística

As variáveis índice de uniformidade, índice de espaçamento relativo, índice de desbaste, índice de desbaste acumulado e sítio foram testadas individualmente e combinadas para desenvolver o modelo de regressão logística. A interação do índice de espaçamento relativo e do índice de desbaste apresentou uma correlação de Pearson significativa ao nível de 5% (-0,41) com a resposta absoluta do volume e foi escolhida para compor o modelo de probabilidades.

O ajuste do modelo utilizando regressão logística resultou na equação (13), tal que todos os coeficientes estimados foram significativos ( $\alpha = 0,05$ ). Porém, para prever a probabilidade de ganho adicional no volume final com a fertilização complementar, foi necessário aplicar a equação (14).

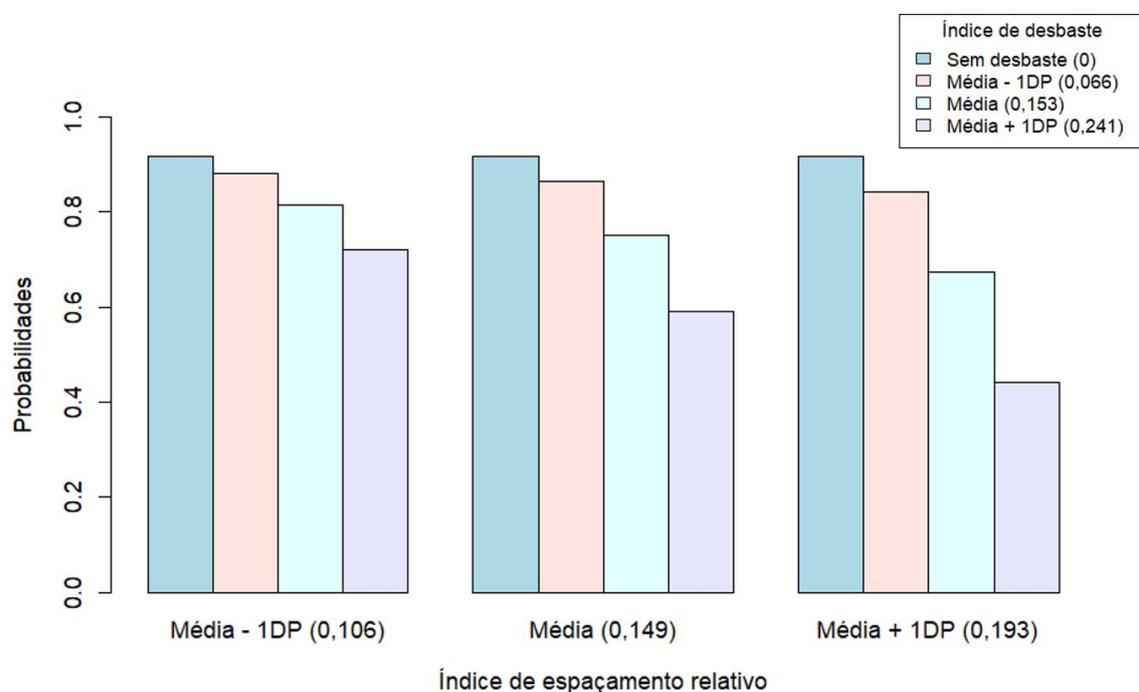
$$y_{jn} = 2,4072 - 56,7903 (ier_{jn} * id_{jn}) \quad (13)$$

$$\pi_{jn} = \frac{\exp(2,4072 - 56,7903 (ier_{jn} * id_{jn}))}{1 + \exp(2,4072 - 56,7903 (ier_{jn} * id_{jn}))} \quad (14)$$

A AUC igual a 0,702 e a acurácia de 77,78% obtida com a matriz de confusão sugeriram uma precisão aceitável para fins de prever a probabilidade de resposta à fertilização no volume final de povoamentos clonais de eucalipto no Brasil. Além disso, a equação ajustada sugeriu que essa probabilidade diminui com o aumento nos valores da interação entre os índices de desbaste e de espaçamento relativo. Portanto, locais não desbastados ou com desbastes de menor intensidade em idade mais jovens, e que as árvores possuem menor espaço de crescimento, tendem a ser mais responsivos, em termos de produção volumétrica, à aplicação extra de fertilizantes.

Por fim, foram simulados cenários de probabilidades de ganho adicional em volume para diferentes intensidades/idades de desbaste e espaço de crescimento das árvores: média dos valores dos índices de desbaste e espaçamento relativo, média menos (-) um desvio padrão (DP) e média mais (+) um desvio padrão (Figura 4). A produção volumétrica final foi considerada responsiva à aplicação extra de fertilizantes para probabilidades acima de 0,5 ou 50% (SMOLSKI, 2019).

Figura 4 - Probabilidades de ganho adicional na produtividade volumétrica final com a aplicação complementar de fertilizantes para diferentes valores de índice de desbaste e índice de espaçamento relativo.



DP: desvio padrão.

Para locais não desbastados ou que apresentaram a média do valor do índice de desbaste - 1DP, a probabilidade de ganho adicional em produtividade foi superior a 80% para todas as

combinações com o índice de espaçamento relativo consideradas. Para os locais com o maior índice de desbaste, média + 1 DP, a probabilidade das respostas ao tratamento de fertilização aplicado diminuiu consideravelmente à medida que reduziu o índice de espaçamento relativo. Em geral, para qualquer situação simulada, o aumento nos valores dos índices considerados representa, em maior ou menor proporção, redução na probabilidade de ganho no volume final.

### 3.4 Modelo de predição do volume

Para desenvolver o modelo de predição de volume foram utilizadas apenas os dados em que as respostas foram positivas (aproximadamente 70% do conjunto de dados), e algumas relações foram estabelecidas e testadas. O índice de uniformidade, considerado como um bom indicador de recursos adequadamente distribuídos para o crescimento (BINKLEY *et al.*, 2010), apresentou uma correlação fortemente negativa com a variável resposta (-0,76), e por isso foi associado ao parâmetro de inclinação da curva.

$$rv_{jn} = \alpha (\exp(\beta iu_{jn})) + e \quad (15)$$

No entanto, a equação (15) exhibe algumas deficiências. Quando a resposta do volume é expressa em termos relativos, os sítios com qualidade inferior normalmente apresentam maior ganho adicional com a fertilização complementar (SCOLFORO *et al.*, 2020). No entanto, quando se considera valores absolutos de resposta do volume, melhores locais propiciam maiores ganhos adicionais, conforme demonstrado na Figura 3 para a variável sítio. Portanto, para superar a falta de informações de qualidade do local, a variável sítio, sem qualquer tratamento de fertilização complementar, foi incorporada ao modelo:

$$rv_{jn} = s_{jn}^{\alpha_0} (\exp(\beta iu_{jn})) + e \quad (16)$$

Além disso, assumiu-se que a resposta absoluta do volume à fertilização complementar seria melhor prevista com a inclusão de uma variável para representar os diferentes tratamentos de desbastes. Para isso, foi adicionado ao modelo a variável índice de desbaste acumulado, correlacionada positivamente com a variável resposta (0,57).

$$rv_{jn} = s_{jn}^{\alpha_0} \alpha_1^{ida_{jn}} (\exp(\beta iu_{jn})) + e \quad (17)$$

s: altura dominante na idade de 15,5 anos (idade de referência);  $\alpha_0$  e  $\alpha_1$  são os parâmetros a serem estimados que representam a assíntota;  $\beta$  é o parâmetro a ser estimado que representa a inclinação; as demais variáveis já foram descritas anteriormente.

O ajuste do modelo para prever a resposta absoluta do volume final resultou na equação (18), em que todos os coeficientes estimados foram significativos ( $\alpha = 0,05$ ) e exibem sinais adequados conforme pode ser observado na Figura 3.

$$rv_{jn} = S_{jn}^{0,94355} 1,25128^{ida_{jn}} (\exp(-3,33284 iu_{jn})) + e \quad (18)$$

A equação ajustada (18) implica que a resposta absoluta do volume ao final da rotação aumenta à medida que melhora a qualidade do sítio e reduz a intensidade de desbaste, ou seja, aumenta o índice de desbaste acumulado, de modo que, locais não desbastados (*ida* igual a 1) são os mais responsivos à fertilização complementar. Além disso, a resposta absoluta do volume aumenta à medida que diminui o índice de uniformidade. Esse resultado está em conformidade com o comportamento do índice de desbaste acumulado, uma vez que, em geral, os locais não desbastados ou com desbastes de menor intensidade apresentaram maiores amplitudes diamétricas quando comparados àqueles que sofreram desbastes mais severos.

Os índices estatísticos  $T = 0,052$ ,  $MAE = 3,432$ ,  $RMSE = 4,286$  e  $EF = 0,694$  indicaram um nível aceitável de precisão para as estimativas fornecidas pela equação (18). As respostas absolutas de volume observadas e estimadas dos povoamentos de eucalipto estudados foram bem correlacionadas (Figura 5a), no entanto, ainda existe alguma variação aleatória que o modelo não foi capaz de explicar. No que se refere aos resíduos do modelo, observou-se que menores valores de índice de uniformidade (entre 0,15 e 0,35) apresentam distribuição mais homogênea (Figura 5b). Por fim, a análise gráfica da relação entre as respostas absolutas do volume observadas e estimadas mostraram que o modelo proposto não consegue explicar o comportamento dos dados em índices de uniformidade maiores que 0,34 (Figura 6).

A validação do modelo de volume utilizando 1000 amostras aleatorizadas pelo método *bootstrap* não paramétrico com reposição permitiu estimar a distribuição amostral das estatísticas  $T$ ,  $MAE$ ,  $RMSE$  e  $EF$  (Tabela 4 e Figura 7). Os valores médios dos índices estatísticos e os seus intervalos de confiança de comprimentos relativamente curtos (ao nível de 95%), reforçaram o nível de precisão aceitável do modelo para estimar a resposta absoluta do volume.

Figura 5 - Desempenho da equação (17); a) linha suavizada de respostas absolutas do volume observadas vs. estimadas; b) gráfico de resíduos percentuais da resposta absoluta do volume em função do índice de uniformidade.

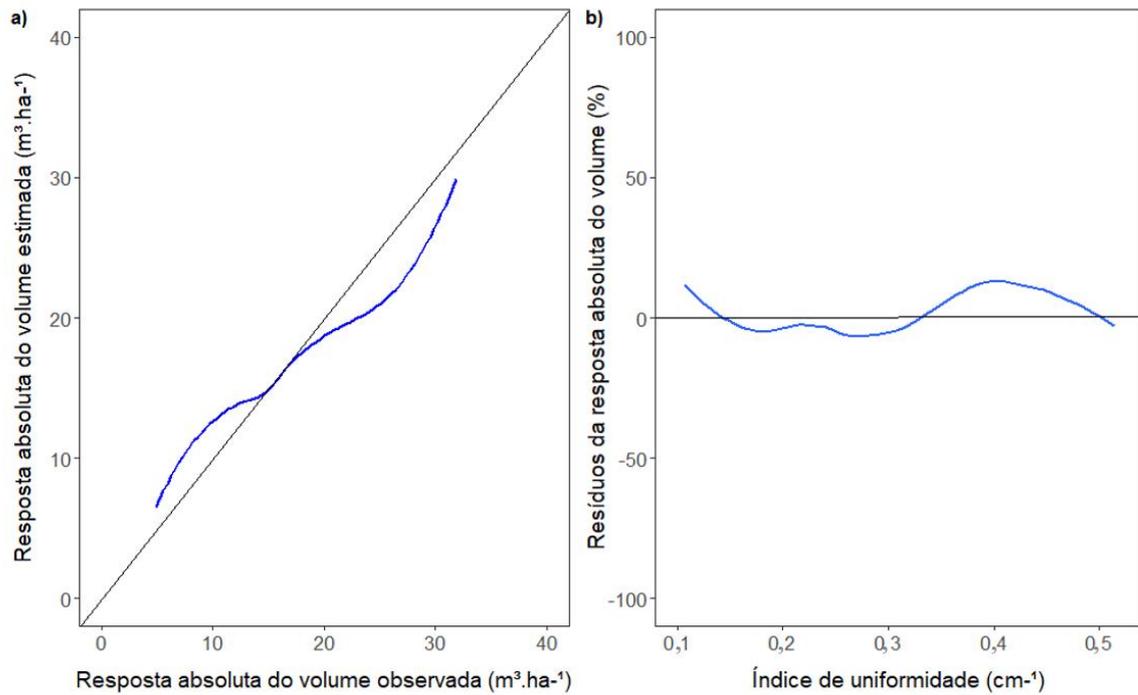


Figura 6 - Linhas suavizadas para os valores de resposta absoluta do volume observada (linha verde) vs. resposta absoluta do volume estimada (linha laranja) pela equação (17), em função do índice de uniformidade.

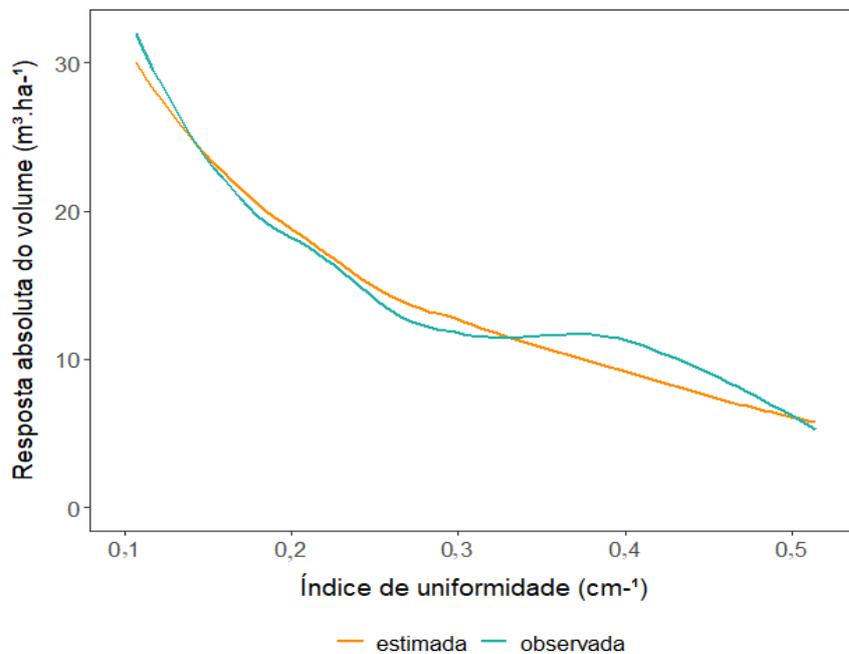
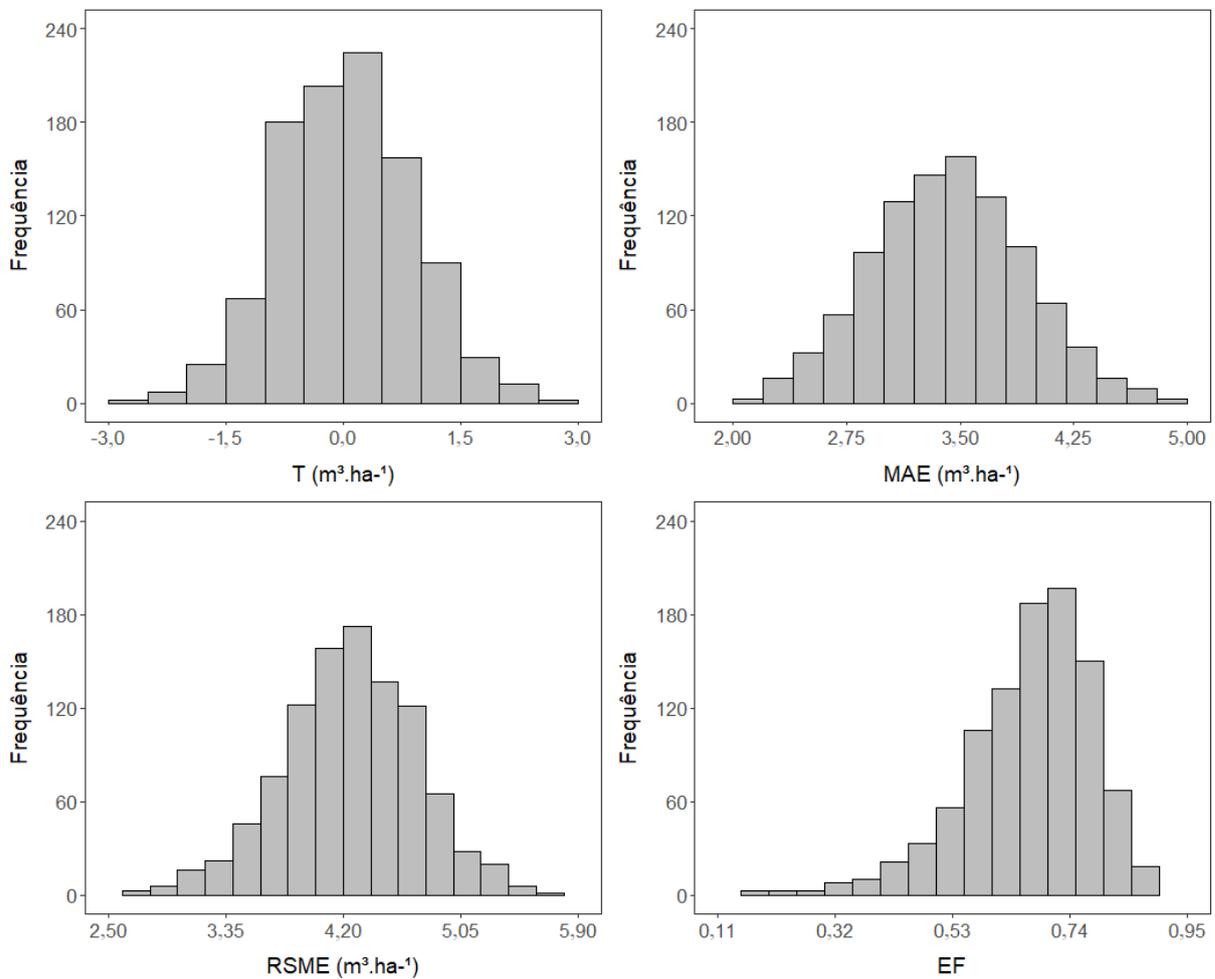


Tabela 4 - Estatísticas médias de validação e seus intervalos de confiança (95%) na estimativa da resposta absoluta do volume na idade de 15,5 anos.

Estatísticas	Média	Intervalo de confiança (95%)	
		Limite inferior	Limite superior
T ( $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$ )	0,058	-1,515	1,635
MAE ( $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$ )	3,442	2,411	4,477
RMSE ( $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$ )	4,263	3,207	5,224
EF	0,664	0,380	0,846

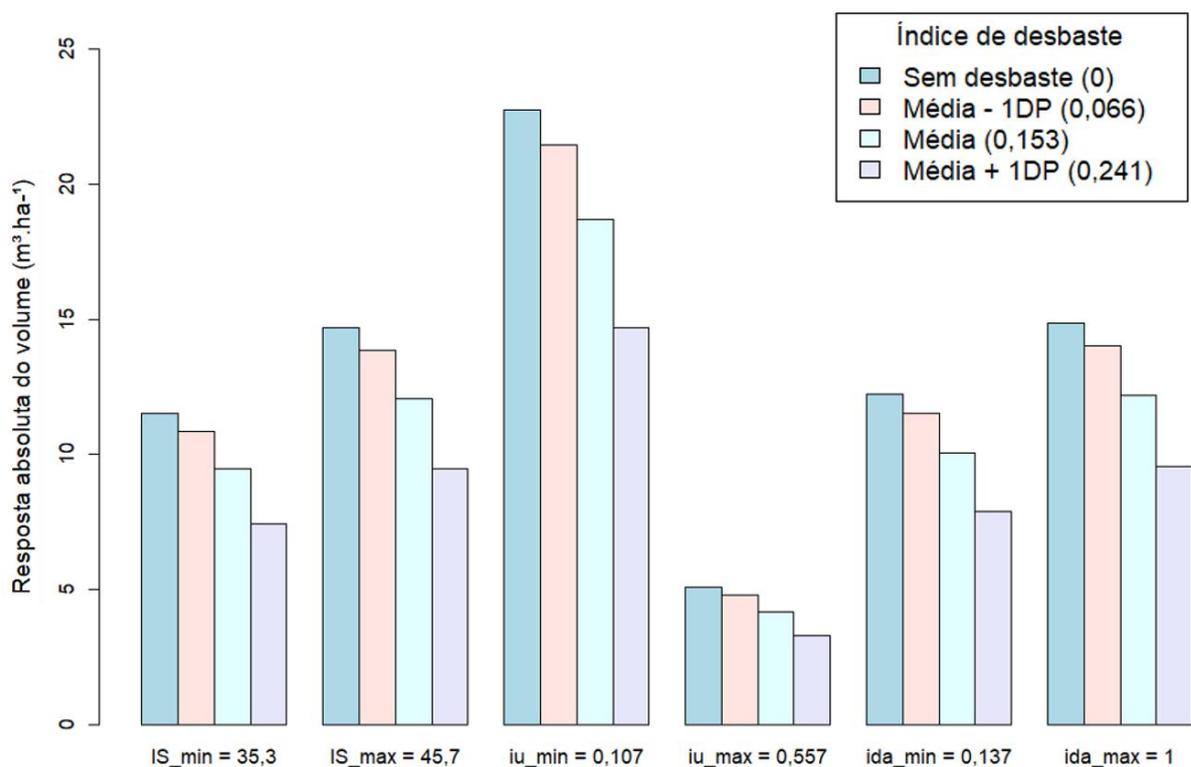
Figura 7 - Distribuição amostral das estatísticas de validação (T, MAE, RMSE e EF) calculadas para as 1000 amostras aleatorizadas pelo método *bootstrap* não paramétrico com reposição.



Por fim, com o intuito de combinar os resultados dos modelos de regressão logística e predição do volume, foram simulados cenários de respostas absolutas do volume (Figura 8) associados as probabilidades calculadas para as combinações dos diferentes índices de

desbastes com a média do índice de espaçamento relativo (0,149), conforme ilustrado na Figura 4. Para as simulações foram utilizados os valores mínimos ou máximos observados para o sítio, o índice de desbaste acumulado e o índice de uniformidade. Em cada cenário, após manter o valor mínimo ou máximo observado para a variável foco, adotou-se o valor médio observado para as demais variáveis do modelo.

Figura 8 - Respostas absolutas do volume em diferentes sítios (IS), índice de desbaste acumulado (ida) e índice de uniformidade (iu), tal que min e max representam os valores mínimo e máximo observados para cada variável. Considerou-se as probabilidades para o índice de espaçamento relativo médio observado (0,149).



Os gráficos (Figura 8) mostraram que o índice de uniformidade, de fato, é a variável que exerce maior influência nas respostas à fertilização no volume médio dos povoamentos na idade de 15,5 anos, de modo que, em locais não desbastados a diferença de volume foi de aproximadamente 17 m³.ha⁻¹ entre o menor e o maior índice de uniformidade observados.

#### 4. DISCUSSÃO

A abordagem em duas etapas foi proposta originalmente por Woollons (1998) com o intuito de solucionar problemas com a modelagem da mortalidade de árvores, e já foi aplicada em outras pesquisas subsequentes com tal finalidade (DIÉGUEZ-ARANDA *et al.*, 2005;

GONZÁLEZ *et al.*, 2004; SCOLFORO *et al.* 2019; ZHAO *et al.*, 2007). Neste estudo, essa abordagem foi introduzida com uma nova proposta: modelar o ganho adicional com a fertilização complementar na rotação intermediária para povoamentos clonais desbastados de eucalipto no Brasil. Os modelos desenvolvidos, em nível de precisão aceitável, foram capazes de explicar e quantificar as respostas em produtividade ao tratamento silvicultural aplicado para diferentes sítios, idades e intensidades de desbaste, uniformidade e espaço relativo de crescimento das árvores.

O modelo utilizando a técnica de regressão logística desenvolvido na primeira etapa se caracteriza por utilizar variáveis dependentes binárias, e o objetivo de construí-lo não é diferente ao empregar outras técnicas de regressão: encontrar o modelo mais adequado e parcimonioso, porém biologicamente consistente para descrever a relação entre uma variável dependente ou resposta, e um conjunto de variáveis independentes, preditoras ou explicativas, comumente chamadas de covariáveis (HOSMER; LEMESHOW, 2000). No modelo elaborado, a relação entre a variável resposta e a variável preditora, a qual foi representada pela interação entre o índice de desbaste e o índice de espaçamento relativo, mostrou que povoamentos submetidos a intensidade de desbaste mais severas em idades mais avançadas e que dispõem de maior espaço para o crescimento das árvores, apresentam menor probabilidade de ganhos em produtividade com a fertilização complementar na rotação intermediária.

Os povoamentos não desbastados ou com baixas intensidades de desbaste apresentam maior número de árvores remanescentes por hectare, e por isso, estão mais estocados quando comparados aos povoamentos intensamente desbastados. Como consequência, essas árvores, que dispõem de menor espaço de crescimento (índice de espaçamento relativo), estão sujeitas a um maior grau de competição (FINGER; SCHNEIDER, 1999), e, portanto, a disponibilidade de nutrientes no solo tende a ser menor. Estudos recentes demonstraram que em locais com limitações nutricionais as árvores maiores crescem mais rápido e respondem mais à fertilização na rotação intermediária comparadas às árvores de menor tamanho (ALBAUGH *et al.*, 2017; CARLSON *et al.*, 2008). O mecanismo para esse fenômeno é a maior área foliar, o que possibilita a maior captação e eficiência de uso da luz em árvores dominantes (CAMPOE *et al.*, 2013).

Essas considerações são plausíveis para justificar a melhor resposta à fertilização complementar na rotação intermediária para os tratamentos com menor intensidade de desbaste ou não desbastados, uma vez que a adição de fertilizantes nesses locais permitiu combinar a demanda nutricional das plantas com a maior disponibilidade de nutrientes no solo, os quais podem ter sido melhor aproveitados pelas árvores de maior tamanho, resultando em maiores

ganhos volumétricos. Além disso, povoamentos com alto índice de área foliar antes do desbaste geralmente não respondem à fertilização adicional conforme verificado no estudo de Albaugh *et al.* (2017) com dados de *Pinus taeda*. No entanto, não se pode afirmar que essas considerações tenham implicado na menor resposta dos locais severamente desbastados, uma vez que informações a respeito da área foliar dos povoamentos estudados não estão disponíveis.

O modelo de regressão logística ajustado também permitiu simular cenários de probabilidades de respostas na produtividade ao tratamento de fertilização complementar aplicado, empregando valores da variável preditora dentro da amplitude dos dados. Para povoamentos submetidos à desbastes mais intensos e em idades mais avançadas (média do índice de desbaste + 1 DP) e com amplo espaço de crescimento das árvores (média do índice de espaçamento relativo + 1DP), as chances de ganho são menores que 50%, ao passo que, tendem a ser praticamente nulas se for considerada a interação dos maiores valores dos índices de desbaste e de espaçamento relativo. Logo, nessas condições de floresta, não é recomendado a aplicação de fertilizantes na rotação intermediária. Para as demais situações simuladas a probabilidade foi superior a 50%, ao passo que, povoamentos não desbastados e com o menor índice de espaçamento relativo dentro da amplitude dos dados, apresentam mais de 90% de chance de ganho adicional em volume.

A simulação desses cenários é importante para a tomada de decisão dos gestores florestais, uma vez que permitem visualizar as condições da floresta que possibilitam ou limitam a probabilidade de ganhos em produtividade com a adição de fertilizantes. Scolforo *et al.* (2020) também mencionam a importância de desenvolver modelos respostas à fertilização que produzem resultados biologicamente consistentes para uma variedade de cenários, fornecendo informações que ajudarão os gestores florestais a maximizar o crescimento e a lucratividade da floresta.

Ao conhecer as condições da floresta que possibilitaram respostas na produtividade com à aplicação de fertilizantes na rotação intermediária, o passo subsequente foi quantificar esse ganho por meio do ajuste do modelo de predição do volume. A equação resultante mostrou que sítios mais produtivos, não desbastados ou com baixa intensidade de desbaste, e com uma maior amplitude diâtrica apresentaram maiores ganhos adicionais em volume na rotação final. A maior amplitude diâtrica indica uma heterogeneidade no crescimento das árvores, o que reforça a ideia de que os indivíduos maiores, possivelmente, tenham melhor aproveitado os nutrientes aplicados.

Na literatura, existem vários índices que já foram desenvolvidos para representar a uniformidade, e geralmente são positivamente correlacionados com a produtividade dos

povoamentos (FERREIRA; SANTOS, 1997; HAKAMADA *et al.*, 2015; PEREIRA FILHO, 2016; STAPE *et al.*, 2010). Porém, neste estudo, melhores respostas do volume à fertilização complementar foram observadas nos tratamentos com menor índice de uniformidade, característica de povoamentos não desbastados ou com baixa intensidade de desbaste. Oliveira (2020), ao modelar o crescimento em área basal incluindo o efeito da uniformidade para povoamentos não desbastados e desbastados de *Pinus taeda* no sul do Brasil, verificou que à medida que a intensidade de desbaste foi reduzida, menor foi a homogeneidade e a taxa de crescimento das árvores.

No que se refere a variável sítio, já era esperado que locais mais produtivos apresentassem maiores ganhos adicionais em volume no final da rotação, uma vez que apresentam taxas de crescimento mais rápidas. Além disso, a produtividade foi expressa em termos absolutos. Para respostas relativas, a tendência é que sítios de qualidade inferior sejam mais responsivos, considerando que nesses locais predomina uma competição mais simétrica (FORRESTER; BAKER, 2012; PRETZSCH; BIBER, 2010). No modelo de regressão logística proposto, a variável sítio foi removida uma vez que apresentou baixa correlação com a variável resposta, prejudicando o desempenho do modelo ajustado. No entanto, acredita-se que os locais sejam mais responsivos à fertilização na rotação intermediária de acordo com a sua capacidade produtiva (SCOLFORO *et al.*, 2020). Portanto, em estudos futuros, recomenda-se que a qualidade do local também seja representada nesse modelo.

Na modelagem do volume, considerando que algumas variações aleatórias não puderam ser explicadas pelo modelo ajustado, também é recomendado que outras variáveis do povoamento possam ser testadas. Um bom exemplo é o índice de área foliar (IAF), uma vez que apresenta forte relação com o crescimento da madeira do tronco (JOKELA; DOUGHERTY; MARTIN, 2004; MAGGARD *et al.*, 2017), sendo considerado um bom indicador de deficiências nutricionais (FLORES, 2003; VOSE; ALLEN, 1988). Rojas (2005) destaca que plantios que crescem sob baixo fornecimento de nutrientes, os quais tendem a ser mais responsivos à fertilização, atingem menor IAF. Com isso, a maximização desse índice por meio da adição de fertilizantes também possibilita aumento na produção do volume do tronco.

Desse modo, a abordagem em duas etapas proposta neste estudo possibilitou obter informações sobre a probabilidade e a magnitude das respostas à aplicação de fertilizantes na rotação intermediária em povoamentos de eucalipto desbastados no Brasil, as quais podem variar de acordo com diferentes fatores: sítio, espaço de crescimento disponível para as árvores, uniformidade, intensidade e idade do povoamento no desbaste, tempo desde o tratamento. Stoneman *et al.* (1989) ainda mencionam a importância de escolher adequadamente as taxas de

aplicação de fertilizantes para uma resposta de crescimento ótima. Gyawali e Burkhart (2015) também ressaltam que a magnitude da resposta de crescimento varia de acordo com as quantidades de elementos fertilizantes aplicados. Neste estudo todas as parcelas receberam as mesmas doses e tipos de fertilizantes, portanto, respostas distintas também poderiam ter sido observadas caso esses fatores tivessem variado. Além disso, as recomendações de fertilizantes estão associadas ao material genético e condições edafoclimáticas, fatores que também já foram documentados como importantes para definir magnitude e duração das respostas à fertilização (GAVA, 1997; GONÇALVES *et al.*, 2008).

Portanto, a fertilização e o desbaste são importantes intervenções silviculturais utilizadas para o cultivo de produtos de madeira serrada provenientes de plantios de eucalipto. De acordo com Forrester (2013) esses tratamentos silviculturais geralmente podem ser aplicados simultaneamente, mas influenciam o crescimento por meio de diferentes mecanismos, podendo interagir potencialmente entre si. Forrester *et al.* (2013) verificaram como mudanças na estrutura do povoamento, na arquitetura da copa e na nutrição das árvores podem alterar a radiação fotossinteticamente ativa absorvida e a eficiência do uso da luz, melhorando a compreensão das respostas às intervenções silviculturais em plantios de eucalipto manejados para produtos de madeira serrada.

## 5. CONCLUSÃO

A abordagem em duas etapas proposta capaz de modelar as respostas em volume à fertilização em rotação intermediária nos plantios clonais de eucalipto. O modelo de regressão logístico determina, de acordo com a idade e intensidade de desbaste e o espaçamento relativo das árvores, as chances de sucesso ou não com a adição de fertilizantes nas idades mais avançadas em povoamentos de eucalipto. Quando houver probabilidade de respostas positivas com o tratamento de fertilização aplicado, o modelo de predição de volume será capaz de quantificá-las em função da capacidade produtiva do local, intensidade de desbaste acumulada e índice de uniformidade baseado na amplitude dos diâmetros percentis 10 e 63.

A modelagem proposta neste estudo é inovadora, uma vez que trouxe informações importantes e ainda não relatadas na literatura sobre as respostas de crescimento em função de fertilização na rotação intermediária, associado a práticas de desbaste, em plantios de eucalipto no Brasil destinados a produção de madeira serrada. Os modelos desenvolvidos poderão ser utilizados pelos gestores florestais como uma ferramenta valiosa para justificar a aplicação ou não de um tratamento silvicultural adicional e determinar o regime de fertilização e desbaste

mais adequado para esses plantios, critério fundamental quando se consideram as restrições orçamentárias no setor florestal.

## REFERÊNCIAS

ALBAUGH, T. J.; ALLEN, H. L.; FOX, T. R. Historical patterns of forest fertilization in the southeastern United States from 1969 to 2004. **Southern Journal of Applied Forestry**, Washington, v. 31, n. 3, p. 129-137, 2007. DOI:10.1093/sjaf/31.3.129.

ALBAUGH, T. J. *et al.* Post-thinning density and fertilization affect *Pinus taeda* stand and individual tree growth. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 396, p. 207-216, 2017. DOI: 10.1016/j.foreco.2017.04.030.

ALLEN, H.; DOUGHERTY, P.; CAMPBELL, R. Manipulation of water and nutrients practice and opportunity in southern U.S. pine forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 30, p. 437-453, 1990. DOI:10.1016/0378-1127(90)90153-3.

ALLEN, H. L.; FOX, T. R.; CAMPBELL, R. G. What is ahead for intensive pine plantation silviculture in the south? **Southern Journal of Applied Forestry**, Washington, v. 29, n. 2, p. 62-69, 2005. DOI:10.1093/sjaf/29.2.62.

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.

ANTONY, F. *et al.* Effect of midrotation fertilization on growth and specific gravity of loblolly pine. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 39, n. 5, p. 928-35, 2009. DOI:10.1139/X09-021.

ASSMANN, E. **The principles of forest yield study**. Oxford: Pergamon Press, 506 p. 1970.

BARRETO, P. A. B. *et al.* Nitrogen balance in soil under *Eucalyptus* plantations. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 4, p. 1239-1248, 2012. DOI:10.1590/S0100-06832012000400018.

BINKLEY, D. *et al.* Explaining growth of trees and stands: light interception and efficiency of light use by *Eucalyptus* at four sites in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1704-1713, 2010. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.05.037.

CAMPOE, O. C. *et al.* Fertilization and irrigation effects on tree level aboveground net primary production, light interception and light use efficiency in a loblolly pine plantation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 288, p. 43-48, 2013. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.05.026.

CARLSON, C. A. *et al.* Modeling mid-rotation fertilizer responses using the age-shift approach. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 256, p. 256-262, 2008. DOI:10.1016/j.foreco.2008.04.020.

CHANG, Y. Predicting fire occurrence patterns with logistic regression in Heilongjiang Province, China. **Landscape Ecology**, v. 28, n. 10, p. 1989-2004, 2013. DOI: 10.1007/s10980-013-9935-4.

DIÉGUEZ-ARANDA, U. *et al.* Modelling mortality of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantations in the northwest of Spain. **European Journal of Forest Research**, Georgetown, v. 124, p. 143-153, jan. 2005. DOI: 10.1007/s10342-004-0043-5.

FERRAZ FILHO, A. C. **Management of Eucalyptus plantations for solid wood production.** 127 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

FERRAZ FILHO, A. C. *et al.* Thinning regimes and initial spacing for *Eucalyptus* plantations in Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 90, n. 1, p. 255-265, 2018.

FERREIRA, M.; SANTOS, P. E. T. Melhoramento genético florestal dos *Eucalyptus* no Brasil: breve histórico e perspectivas. *In: IUFRO Conference on Silviculture and Improvement of Eucalypts*, 1997, Salvador. **Proceedings** [...]. Colombo: Embrapa, v. 1, p. 14-34, 1997.

FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R. Determinação do peso do desbaste para florestas de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, com base no índice de espaçamento relativo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 9, n. 1, p. 79-87, 1999.

FLORES, F. J. **Using remote sensing data to estimate leaf area index and foliar nitrogen of loblolly pine plantations.** 102 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - North Carolina State University, Raleigh, 2003.

FORRESTER, D. I.; BAKER, T. G. Growth responses to thinning and pruning in *Eucalyptus globulus*, *Eucalyptus nitens*, and *Eucalyptus grandis* plantations in southeastern Australia. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 42, n. 1, p. 75-87, 2012. DOI:10.1139/X11-146.

FORRESTER, D. I. *et al.* Effect of thinning, pruning and nitrogen fertiliser application on light interception and light-use efficiency in a young *Eucalyptus nitens* plantation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 288, 21-30, 2013. DOI: 10.1016/j.foreco.2011.11.024.

FORRESTER, D. I. Growth responses to thinning, pruning and fertiliser application in *Eucalyptus* plantations: a review of their production ecology and interactions. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 310, p. 336-347, 2013. DOI:10.1016/j.foreco.2013.08.047.

FOX, T. R. *et al.* Tree nutrition and forest fertilization of pine plantations in the southern United States. **Southern Journal of Applied Forestry**, Washington, v. 31, n. 1, p. 5-11, 2007. DOI:10.1093/sjaf/31.1.5.

GAVA, J. L. Efeito da adubação potássica em plantios de *E. grandis* conduzidos em segunda rotação em solos com diferentes teores de potássio trocável. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 11, n. 30, p. 89-94, 1997.

GONÇALVES, J. L. M. *et al.* Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the brazilian experience. **Southern Forests**, Oxford, v. 70, n. 2, p. 105-118, 2008. DOI:10.2989/south.for.2008.70.2.6.534.

GONZÁLEZ, J. G. A. *et al.* A two-step mortality model for even-aged stands of *Pinus radiata* D. Don in Galicia (Northwestern Spain). **Annals of Forest Science**, Les Ulis, v. 61, p. 439-448, 2004. DOI: 10.1051/forest:2004037.

GYAWALI, N.; BURKHART, H. General response functions to silvicultural treatments in loblolly pine plantations. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 45, p. 252-265, 2015. DOI: 10.1139/cjfr-2014-0172.

HAKAMADA, R. E. *et al.* Uso do inventário florestal e da uniformidade entre árvores como ferramenta de monitoramento da qualidade silvicultural em plantios clonais de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 105, p. 27-39, 2015.

HILBE, J. M. **Practical guide to logistic regression**. Taylor & Francis: CRC Press, 2015. 152 p.

HOSMER, D. W.; LEMESHOW, S. **Applied Logistic Regression**. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, 2000. 392 p.

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório da IBÁ 2019, ano base 2018**, 2019.

JOKELA, E.; DOUGHERTY, P. M.; MARTIN, T. A. Production dynamics of intensively managed loblolly pine stands in the southern United States: a synthesis of seven long-term experiments. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 192, p. 117-130, 2004. DOI: 10.1016/j.foreco.2004.01.007.

KOZAK, A.; KOZAK, R. Does cross validation provide additional information in the evaluation of regression models? **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 33, n. 6, p. 976-987, 2003. DOI: 10.1139/X03-022.

LEITE, F. P. *et al.* Nutrient relations during an eucalyptus cycle at different population densities. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 949-959, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000300029.

MAGGARD, A. O. *et al.* Fertilization can compensate for decreased water availability by increasing the efficiency of stem volume production per unit of leaf area for loblolly pine (*Pinus taeda*) stands. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 47, p. 445-457, 2017. DOI: 10.1139/cjfr-2016-0422.

MARTINS, L. G. C. **Método de recomendação de adubação para eucalipto com base no monitoramento nutricional**. 72 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

MCINNIS, L. M. *et al.* Growth response of *Pinus taeda* L. to herbicide, prescribed fire, and fertilizer. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 199, p. 231-242, 2004. DOI:10.1016/j.foreco.2004.05.038.

MCTAGUE, J. P.; BAILEY, R. L. Compatible basal area and diameter distribution models for thinned loblolly pine plantations in Santa Catarina, Brazil. **Forest Science**, Lawrence, v. 33, n. 1, p. 43-51, 1987.

NUTTO, L.; SPATHELF, P.; SELING, I. Management of individual tree diameter growth and implications for pruning for brazilian *Eucalyptus Grandis* Hill Ex Maiden. **Floresta**, Curitiba, v. 36, n. 6, p. 397-413, 2006. DOI: 10.5380/rf.v36i3.7519.

OLIVEIRA, X. M. **Manejo e seu efeito na forma, estrutura e crescimento de povoamentos de *Pinus taeda* no sul do Brasil**. 188 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2020.

PEREIRA FILHO, G. M. **Qualidade em povoamento de eucalipto: índice de uniformidade, época do replantio e relação entre o alto fuste e a talhadia**. 40 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

PIENAAR, L. V.; RHENEY, J. W. Yield prediction for mechanically site prepared slash pine plantations in the southeastern coastal plain. **Southern Journal of Applied Forestry**, Washington, v. 17, n. 4, p. 163-173, 1993.

PIENAAR, L.; RHENEY, J. W. Modeling stand level growth and yield response to silvicultural treatments. **Forest Science**, Lawrence, v. 41, n. 3, p. 629-638, 1995.

PRETZSCH, H.; BIBER, P. Size-symmetric versus size-asymmetric competition and growth partitioning among trees in Forest Stands along an ecological gradient in Central Europe.

**Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 40, n. 2, p. 370-384, 2010. DOI: 10.1139/X09-195.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2021. Disponível em: <https://www.R-project.org>. Acesso em: 22 nov. 2021.

RAMÍREZ ALZATE, M. V. *et al.* Mid-rotation response to fertilizer by *Pinus radiata* D. Don at three contrasting sites. **Journal of Forest Science**, v. 62, n. 4, p. 153-162, 2016. DOI: 10.17221/106/2015-JFS.

RIBEIRO, M. S. S. B. *et al.* Avaliação da produção de biomassa do fuste de um clone híbrido de eucalipto sob diferentes espaçamentos. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 1, p. 31-45, 2017. DOI: 10.5902/1980509826445.

ROJAS, J. **Factors influencing responses of loblolly pine stands to fertilization**. 147 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - North Carolina State University, Raleigh, 2005.

SCOLFORO, H. F. *et al.* A new approach for modeling volume response from mid-rotation fertilization of *Pinus taeda* L. plantations. **Forests**, Basiléia, v. 11, n. 6, p. 1-14, 2020. DOI:10.3390/f11060646.

SCOLFORO, H. F. *et al.* Modeling whole-stand survival in clonal eucalypt stands in Brazil as a function of water availability. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 432, p. 1002-1012, 2019. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.10.044.

SMOLSKI, F. M. S. **Regressão Logística**. In: BATTISTI, I. D. E.; SMOLSKI, F. M. S. **Software R: curso avançado**, Chapecó: UFFS, 2019. Disponível em: <https://smolski.github.io/livroavancado/index.html>. Acesso em: 06 abr. 2022.

STAPE, J. L. *et al.* The Brazil *Eucalyptus* potential productivity project: influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1684-1694, 2010. DOI: 10.1016/j.foreco.2010.01.012.

STONEMAN, G. L. *et al.* Growth and water relations of *Eucalyptus marginata* (jarrah) stands in response to thinning and fertilization. **Tree Physiology**, Oxford, v. 17, n. 4, p. 267-274, 1997. DOI: 10.1093/treephys/17.4.267.

VOSE, J. M.; ALLEN, H. L. Leaf area, stemwood growth, and nutrition relationships in loblolly pine. **Forest Science**, Lawrence, v. 34, n. 3, p. 547-563, 1988. DOI: 10.1093/forestscience/34.3.547.

WICKHAM, H. **ggplot2**: Elegant Graphics for Data Analysis. New York: Springer-Verlag, 216 p. 2009.

WOOLLONS, R. C. Even-aged stand mortality estimation through a two-step regression process. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 105, p. 189-195, 1998. DOI: 10.1016/S0378-1127(97)00279-X.

WOOLLONS, R. C.; WHYTE, A. G. D.; MEAD, D. J. Long-term growth responses in *Pinus Radiata* fertilizer experiments. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Rotorua, v. 18, n. 2, p. 199-209, 1988.

ZHAO, D. *et al.* Modeling mortality of second-rotation loblolly pine plantations in the Piedmont/Upper Coastal Plain and Lower Coastal Plain of the southern United States. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 252, p. 132-143, 2007. DOI: 10.1016/j.foreco.2007.06.030.

ZHAO, D.; KANE, M.; BORDERS, B. E. Crown ratio and relative spacing relationships for loblolly pine plantations. **Open Journal of Forestry**, v. 2, n. 3, p. 107-112, 2012. DOI:10.4236/ojf.2012.23014.

**ARTIGO 2: Modelagem do crescimento em altura dominante com parâmetros expandidos por tratamentos silviculturais e variáveis climáticas para plantios clonais de eucalipto no Brasil**

**RESUMO**

O potencial produtivo dos locais é comumente avaliado com base no índice de sítio, definido como a altura média das árvores dominantes em uma idade de referência. No entanto, o uso desta única variável para avaliar a qualidade do local tem sido argumentado como incompleto, sugerindo a necessidade da inclusão de covariáveis influentes para aumentar o desempenho da modelagem. O objetivo desta pesquisa foi desenvolver um conjunto compatível de equações de crescimento para prever e projetar a altura dominante de *Eucalyptus grandis* com parâmetros refinados por tratamentos silviculturais e variáveis climáticas. O conjunto de dados utilizado é composto de três experimentos, os quais foram instalados nos estados da Bahia e do Espírito Santo, e compreenderam dois blocos (com e sem fertilização) e doze tratamentos de desbaste que se diferiram em número, idade e intensidade. Cada tratamento de desbaste foi constituído de quatro parcelas idênticas (duas em cada bloco) instaladas de forma contínua. Os povoamentos foram plantados em 1999 e os inventários florestais conduzidos no período de 2001 a 2014. Quatro formulações de modelos concorrentes foram testadas e um parâmetro comum do melhor conjunto compatível de equações de crescimento foi refinado para testar a magnitude do efeito silvicultural e climático na predição e projeção da altura dominante. O conjunto compatível de equações de crescimento de Lundqvist apresentou as estimativas mais precisas. O parâmetro assíntota comum entre os modelos de crescimento selecionados, expandidos em função do índice de desbaste, do indicativo de fertilização e da temperatura mínima, possibilitou ganhos de precisão ao prever e projetar a altura dominante de plantios clonais de eucalipto no Brasil. O conjunto de equações de crescimento desenvolvido possui a capacidade de realizar predições e projeções de curto, médio e longo prazo com maior precisão e segurança sobre o comportamento biológico, sendo recomendado para atualizar inventários e avaliar o potencial de crescimento de áreas sem registro prévio de plantios florestais baseado na combinação de fatores silviculturais e histórico climático.

**PALAVRAS-CHAVE: Índice de sítio. Índice de desbaste. Fertilização. Temperatura mínima.**

## **Modeling growth in dominant height with parameters expanded by silvicultural treatments and climatic variables for clonal eucalyptus plantations in Brazil**

### **ABSTRACT**

The productive potential of sites is commonly assessed based on the site index, defined as the average height of dominant trees at a reference age. However, the use of this single variable to assess site quality has been argued to be incomplete, suggesting the need to include influential covariates to increase modeling performance. The objective of this research was to develop a compatible set of growth equations to predict and project the dominant height of *Eucalyptus grandis* with parameters refined by silvicultural treatments and climatic variables. The dataset used is composed of three experiments, which were installed in the states of Bahia and Espírito Santo, and comprised two fertilization blocks and twelve thinning treatments that differed in number, age and intensity. Each thinning treatment consisted of four identical plots (two in each fertilization block) installed continuously. Stands were planted in 1999 and forest inventories were conducted from 2001 to 2014. Four competing model formulations were tested and a common parameter of the best compatible set of growth equations was refined to test the magnitude of the silvicultural and climatic effect on the prediction and projection of the dominant height. The compatible set of Lundqvist growth equations gave the most accurate estimates. The asymptote parameter common among the selected growth models, expanded as a function of the thinning index, the fertilization indicator and the minimum temperature, enabled gains in precision when predicting and projecting the dominant height of eucalyptus clonal plantations in Brazil. The set of growth equations developed has the ability to make short, medium and long-term predictions and projections with greater precision and safety on biological behavior, being recommended to update inventories and assess the growth potential of areas without previous records of plantations. forests based on a combination of silvicultural factors and climatic history.

**KEYWORDS:** Site index. Thinning index. Fertilization. Minimum temperature.

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do setor florestal brasileiro e o aumento da demanda do mercado por produtos madeireiros requerem a aplicação de técnicas adequadas de inventários e manejos florestais para realizar um diagnóstico completo e preciso da produtividade florestal (FERRAZ FILHO *et al.*, 2011). O potencial produtivo dos povoamentos florestais é comumente identificado por meio da avaliação da qualidade do local (BURKHART; TOMÉ, 2012). Historicamente, o índice do sítio, definido como a altura média das árvores dominantes do povoamento em uma idade de referência estabelecida, tem sido aplicado com essa finalidade (PENG, 2000), uma vez que sua principal vantagem é a simplicidade e robustez para avaliar a qualidade do local (SCOLFORO *et al.*, 2020).

A ideia de que a altura dominante é independente da densidade do povoamento foi o ponto de partida para que essa variável pudesse ser utilizada para representar o índice de sítio. No entanto, alguns estudos já tem demonstrado que tratamentos de desbaste podem afetar o crescimento da altura dominante. Gyawali e Burkhardt (2015) incorporaram uma função resposta ao desbaste em modelo de altura dominante para *Pinus taeda*, e verificaram, um pequeno, porém significativo, impacto negativo desse tratamento silvicultural no crescimento da variável em questão. Zapata-cuartas *et al.* (2021) também constataram este efeito negativo ao modelar a altura dominante expandindo o parâmetro da assíntota em função da intensidade de desbaste. Ferraz Filho *et al.* (2018) observaram que idades mais jovens e intensidades de desbaste mais severas ocasionaram mudanças maiores nos valores da altura das 100 e 200 árvores mais grossas por hectare.

O potencial produtivo dos locais também pode ser afetado por outras práticas silviculturais como a fertilização. Em plantios de *Pinus taeda* nos Estados Unidos já foram relatadas as respostas significativas no crescimento da altura dominante das árvores em razão da aplicação de fertilizantes na rotação intermediária, especialmente por nitrogênio e fósforo (HYNENEN; BURKHART; ALLEN, 1998; AMATEIS *et al.*, 2000; MCTAGUE, 2008; GYAWALI; BURKHART, 2015). No caso dos plantios de eucalipto no Brasil, quando fertilizados inicialmente de maneira adequada, com dossel bem estruturado aos dois anos de idade, o uso de nutrientes através dos ciclos biogeoquímicos é altamente eficiente, sendo pouco responsivos à fertilização adicional (STAPE, 2002; GONÇALVES *et al.*, 2008). Estas ponderações são relevantes quando se consideram os plantios conduzidos em rotações curtas, como ocorre com a maioria das florestas de eucalipto do Brasil, as quais são caracterizadas por altas densidades de plantio, poucas intervenções silviculturais após o estabelecimento, alta sensibilidade às variações climáticas e conduzidos principalmente para produção de celulose e

energia (FERRAZ FILHO; SCOLFORO; MOLA-YUDEGO, 2014). No entanto, para os plantios de eucalipto manejados em rotação longa essas respostas ainda não foram bem estabelecidas.

Para auxiliar e simplificar o diagnóstico de produtividade florestal geralmente são utilizados modelos estatísticos. Os mais empregados para essa finalidade são os modelos empíricos, uma vez que fornecem de maneira simples estimativas do potencial produtivo dos povoamentos (FERRAZ FILHO *et al.*, 2011). Esses modelos geralmente são calibrados com dados de parcelas permanentes de uma floresta, e acredita-se que neles a altura dominante já integra os efeitos do clima e do solo na produtividade florestal (ILES, 2003). No entanto, alguns autores tem argumentado que somente o uso da variável altura dominante pode comprometer a capacidade explicativa do modelo se a história do clima mudar ao longo do tempo, levando a inferências impróprias (CASNATI, 2016). Scolforo *et al.* (2013) relataram que os modelos descritivos não são sensíveis às variações climáticas interanuais o que pode comprometer a precisão das estimativas.

Neste contexto, a literatura tem sugerido a necessidade de incluir covariáveis poderosas para aumentar o desempenho da modelagem, e uma abordagem destacada é o uso de equações estatísticas de crescimento com parâmetros expandidos por variáveis climáticas (WEISKITTEL *et al.*, 2011). Para os plantios clonais de eucalipto no Brasil essa abordagem ainda não é bem consolidada, e as pesquisas desenvolvidas nesse sentido mostraram não haver um consenso único entre quais ou qual a variável climática é mais adequada para aumentar a capacidade explicativa dos modelos de crescimento em altura dominante, apesar de que, a precipitação tem se destacado para fornecer melhorias na maior parte dos casos.

Ferraz Filho *et al.* (2011) avaliaram o efeito da inserção da precipitação mensal média e radiação solar média no parâmetro de inclinação do modelo de Chapman-Richards, e constataram ganho de 19,8% na precisão das projeções da altura dominante com a inclusão das variáveis climáticas. Scolforo *et al.* (2013) verificaram ganhos de precisão ao modificar o parâmetro da assíntota do modelo de Chapman-Richards em função da precipitação média mensal e da temperatura. Scolforo *et al.* (2016) também constataram que a inserção da precipitação na assíntota do modelo biomatemático de Chapman-Richards modificado aumentou a capacidade explicativa da equação de crescimento ajustada e proporcionou flexibilidade para atualização de acordo com as variações climáticas interanuais.

Portanto, existe a necessidade de investigar melhor como tratamentos silviculturais e flutuações climáticas podem interferir no potencial produtivo de plantios de eucalipto no Brasil conduzidos em rotação longa. Em termos práticos, é preciso que sejam desenvolvidas equações

de crescimento generalizadas considerando os fatores que limitam a produtividade e que sejam capazes de explicar de forma mais real possível o comportamento do crescimento das árvores diante da associação genótipo/manejo/clima, possibilitando assim atualizar com precisão o inventário florestal ao fazer projeções de longo prazo. Este tipo de modelagem permitirá simular como a variação climática pode afetar a qualidade do local ao longo do gradiente climático, bem como estabelecer critérios na escolha de tratamentos silviculturais mais adequados para otimizar o potencial produtivo do local.

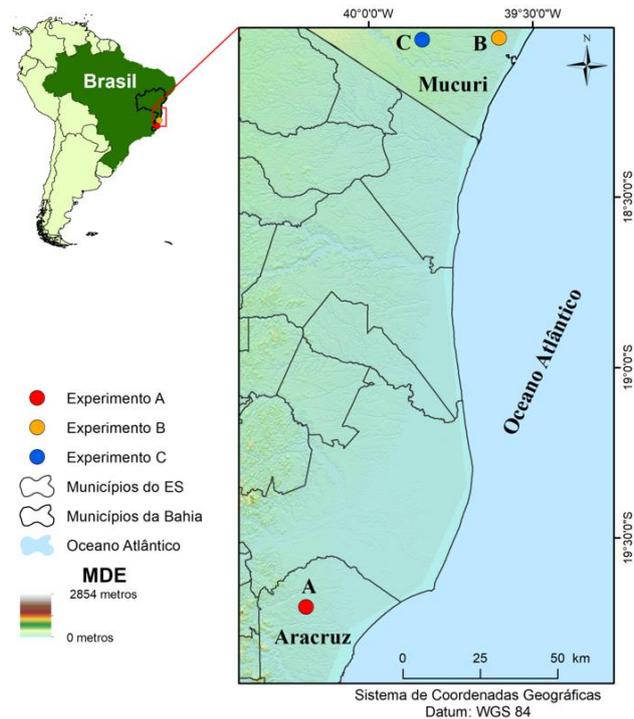
O objetivo deste estudo foi (1) testar equações de crescimento concorrentes para prever e projetar simultaneamente a altura dominante em plantios clonais de eucalipto conduzidos até a idade aproximada de 15,5 anos; (2) incluir variáveis representativas de desbaste, fertilização e clima no parâmetro da assíntota das equações de crescimento em altura dominante selecionadas visando aumentar sua capacidade explicativa; (3) validar o desempenho de um novo conjunto compatível de equações de predição e projeção de crescimento em altura dominante expandido em função de tratamentos silviculturais e variáveis climáticas.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Área de estudo**

As áreas de estudo (experimentos A, B e C) estão localizadas nos municípios de Aracruz, no estado do Espírito Santo, e Mucuri, no estado da Bahia, entre as coordenadas 18°01'54"S a 19°41'55"S de latitude e 39°36'09"W a 40°12'11"W de longitude (Figura 1). De acordo com Alvares *et al.* (2013), os climas dos locais são caracterizados como tropical de inverno seco (Aw) no estado do Espírito Santo, e tropical sem estação seca (Af) no estado da Bahia, em que essas tipologias climáticas apresentam precipitação média anual variando entre 1300 e 1600 mm, altitude média abaixo de 100 metros e temperatura média anual entre 22 e 24°C. O relevo é plano, e conforme os resultados da análise de solo, as regiões apresentam Argissolo Amarelo distrófico de textura arenosa/média a arenosa/argilosa.

Figura 1 - Localização dos experimentos A, B e C.



## 2.2 Caracterização dos experimentos

Os dados provêm de povoamentos de *Eucalyptus grandis* implantados no ano de 1999, com espaçamento 3,0 m x 3,0 m, e, portanto, densidade inicial de 1111 árvores por hectare. Foram conduzidos em três experimentos (Tabela 1), cada um deles com doze tratamentos de desbastes (seletivo e sistemático), os quais se diferem entre si em número (nenhum, um ou dois desbastes), idade e intensidade (número de árvores remanescentes após o desbaste).

Todos os tratamentos de desbaste foram constituídos de quatro parcelas (repetições) idênticas, instaladas de forma contínua, totalizando quarenta e oito parcelas por experimento. O tamanho das parcelas variou de acordo com o número de árvores remanescentes, tal que os tratamentos com desbastes mais intensos receberam parcelas maiores. A área das parcelas variou entre 438 m<sup>2</sup> para as parcelas não desbastadas até 1034 m<sup>2</sup> para os tratamentos com densidade final de 150 árvores por hectare.

Tabela 1 - Caracterização dos tratamentos de desbaste (Trat.) de cada experimento (Exp.).

Exp.	Trat.	N.ha <sup>-1</sup> inicial	Idade 1º desbaste	N.ha <sup>-1</sup> após 1º desbaste	Idade 2º desbaste	N.ha <sup>-1</sup> após 2º desbaste
	1		-	-	-	-
	2		3,5	600	6,4	300
	3		3,5	300	-	-
	4		3,5	150	-	-
	5		3,5	600	6,4	150
A	6	1111	5	450	-	-
	7		5	450	7	250
	8		2,5	600	5,5	300
	9		2,5	600	5,5	150
	10		2,5	300	-	-
	11		2,5	150	-	-
	12		-	-	-	-
	1		-	-	-	-
	2		3,5	600	6,3	300
	3		3,5	300	-	-
	4		3,5	150	-	-
	5		3,5	600	6,3	150
B	6	1111	5	450	-	-
	7		5	450	7	250
	8		2,5	600	5,5	300
	9		2,5	600	5,5	150
	10		2,5	300	-	-
	11		2,5	150	-	-
	12		-	-	-	-
	1		-	-	-	-
	2		3,1	600	6,1	300
	3		3,1	300	-	-
	4		3,1	150	-	-
	5		3,1	600	6,1	150
	6		4,6	450	-	-
C	7	1111	4,6	450	6,6	250
	8		2,1	600	5,1	300
	9		2,1	600	5,1	150
	10		2,1	300	-	-
	11		2,1	150	-	-
	12		-	-	-	-

N.ha<sup>-1</sup> representa o número de árvores por hectare.

Quadro 1 - Distribuição das parcelas nos diferentes tratamentos de desbaste (T1 a T12) e blocos de fertilização complementar (BI – com fertilização e BII – sem fertilização) de cada experimento.

Experimento A												
	T9	T5	T1	T8	T7	T4	T12	T3	T2	T10	T11	T6
BII	4	5	12	13	20	21	28	29	36	37	44	45
	3	6	11	14	19	22	27	30	35	38	43	46
BI	2	7	10	15	18	23	26	31	34	39	42	47
	1	8	9	16	17	24	25	32	33	40	41	48
Experimento B												
	T2	T3	T1	T4	T6	T7	T5	T8	T12	T10	T11	T9
BII	4	5	12	13	20	21	28	29	36	37	44	45
	3	6	11	14	19	22	27	30	35	38	43	46
BI	2	7	10	15	18	23	26	31	34	39	42	47
	1	8	9	16	17	24	25	32	33	40	41	48
Experimento C												
	T9	T5	T1	T8	T7	T4	T12	T3	T2	T10	T11	T6
BII	4	5	12	13	20	21	28	29	36	37	44	45
	3	6	11	14	19	22	27	30	35	38	43	46
BI	2	7	10	15	18	23	26	31	34	39	42	47
	1	8	9	16	17	24	25	32	33	40	41	48

Para instalar o tratamento de fertilização complementar na rotação intermediária, cada tratamento de desbaste foi dividido em dois blocos com duas parcelas (repetições) contínuas (Quadro 1). No bloco I as parcelas receberam fertilizações complementares em dois momentos: setembro de 2003 com 37 kg.ha<sup>-1</sup> de nitrogênio (N), 60 kg.ha<sup>-1</sup> de fósforo (P), 110 kg.ha<sup>-1</sup> de potássio (K) e 1,4 t.ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico; e setembro de 2004 com 37 kg.ha<sup>-1</sup> de N e 110 kg.ha<sup>-1</sup> de K. No bloco II as parcelas não receberam nenhuma fertilização complementar na rotação intermediária.

As demais operações silviculturais executadas antes, durante e depois do plantio foram as mesmas para todos os experimentos. No pré-plantio, foram realizados o controle de plantas daninhas com glifosato (duas aplicações 1 ano antes) e subsolagem de 40 a 60 cm de profundidade. A fertilização executada durante o plantio foi de 2 t.ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico, 14 kg.ha<sup>-1</sup> de N, 29 kg.ha<sup>-1</sup> de P, 11 kg.ha<sup>-1</sup> de K, e ainda 56 kg.ha<sup>-1</sup> de P aplicados durante a operação de subsolagem. Já para fertilização pós-plantio foram aplicados 100 kg.ha<sup>-1</sup> de K na idade de um ano e seis meses; e 20 kg.ha<sup>-1</sup> de N e 50 kg.ha<sup>-1</sup> de K na idade de dois anos e nove meses. Também foram realizadas aplicações de glifosato para combater a mato competição periodicamente, conforme a necessidade, até a idade de 9 anos.

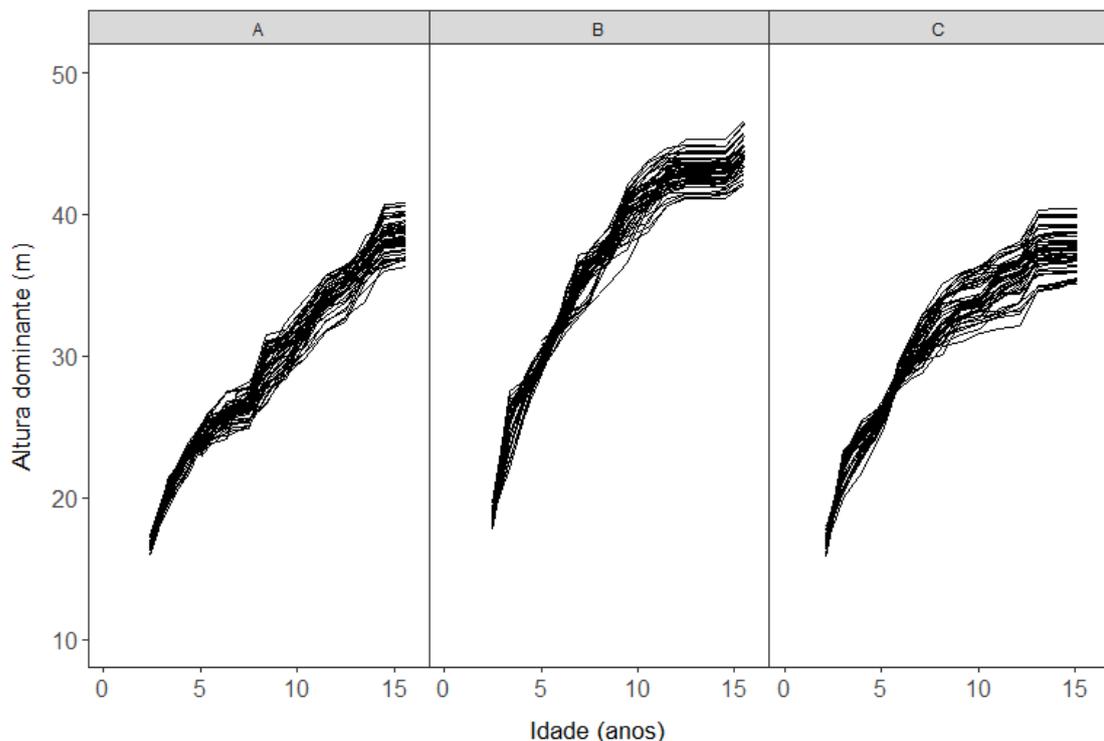
### 2.3 Descrição do banco de dados e das variáveis utilizadas

O inventário florestal foi conduzido periodicamente de 2001 a 2014, e em cada ocasião foram mensurados o diâmetro à altura de 1,3 metros (dap) e a altura total (ht) de todos os indivíduos das parcelas. A altura dominante (hd) seguiu o conceito de Assmann (1970), sendo considerada a média da altura total das 100 árvores com maior dap por hectare. As estatísticas descritivas gerais dos experimentos em relação à altura dominante (Tabela 2), bem como a análise gráfica (Figura 2), permitiram observar, que em geral, o melhor crescimento em altura dominante ocorre no experimento B. Nos demais experimentos, A e C, o comportamento no crescimento da variável em questão é semelhante, embora o experimento C apresente uma maior amplitude de altura dominante nas idades mais avançadas

Tabela 2 – Estatísticas descritivas gerais da altura dominante (hd) para cada experimento.

Experimento	Mínima (m)	Média (m)	Máxima (m)
A	15,93	29,87	40,86
B	17,70	36,99	46,65
C	15,78	31,41	40,40

Figura 2 – Crescimento da altura dominante por experimento.



Para avaliar o impacto do desbaste no crescimento da altura dominante foi empregado o índice de desbaste (1) baseado no termo  $N_b$ , o qual representa o número de árvores sobreviventes por hectare antes do último desbaste (PIENAAR, RHENEY; 1993).

$$id_{jn} = \frac{Nt_{jn}It_{jn}}{Nb_{jn}I} \quad (1)$$

$id_{jn}$ : Índice de desbaste;  $Nt_{jn}$ : número de árvores por hectare removidas no último desbaste;  $Nb_{jn}$ : número de árvores por hectare sobreviventes anterior ao último desbaste;  $It_{jn}$ : idade (anos) do último desbaste;  $I$ : idade do povoamento (anos). Os subscritos  $jn$  representam o  $j$ -ésimo tratamento de desbaste do  $n$ -ésimo experimento.

As informações climáticas (Tabela 3) foram obtidas por meio da grade dos dados meteorológicos diários e mensais do Brasil, com resolução espacial de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ , cobrindo o período de 1980 até 2017 (XAVIER, 2020). As fontes dos dados são do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a Agência Nacional de Águas (ANA) e o Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE), obtidas de pluviômetros e estações meteorológicas distribuídos por todo território brasileiro (XAVIER *et al.*, 2016).

Xavier (2020) utilizou a abordagem de validação cruzada, que compara pontualmente dados observados com estimativas interpoladas, para selecionar o melhor esquema de interpolação para cada variável climática estudada. Os dados são disponibilizados em formato NetCDF, e a conversão no formato CSV para as coordenadas de interesse foi realizada empregando o software Python versão 3.9.2. Outras informações sobre a grade de dados climatológicos diários e mensais do Brasil podem ser obtidas em Xavier *et al.* (2016).

Tabela 3 – Dados climáticos referentes ao período de 1999 até 2014 para cada experimento.

Variável	Experimento	Mínima	Média	Máxima
Precipitação (P) mm.ano <sup>-1</sup>	A	1191	1344	1416
	B	1289	1372	1540
	C	1192	1285	1441
Dias de chuva (DC) acima de 1mm	A	157	164	183
	B	162	170	190
	C	149	156	175
Evapotranspiração (ETO) mm.ano <sup>-1</sup>	A	1353	1376	1415
	B	1388	1398	1427
	C	1393	1405	1435
Radiação solar (RS) MJ.m <sup>-2</sup>	A	17,44	17,58	17,86
	B	17,47	17,65	18,01
	C	17,51	17,68	18,02
Temperatura Mínima (Tmin) °C	A	20,55	20,76	20,84
	B	20,83	20,91	20,99
	C	20,59	20,67	20,77
Temperatura Média (Tmed) °C	A	25,29	25,38	25,55
	B	24,82	24,98	25,04
	C	24,73	24,90	24,95
Temperatura Máxima (Tmax) °C	A	29,80	30,04	30,35
	B	28,80	29,08	29,17
	C	28,84	29,15	29,26

#### 2.4 Modelagem de crescimento em altura dominante

O ajuste simultâneo de equações compatíveis de predição e projeção do crescimento em altura dominante foi realizado para quatro modelos: Logístico, Chapman-Richards, Lundqvist e Schumacher (Tabela 4). Os modelos de crescimento selecionados permitem impor condições lógicas na modelagem de dados biológicos por meio da interpretação de seus coeficientes (BURKHART; TOMÉ, 2012). Além disso, o comportamento adequado desses modelos já foi verificado para estimar a altura dominante em povoamentos clonais de eucalipto no Brasil (MAESTRI, 2003; CALEGARIO *et al.*, 2005; FERRAZ FILHO *et al.*, 2011; SCOLFORO *et al.*, 2016; SCOLFORO *et al.*, 2020).

Tabela 4 – Modelos testados para prever e projetar simultaneamente a altura dominante em plantios de eucalipto clonal.

Denominação	Modelo base	Parâmetro relacionado a Z	Solução para Z	Modelo dinâmico	Conjunto compatível de modelos de crescimento
Logístico	$hd = a/(1 + b \exp^{-ci})$	$a = Z$	$Z_1 = hd_1(1 + b \exp^{-ci_1})$	$hd_2 = Z_1/(1 + b \exp^{-ci_2})$	MA1
	$hd = a/(1 + b \exp^{-ci})$	$b = Z$	$Z_1 = (a - hd_1)/(hd_1 \exp^{-ci_1})$	$hd_2 = a/(1 + Z_1 \exp^{-ci_2})$	MP1
Chapman-Richards	$hd = a(1 - \exp(bi))^c$	$a = Z$	$Z_1 = \frac{hd_1}{(1 - \exp(bi_1))^c}$	$hd_2 = Z_1(1 - \exp(bi_2))^c$	MA2
	$hd = a(1 - \exp(bi))^c$	$c = Z$	$Z_1 = \frac{\ln(hd_1/a)}{\ln(1 - \exp(bi_1))}$	$hd_2 = a(1 - \exp(bi_2))^{Z_1}$	MP2
Lundqvist	$hd = a \exp(bi^{-c})$	$a = Z$	$Z_1 = \frac{hd_1}{\exp(bi_1^{-c})}$	$hd_2 = Z_1 \exp(bi_2^{-c})$	MA3
	$hd = a \exp(bi^{-c})$	$b = Z$	$Z_1 = \frac{-\ln(hd_1/a)}{i_1^{-c}}$	$hd_2 = a \exp(-Z_1 i_2^{-c})$	MP3
Schumacher	$hd = a \exp(bi^{-1})$	$\ln(a) = Z$	$Z_1 = \ln hd_1 - b/i_1$	$hd_2 = \exp(Z_1 + b/i_2)$	MA4
	$hd = a \exp(bi^{-1})$	$b = Z$	$Z_1 = (\ln hd_1 - \ln a) i_1$	$hd_2 = \exp(\ln a + (Z_1/i_2))$	MP4

$hd$ : altura dominante (m);  $i$ : idade do povoamento (em anos);  $i_1$  e  $i_2$ : idade no tempo 1 e no tempo 2, respectivamente;  $a$ ,  $b$  e  $c$ : parâmetros a serem ajustados;  $Z$ : variável proxy para qualidade do sítio; MA: anamórfico; MP: polimórfico.

No procedimento de modelagem, os parâmetros dos modelos base e dos modelos dinâmicos para, respectivamente, prever e projetar a altura dominante foram obtidos de forma simultânea. A abordagem da diferença algébrica (ADA), desenvolvida por Bailey e Clutter (1974) e mais tarde generalizada por Cieszewski e Bailey (2000), foi escolhida para obter os modelos dinâmicos. A ADA possibilita construir famílias de curvas anamórficas ou polimórficas, invariantes em relação a idade de referência (FERRAZ FILHO *et al.*, 2011). As equações do local derivadas desta abordagem são matematicamente sólidas e sempre computam números consistentes (CIESZEWSKI; BAILEY, 2000).

Para realizar o ajuste simultâneo de equações compatíveis de predição e projeção do crescimento em altura dominante, a estrutura dos dados foi organizada com todas as possíveis combinações de pares de dados para cada parcela. Por exemplo, se as medições foram realizadas aos 2, 3 e 4 anos, cada parcela teve o conjunto de dados estruturado da seguinte forma: 2-2, 3-3, 4-4, 2-3, 2-4 e 3-4 anos. De acordo com Scolforo *et al.* (2020), esta estratégia de organização dos dados permite estimativas mais adequadas do parâmetro assíntota, bem como melhores predições e projeções da altura dominante a longo prazo.

## 2.5 Expansão do parâmetro comum do modelo com a inserção de índice de desbaste, fertilização e variáveis climáticas

Existem evidências que o desbaste não apenas altera a estrutura do povoamento (distribuições de diâmetro e mudanças na competição espacial), como também modifica o crescimento em altura pós-desbaste de árvores dominantes e codominantes (SHARMA *et al.*, 2006, ZAPATA-CUARTAS *et al.*, 2021). Assim como, respostas no crescimento em altura dominante também já foram observadas com a adição de fertilizantes na rotação intermediária de plantios florestais (PIENNAR; RHENEY, 1995; MCTAGUE, 2008; GYAWALI; BURKHART, 2015). Portanto, os tratamentos de desbaste e fertilização foram empregados para expandir os parâmetros do modelo de altura dominante com a finalidade de construir curvas de crescimento mais específicas do local.

Adicionalmente, variáveis climáticas também foram testadas na expansão do parâmetro comum do conjunto compatível de equações selecionado, uma vez que os efeitos do ambiente permitem a melhor descrição dos padrões de crescimento em altura dominante de plantios clonais de eucalipto no Brasil (FERRAZ FILHO *et al.*, 2011; SCOLFORO *et al.*, 2013; SCOLFORO *et al.*, 2020).

Os efeitos do desbaste e da fertilização no crescimento em altura dominante foram analisados empregando, respectivamente, o índice de desbaste (1) e uma variável binária para locais fertilizados e não fertilizados. No que se refere às variáveis climáticas, foram testadas na modelagem as variáveis descritas na Tabela 3 (P, DC, ETO, RS, Tmin, Tmed e Tmax), devidamente sincronizadas com as informações do inventário florestal.

$$x = x_0 + x_1 Id + x_2 F + x_3 P \quad (2)$$

$$x = x_0 + x_1 Id + x_2 F + x_3 DC \quad (3)$$

$$x = x_0 + x_1 Id + x_2 F + x_3 ETO \quad (4)$$

$$x = x_0 + x_1 Id + x_2 F + x_3 RS \quad (5)$$

$$x = x_0 + x_1 Id + x_2 F + x_3 Tmin \quad (6)$$

$$x = x_0 + x_1 Id + x_2 F + x_3 Tmed \quad (7)$$

$$x = x_0 + x_1 Id + x_2 F + x_3 Tmax \quad (8)$$

$x$ : parâmetro comum;  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ : coeficientes fixos combinados para fornecer um novo parâmetro comum do modelo;  $Id$ : índice de desbaste (1);  $F$ : variável binária relacionada à fertilização, tal que locais fertilizados recebem 1 e locais não fertilizados 0;  $P$ ,  $DC$ ,  $RS$ ,  $Tmin$ ,  $Tmed$  e  $Tmax$  são os valores médios anuais da precipitação ( $\text{mm.ano}^{-1}$ ), dias chuvosos (número de dias quando a chuva excedeu 1mm), radiação solar ( $\text{MJ.m}^{-2}$ ), temperatura mínima

(°C), temperatura média (°C) e temperatura máxima (°C), respectivamente, desde o momento do plantio até o momento em que o inventário florestal foi conduzido.

Scolforo *et al.* (2020) menciona que, embora pareça promissor aumentar a capacidade explicativa de conjuntos compatíveis de equações de crescimento com a expansão de parâmetros em função de características do ambiente, é necessário que seja realizada investigações adicionais para testar se, de fato, as predições e projeções da altura dominante são mais precisas em intervalos de curto, médio e longo prazo. Diante disso, o conjunto de dados de validação foi estratificado em três classes de idade e três comprimentos de projeção (0°-25°, 25°-75° e 75°-100° quantil) para avaliar a precisão das estimativas ao longo do tempo.

## 2.6 Avaliação e validação da modelagem proposta

O desempenho das equações de crescimento foi avaliado por meio do uso do critério de informação de Akaike (AIC) e do critério de informação Bayesiano (BIC), enquanto viés (T, 9), erro absoluto médio (MAE, 10), erro quadrático médio (RMSE, 11) e eficiência do modelo (EF, 12) foram utilizados para fins de validação. Adicionalmente, análises gráficas também permitiram avaliar o comportamento das equações de crescimento ajustadas.

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O - Pr) \quad (9)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O - Pr| \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O - Pr)^2}{n}} \quad (11)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O - Pr)^2}{\sum_{i=1}^n (O - \bar{O})^2} \quad (12)$$

*Pr*: valores preditos; *O*: valores observados;  $\bar{O}$ : média dos valores observados; *n*: número de observações.

Devido a limitação de dados, para fins de validação do desempenho dos conjuntos de equações com e sem a expansão do parâmetro comum, adotou-se a estratégia recomendada por Kozak e Kozak (2003), no qual 100 amostras aleatórias foram geradas por meio da técnica de *bootstrap* não paramétrico com reposição. Esses autores mostraram que validações cruzadas ou duplas não proporcionam ganhos analíticos quando comparadas à estratégia utilizada neste estudo.

Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R (R CORE TEAM, 2022), de modo que, para o ajuste dos modelos empregou-se a função `nls`, disponível no R base. Para as análises gráficas foi utilizado o pacote `ggplot2` (WICKHAM, 2009).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Seleção do melhor conjunto compatível de equações de predição e projeção de crescimento em altura dominante

Todas as equações compatíveis de predição e projeção de crescimento da altura dominante simultaneamente ajustadas apresentaram coeficientes significativos ( $\alpha = 0,05$ ) e com sinais adequados (Tabela 5). Os melhores valores gerais de AIC e BIC foram apresentados pelo conjunto compatível de modelos M3P, seguido do M2P. As formulações derivadas do modelo de crescimento logístico, M1A e M1P, do modelo de Schumacher, M4A, e do modelo de Chapman-Richards, M2A, apresentaram estimativas assintóticas ilógicas, e, portanto, não são adequadas para a prever e projetar a altura dominante do conjunto de dados.

Tabela 5 – Coeficientes ajustados e estatísticas de ajuste (AIC e BIC) dos conjuntos compatíveis de equações de crescimento de predição e projeção da altura dominante.

<b>Modelos</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>AIC</b>	<b>BIC</b>
M1A	40,88	2,13	0,27	69976	70006
M1P	44,09	1,83	0,20	68926	68956
M2A	45,64	-0,11	0,60	68507	68538
M2P	54,00	-0,05	0,48	66363	66393
M3A	81,71	-2,11	0,40	68459	68489
M3P	79,61	-2,12	0,42	65970	66000
M4A	44,97	-2,33	-	75425	75447
M4P	46,97	-2,69	-	70319	70342

Na validação dos conjuntos compatíveis de equações de crescimento (Tabela 6), para prever a altura dominante, o comportamento das formulações anamórficas e polimórficas derivadas dos modelos de Chapman-Richards e Lundqvist (M2A, M2P, M3A e M3P) apresentaram estimativas semelhantes. No entanto, os modelos M2P e M3P foram mais precisos no que se refere à projeção da variável estudada.

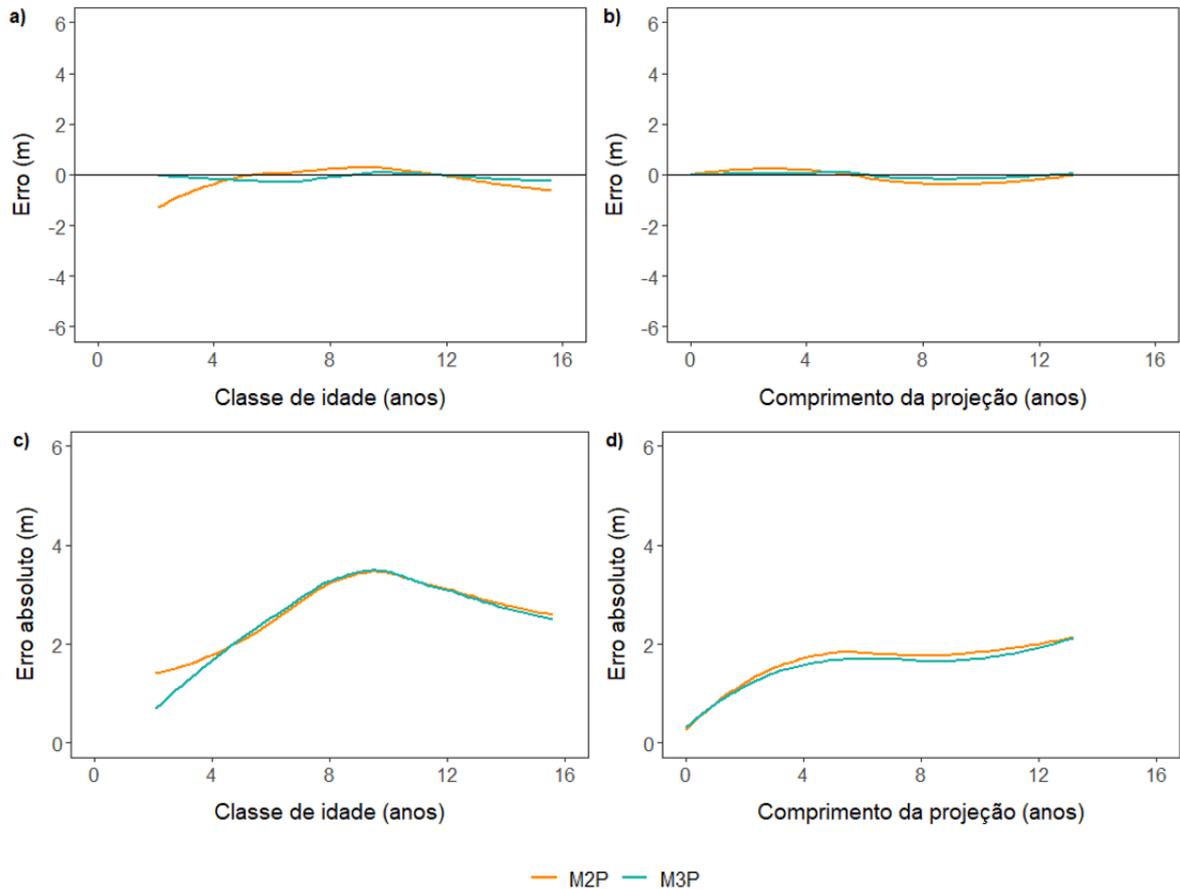
Tabela 6 – Estatísticas de validação (T, MAE, RMSE e EF) dos conjuntos compatíveis de equações de crescimento de predição e projeção da altura dominante.

Modelos	Predição				Projeção			
	T (m)	MAE (m)	RMSE (m)	EF	T (m)	MAE (m)	RMSE (m)	EF
M1A	0,02	2,93	3,41	0,63	0,10	1,48	2,13	0,86
M1P	-0,06	2,95	3,40	0,63	0,04	1,45	2,03	0,87
M2A	0,00	2,92	3,39	0,64	0,06	1,41	2,00	0,87
M2P	-0,03	2,93	3,40	0,63	-0,01	1,28	1,81	0,90
M3A	0,00	2,91	3,39	0,64	0,06	1,42	2,00	0,87
M3P	-0,01	2,92	3,39	0,64	0,01	1,28	1,78	0,90
M4A	0,30	2,94	3,57	0,60	0,73	1,85	2,64	0,78
M4P	-0,02	2,96	3,47	0,62	0,06	1,54	2,13	0,86

Portanto, os modelos M2P e M3P enfatizaram a forma polimórfica das curvas de crescimento da altura dominante dos povoamentos clonais de eucalipto e foram avaliados por meio de análises gráficas (Figura 3). Os erros médios e absolutos foram analisados em diferentes classes de idade (Figura 3a e 3c) e comprimentos de projeção (Figura 3b e 3d) para, respectivamente, predizer e projetar a altura dominante.

Embora tenha sido observada uma similaridade entre as estimativas de altura dominante geradas a partir dos dois conjuntos compatíveis de equações de crescimento, M3P apresentou maior precisão nas classes de idade mais jovens e em comprimentos de projeção aproximadamente superiores a 3 anos, e, portanto, foi selecionado para predizer e projetar a altura dominante de eucalipto.

Figura 3 –Desempenho das equações de predição do crescimento (M2P e M3P) para diferentes classes de idade (a) e (c); desempenho das equações de projeção do crescimento (M2P e M3P) ao longo de diferentes comprimentos de projeção (b) e (d).



### 3.2 Expansão do parâmetro assíntota do conjunto compatível de equações selecionado pela inserção do índice de desbaste, fertilização e variáveis climáticas

As equações compatíveis de predição e projeção de crescimento, ajustadas simultaneamente com a inclusão do índice de desbaste, variável binária para fertilização e as variáveis climáticas ETO, Tmin e Tmed apresentaram coeficientes significativos ( $\alpha = 0,01$ ), com sinais adequados (Tabela 7). A inclusão das demais variáveis climáticas resultaram em ajustes com o parâmetro relacionado à fertilização não significativo e/ou com sinal indevido. Os conjuntos de equações M3P\_ETO, MP3\_Tmin e MP3\_Tmed apresentaram estatísticas de ajuste mais precisas quando comparadas ao conjunto tradicional M3P (sem o parâmetro assíntota expandido), com o melhor desempenho observado pela inserção da variável Tmin.

Tabela 7 – Coeficientes ajustados e estatísticas de ajuste (AIC e BIC) dos conjuntos compatíveis de equações de crescimento de predição e projeção da altura dominante com a inclusão do índice de desbaste, fertilização e variáveis climáticas.

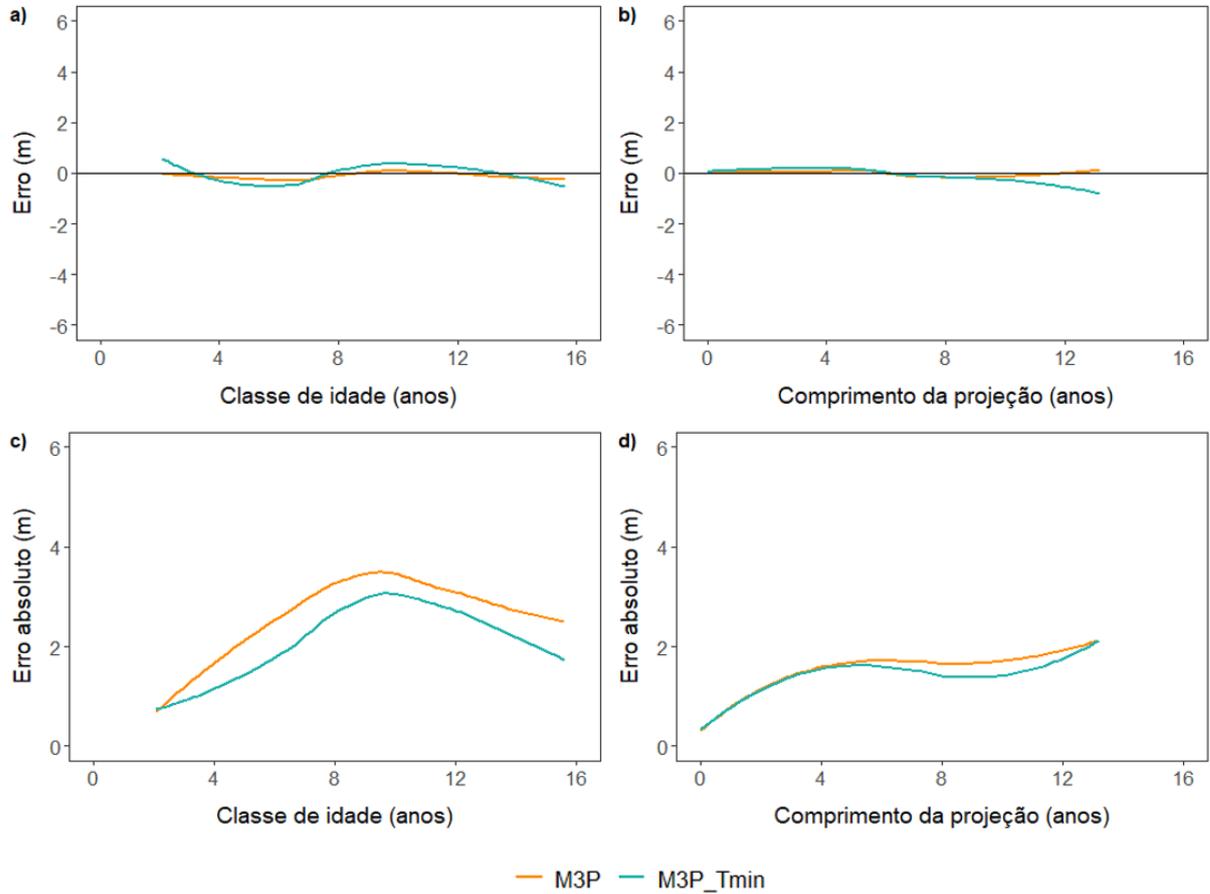
<b>Modelos</b>	<b><math>a_0</math></b>	<b><math>a_1</math></b>	<b><math>a_2</math></b>	<b><math>a_3</math></b>	<b><math>b</math></b>	<b><math>c</math></b>	<b>AIC</b>	<b>BIC</b>
M3P (Tabela 5)	79,61	-	-	-	-2,12	0,42	65970	66000
M3P_ETO (4)	68,84	-5,41	0,29	0,01	-2,07	0,44	65621	65674
M3P_Tmin (6)	-438,60	-5,71	0,27	24,56	-2,08	0,48	62408	62462
M3P_Tmed (7)	325,16	-4,64	0,15	-10,14	-2,03	0,48	65013	65066

No processo de validação, observou-se novamente que o conjunto compatível de equações de crescimento M3P com a inclusão de índice de desbaste, fertilização e Tmin propiciou estimativas mais precisas (Tabela 8). A análise gráfica (Figura 4) dos conjuntos de equações compatíveis M3P com e sem a expansão da assíntota, mostrou que, embora M3P tenha apresentado estimativas levemente mais estáveis, M3P\_Tmin apresentou predições e projeções da altura dominante mais próximas dos valores reais.

Tabela 8 – Estatísticas de validação (T, MAE, RMSE e EF) dos conjuntos compatíveis de equações de crescimento para predizer e projetar a altura dominante com a inclusão do índice de desbaste, fertilização e variáveis climáticas.

<b>Modelos</b>	<b>Predição</b>				<b>Projeção</b>			
	<b>T</b> (m)	<b>MAE</b> (m)	<b>RMSE</b> (m)	<b>EF</b>	<b>T</b> (m)	<b>MAE</b> (m)	<b>RMSE</b> (m)	<b>EF</b>
M3P (Tabela 3)	-0,01	2,92	3,39	0,64	0,01	1,28	1,78	0,90
M3P_ETO (4)	-0,04	2,90	3,39	0,64	0,01	1,27	1,75	0,90
M3P_Tmin (6)	-0,07	2,37	2,81	0,75	0,00	1,19	1,64	0,91
M3P_Tmed (7)	-0,06	2,62	3,08	0,70	0,00	1,29	1,79	0,90

Figura 4 – Desempenho das equações de predição do crescimento (M3P e M3P\_Tmax) para diferentes classes de idade (a) e (c); desempenho das equações de projeção do crescimento (M3P e M3P\_Tmax) ao longo de diferentes comprimentos de projeção (b) e (d).



No que se refere a estratificação dos dados de validação em três classes de idade (Figura 5) e três comprimentos de projeção (Figura 6), os resultados permitiram inferir que expansão do parâmetro assíntota possibilitou curvas de sítio mais precisas, com estimativas de altura dominante mais aprimoradas especialmente em predições de médio a longo prazo (plantios com mais de 5,4 anos) e em projeções de longo prazo (comprimento superior a 8,7 anos).

Figura 5 – Relação entre os valores médios das alturas dominantes observadas e previstas para cada classe de idade e comprimento de projeção dos conjuntos compatíveis de equações M3P e M3P-Tmin. Curto, médio e longo prazo corresponde, respectivamente, aos intervalos de 0°-25°, 25°-75° e 75°-100° quantil.

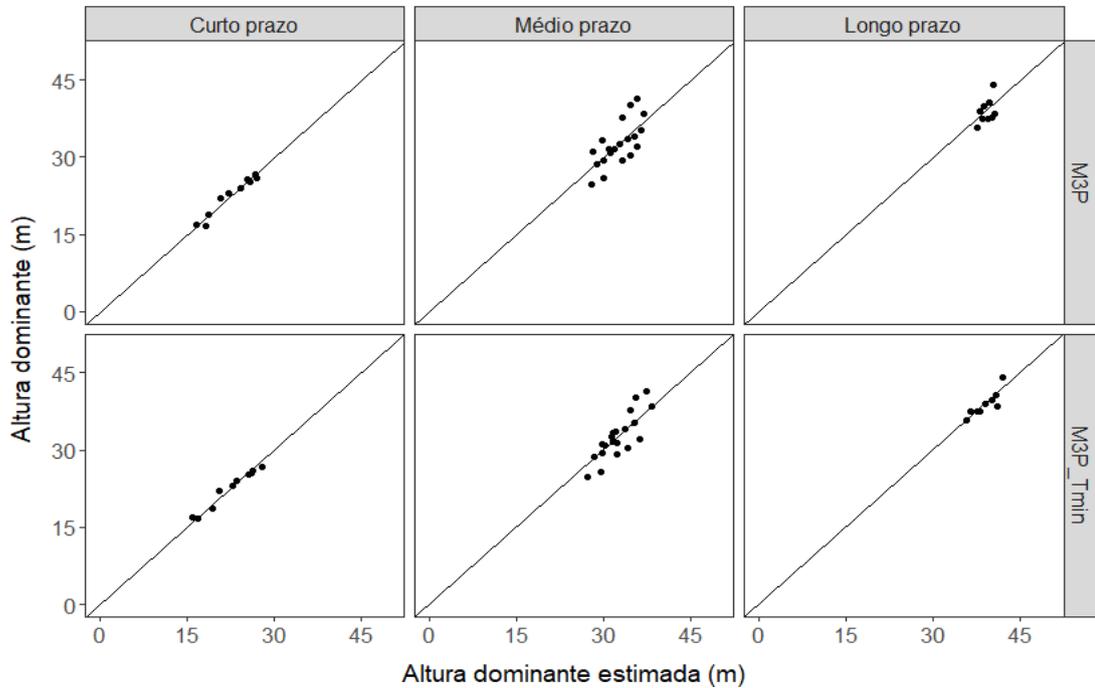
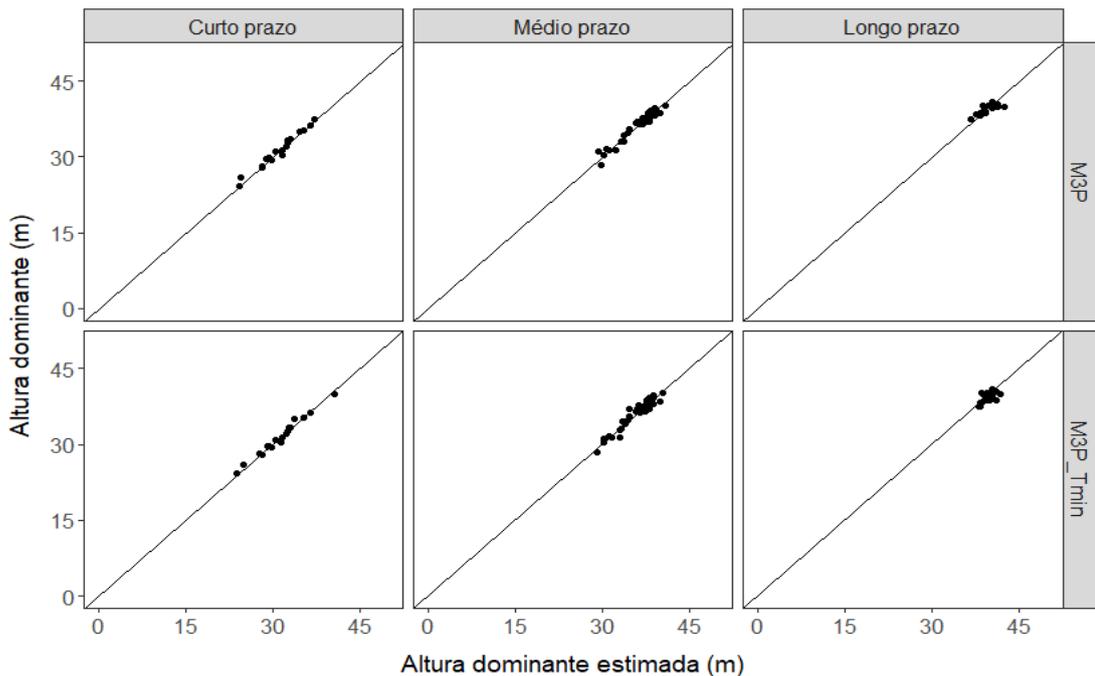


Figura 6 – Relação entre os valores médios das alturas dominantes observadas e projetadas para cada classe de idade e comprimento de projeção dos conjuntos compatíveis de equações M3P e M3P-Tmin. Curto, médio e longo prazo corresponde, respectivamente, aos intervalos de 0°-25°, 25°-75° e 75°-100° quantil.



### 3.3 Análise do ganho em precisão com cada variável na expansão da assíntota

O ganho em precisão foi avaliado para cada uma das variáveis utilizadas na expansão da assíntota do conjunto de equações compatíveis de predição e projeção de Lundqvist polimórfico (M3P), e para isso, os modelos foram ajustados novamente incluindo uma variável a cada ajuste. Os resultados mostraram que as variáveis índice de desbaste (M3P+1), e índice de desbaste + fertilização (M3P+2), embora sejam significativas estatisticamente ( $\alpha = 0,05$ ) no ajuste do conjunto de equações compatíveis, não mostraram ganho de precisão na predição e projeção das estimativas da altura dominante (Tabela 9 e Figura 7).

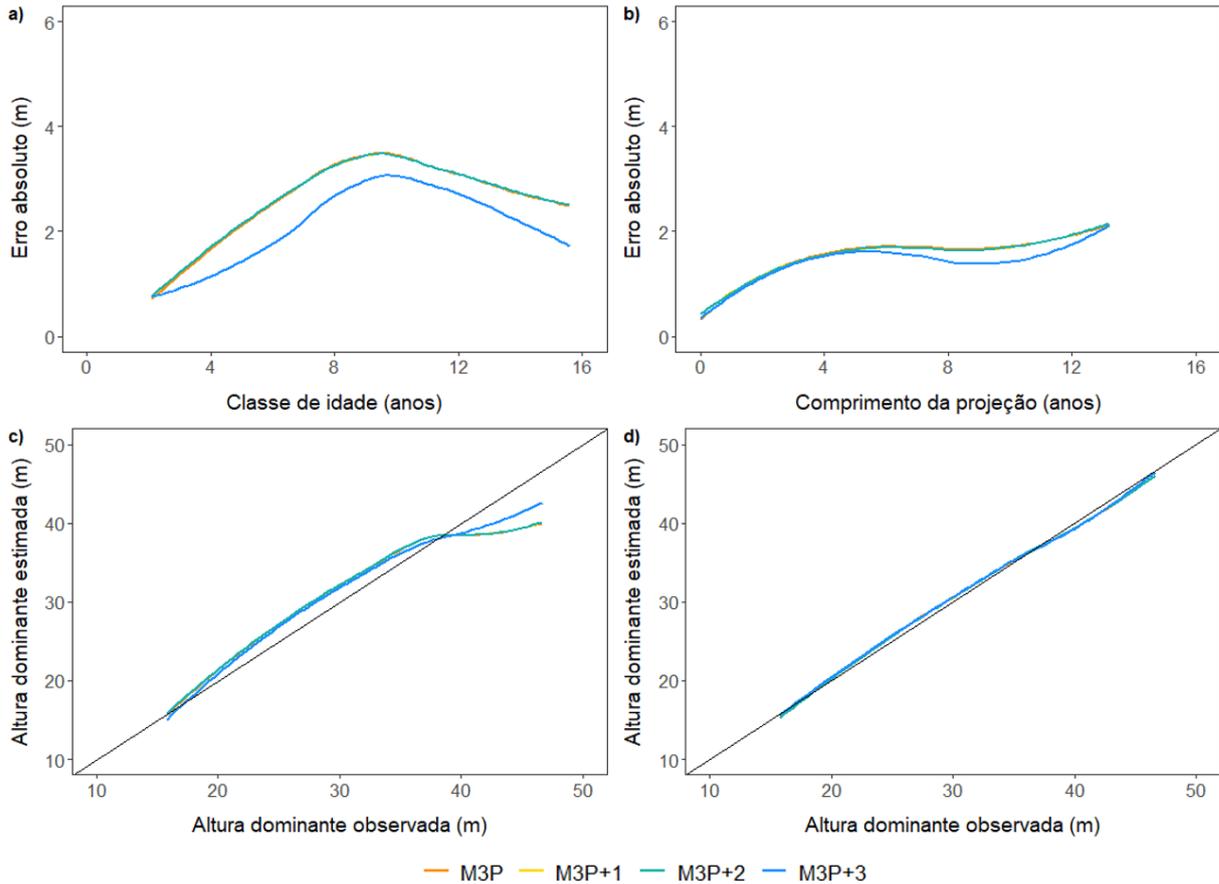
Tabela 9 – Precisão das estimativas a partir da inclusão das variáveis utilizadas na expansão da assíntota do conjunto de equações compatíveis de predição e projeção de Lundqvist polimórfico (M3P).

Estatística	Modelo	M3P	M3P+1	M3P+2	M3P+3
MAE	Predição	2,92	2,91	2,91	2,37
		1,28	1,26	1,26	1,19
RMSE	Projeção	3,39	3,40	3,40	2,81
		1,78	1,75	1,75	1,64

+1: inclusão do índice de desbaste na assíntota; +2: inclusão do índice de desbaste e fertilização na assíntota; +3: inclusão do índice de desbaste, da fertilização e da temperatura mínima na assíntota.

Em contrapartida, a variável temperatura mínima melhorou as estimativas ao ser incluída no parâmetro assíntota do modelo (M3P+3), principalmente para predizer em todas as classes de idade (Figura 7a) e projetar em comprimentos acima de 4,5 anos (Figura 7b). Além disso, aprimorou a predição da altura dominante superior a 40 metros (Figura 7c).

Figura 7 – Tendência média residual da resposta absoluta em altura dominante (m) em classes de idade (a) e comprimentos de projeção (b); Linha suavizada de respostas absolutas do volume observadas vs. estimadas para modelo de predição (c) e projeção (d) da altura dominante.



### 3.4 Potencial produtivo atual de plantios clonais de eucalipto no Brasil

Quando se considera  $i$  ou  $i_2$  igual a idade de referência, o índice de sítio ( $IS$ ) é igual a, respectivamente,  $hd$  ou  $hd_2$ . Portanto, as equações 13 e 14 constituem o conjunto compatível de equações de crescimento de predição e projeção com a assíntota expandida sugerido para estimar a altura dominante (índice de sítio) na idade de referência definida como 15 anos:

$$IS = (-438,60 - 5,71 Id + 0,27 F + 24,56 Tmin) \exp(-2,08 * 15^{-0,48}) \quad (13)$$

$$IS = (-438,60 - 5,71 Id_2 + 0,27 F_2 + 24,56 Tmin_2) \exp - \left( \frac{-\ln(hd_1/(-438,60 - 5,71 Id_1 + 0,27 F_1 + 24,56 Tmin_1))}{i_1^{-0,57}} \right) 15^{-0,48} \quad (14)$$

$Id_1$ : índice de desbaste desde o momento da instalação das parcelas ( $i = 0$ ) até  $i_1$ ;  $F_1$  variável binária para indicar se houve ou não fertilização intermediária até  $i_1$ ;  $Tmin_1$ : temperatura

mínima (°C) desde o momento da instalação das parcelas ( $i = 0$ ) até  $i_1$ ;  $Id_2$ : índice de desbaste desde o momento da instalação das parcelas ( $i = 0$ ) até 15 anos;  $F_1$  variável binária para indicar se houve ou não fertilização intermediária até 15 anos;  $Tmin_2$ : temperatura mínima (°C) desde o momento da instalação das parcelas ( $i = 0$ ) até 15 anos.

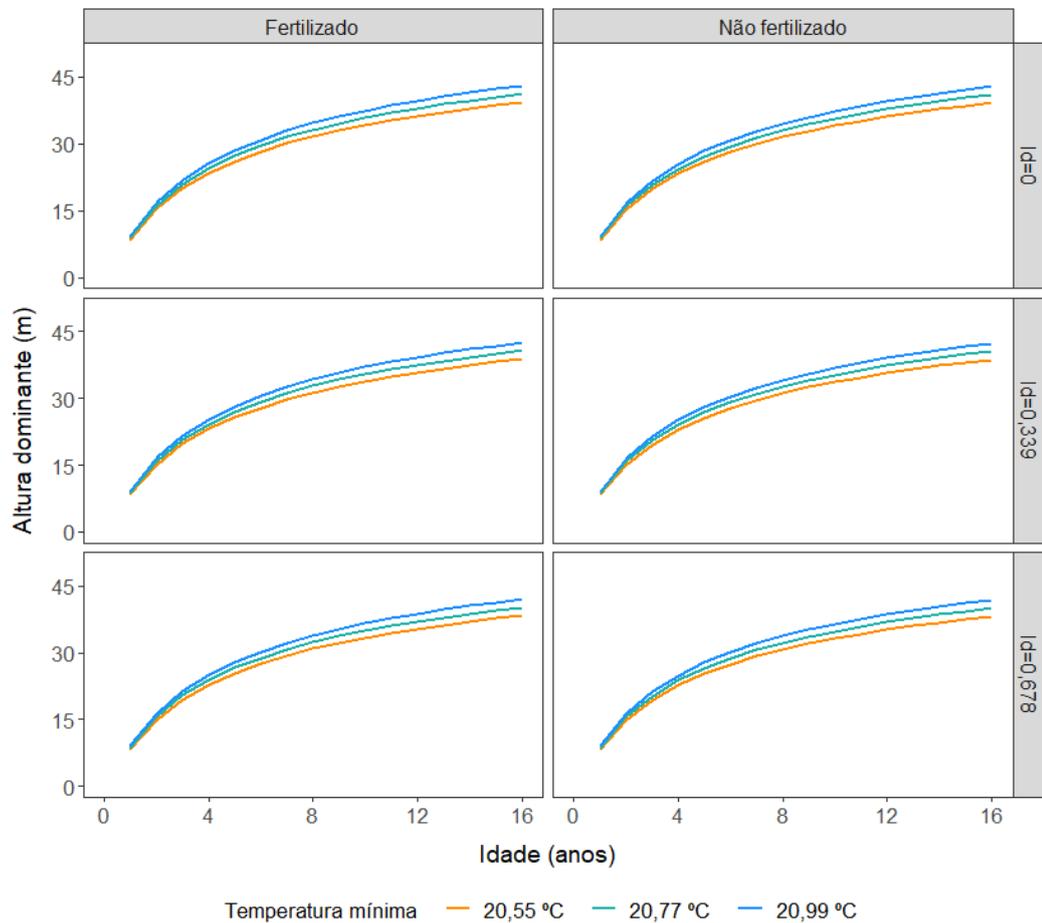
A equação (13) apresenta a capacidade de prever o índice de sítio em função do desbaste, da fertilização e da  $Tmin$  sem a necessidade de obter qualquer medida de altura dominante. Em contrapartida, a equação (14) possibilita melhorar a estimativa do índice de sítio ao fornecer a medição da altura dominante.

As diferenças nos índices de sítio em todos os cenários testados (Tabela 10, Figura 8) podem ser atribuídas principalmente pela inserção da temperatura mínima. O impacto dessa variável nas estimativas pode ser claramente verificado quando se multiplica o coeficiente  $\alpha_3$  (24,56) das equações 13 e 14, pelos valores extremos da  $Tmin$  observados (20,55 °C e 20,99 °C). Um gradiente de 10,80 metros nas estimativas da altura dominante pode ser explicado pela inserção da variável ambiental em questão, sendo bem superior ao índice de desbaste e a fertilização, que explicaram, respectivamente, 3,87 e 0,27 metros. O aumento do índice de sítio em decorrência do aumento na temperatura mínima está de acordo com as informações contidas na Figura 1 e na Tabela 2, onde o experimento B, com maiores médias da variável em questão, apresentou o melhor crescimento em altura dominante.

Tabela 10 – Índice de sítio (idade de referência = 15) em função do índice de desbaste, fertilização e temperatura mínima ( $Tmin$ ). O índice de desbaste e  $Tmin$  correspondem aos valores mínimo, médio e máximo observados no conjunto de dados.

Índice de desbaste	Indicativo de fertilização	Índice de sítio (m)		
		$Tmin = 20,55$ °C	$Tmin = 20,77$ °C	$Tmin = 20,99$ °C
0		37,70	40,77	43,84
0,339	Fertilizado	36,60	39,67	42,74
0,678		35,50	38,57	41,64
0		37,54	40,61	43,68
0,339	Não fertilizado	36,44	39,51	42,58
0,678		35,35	38,41	41,48

Figura 8 – Curvas de sítio geradas sob cenários de índice de desbaste (0, 0,339 e 0,678), fertilização (Fertilizado x Não fertilizado) e temperatura mínima (20,55, 20,77 e 20,99 °C) por meio do uso da equação de previsão M3P\_Tmin (13). A formulação da projeção é necessária para gerar a família de curvas polimórficas.



#### 4. DISCUSSÃO

Este estudo fornece um conjunto compatível de equações de previsão e projeção simultânea do crescimento em altura dominante em função da idade e intensidade de desbaste, da aplicação de fertilizantes e das variações na temperatura mínima. Estimativas mais precisas de altura dominante foram alcançadas por meio do conjunto compatível do modelo de previsão de Lundqvist, combinado ao modelo polimórfico dinâmico com assíntota única. As variáveis índice de desbaste, indicativo de fertilização e médias anuais de temperatura mínima foram empregadas para expandir o parâmetro da assíntota comum entre esses dois modelos de crescimento, possibilitando aumentar a capacidade explicativa de ambos, especialmente pela inserção da variável climática em questão.

A modelagem de previsão e projeção do crescimento em altura dominante de eucalipto no Brasil geralmente é desenvolvida a partir do método da curva guia (DIAS *et al.*, 2005; CAMPOS; LEITE, 2013; ARAÚJO JUNIOR; SOARES; LEITE, 2016; RETSLAFF *et al.*,

2016; CONSENZA *et al.*, 2017). Essa abordagem é muito útil quando se tem apenas informações de parcelas temporárias, no entanto, limita-se a fornecer curvas anamórficas, as quais compartilham de um mesmo ponto de inflexão, ou seja, consideram que a taxa de crescimento relativa em altura é constante para todos os sítios (BURKHART; TOMÉ, 2012). Este fato pode tornar a curva guia ajustada tendenciosa, uma vez que locais mais produtivos propendem a ter a curva de crescimento em altura com o formato sigmoidal mais acentuado, contrastando com locais menos produtivos, onde geralmente o ponto de inflexão é atingido em idades mais avançadas (SCOLFORO, 2006).

Em contrapartida, comparada à abordagem da curva guia, as formulações ADA ou GADA são substancialmente mais precisas para estimar a altura dominante projetada devido à sua natureza polimórfica (SCOLFORO *et al.*, 2020). Neste estudo, GADA, embora apresente a vantagem de produzir curvas com múltiplas assíntotas (CIESZEWSKI; BAILEY, 2000), não foi escolhida devido a sua complexidade e dificuldade de convergência para o conjunto compatível de equações de crescimento. Além disso, estudo comparando o desempenho de modelos derivados de ambos métodos para plantios clonais de eucalipto no Brasil, mostrou não haver ganho extra em relação ao erro de estimativa para a formulação generalizada comparada a abordagem tradicional (SCOLFORO *et al.*, 2016). Scolforo *et al.* (2016) observaram que o modelo de melhor desempenho, baseado na ADA, apresentou uma convergência assintótica somente após 20 anos, muito além do que é usualmente definido como idade de rotação para eucaliptos no Brasil, concluindo que não há comportamento ilógico associado às estimativas.

A teoria de que a altura média das árvores dominantes não é fortemente influenciada por mudanças na densidade do povoamento, é uma suposição chave subjacente ao uso do índice do sítio como um indicador da qualidade ou produtividade do local. No entanto, este estudo verificou que a inserção do índice de desbaste na expansão do parâmetro da assíntota apresentou efeito significativo na estimativa da altura dominante dos plantios de eucalipto. Resultados semelhantes foram encontrados por Zapata-cuartas *et al.* (2021), os quais verificaram que a intensidade de desbaste, bem como a localização geográfica, foram essenciais para definir o comportamento assintótico e a taxa de crescimento da altura dominante de plantios de *Pinus taeda*.

A interpretação do índice de desbaste utilizado associado ao valor do parâmetro  $a_1$  (-5,71), permitiu inferir que desbastes em idades mais avançadas combinados com maiores intensidades tendem a reduzir o crescimento em altura dominante dos plantios de eucalipto. Além disso, quanto mais próxima a idade do povoamento for considerada em relação à idade

do desbaste, maior será o valor do índice, e portanto, maior o impacto negativo no crescimento da altura dominante.

De acordo com Forrester e Baker (2012), a idade em que um plantio é desbastado pode influenciar na resposta de crescimento, de tal modo que, geralmente, as respostas absolutas são maiores quando os desbastes são aplicados antes do fechamento do dossel, em idades mais jovens. Medhurst, Beadle e Neilsen (2001) afirmam que as árvores dominantes apresentam maiores respostas absolutas de crescimento ao desbaste, no entanto, em termos relativos, essas repostas podem sofrer um declínio para povoamentos desbastados em idades mais tardias. Este fato pode ser explicado pela intensificação da competição por luz e a diferenciação da população em classes de tamanho à medida que os povoamentos se desenvolvem. Como resultado, a competição tende a se tornar mais assimétrica em tamanho, de modo que árvores dominantes, que já obtêm uma quantidade de luz desproporcional, são menos responsivas do que quando eram mais jovens, não tão dominantes, e experimentando mais competição por luz em relação aos recursos do solo (SCHWINNING; WEINER, 1998; FORRESTER; BAKER, 2012).

Sharma *et al.* (2006) também observaram que quanto mais intenso o desbaste, maior a resposta negativa no crescimento imediato em altura dominante, no entanto, após essa resposta atingir seu máximo, o crescimento em povoamentos desbastados começa a aumentar produzindo árvores mais altas comparado aos não desbastados. Liu, Burkhart e Amateis (1995) argumentaram que a resposta do desbaste no crescimento em altura dominante não deveria ser imediata, mas começar em zero e aumentar até o máximo conforme as copas das árvores remanescentes respondem ao espaço de crescimento e luz solar adicional, diminuindo após o fechamento da copa até se aproximar da condição não desbastada.

Quando se trata do parâmetro relacionado à fertilização na rotação intermediária, embora pequena, a resposta no crescimento em altura dominante para os locais adubados foi positivamente significativa, conforme já constatado por Ferraz Filho *et al.* (2018) ao utilizar como parte dos seus dados os mesmos experimentos aqui estudados. Esses autores observaram que o experimento D (neste estudo designado como experimento C) apresentou o maior efeito positivo no crescimento devido à fertilização extra, tanto em atributos ao nível de árvores quanto ao nível de povoamento. Para justificar esses resultados, Ferraz Filho *et al.* (2018) levantaram a hipótese de que, comparada as parcelas não fertilizadas, a aplicação adicional de adubos possibilitou o crescimento mais vigoroso das árvores do estrato inferior, o que pode ter estabelecido um maior grau de competição às árvores do estrato dominante, em detrimento ao crescimento do povoamento inteiro. Além disso, as respostas em crescimento à fertilização na

rotação intermediária podem não ter sido tão expressivas se os sítios em que a prática é realizada já estiverem bem adubados no momento da nova aplicação.

Na literatura alguns estudos já documentaram que a expansão do parâmetro assíntota em função da fertilização em modelos de crescimento da altura dominante não resultou em grandes contribuições nas estimativas da variável (GYAWALI; BURKHART, 2015; ZAPATA-CUARTAS *et al.*, 2021), no entanto, a magnitude e a duração dessas respostas depende de fatores como a quantidade e os tipos de fertilizantes aplicados, condições edafoclimáticas, material genético, tempo desde a aplicação (ALBAUGH *et al.*, 2004; GYAWALI; BURKHART, 2015; RAMÍREZ ALZATE *et al.*, 2016). De acordo com Liu, Burkhart e Amateis (1995), é esperado que a resposta à fertilização seja zero no momento da aplicação, aumente para algum grau e depois diminua gradualmente até o nível pré-aplicação. Este comportamento caracteriza-se por uma resposta à fertilização do tipo 1, definida por um aumento inicial no crescimento que não é sustentado ao longo da rotação (NILSSON; ALLEN, 2003), ou seja, altos incrementos de produtividade nos primeiros anos após a fertilização podem reduzir com o tempo, sendo que no momento da colheita, dependendo da duração da rotação, as respostas serão mínimas ou inexistentes (SNOWDON, 2002).

No que se refere aos efeitos de variáveis ambientais na modelagem da altura dominante, observou-se que a inserção da temperatura mínima no parâmetro da assíntota do conjunto compatível de equações de predição e projeção de Lundqvist explicou uma grande variação em relação ao crescimento em altura dominante (10,80 metros) anteriormente atribuída como aleatória. Ferreira (2009) também observaram o efeito positivo dessa variável no crescimento da altura dominante para plantios de eucalipto no Brasil. Portanto, embora os modelos tradicionais forneçam resultados consistentes de qualidade do local, não são capazes de explicar mudanças no crescimento da altura dominante em razão de condições ambientais específicas, como as variações de temperatura em um determinado ano.

O ajuste da expressão (6), utilizada para substituir o parâmetro comum no conjunto de equações compatíveis de predição e projeção da altura dominante, mostrou que valores médios de temperatura mínima abaixo ou entre 17,85 e 18,01°C (dependendo do índice de desbaste e da fertilização) zeram o valor da assíntota, o que implica em dizer que, em locais que apresentam tais condições climáticas, não é justificável implantar uma floresta do clone *Eucalyptus grandis* estudado, uma vez que essa poderá apresentar dificuldades para sobreviver ou se desenvolver satisfatoriamente. Queiroz *et al.* (2020) verificaram que os limites de temperatura ideal para o crescimento de genótipos de eucalipto em faixas tropicais e subtropicais na América do Sul está entre 6 a 31°C. No entanto, maiores exigências térmicas

foram observadas em alguns genótipos, como B2 (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*) e C3 (*Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus camaldulensis*), o que é recomendado para o crescimento em condições tropicais onde as temperaturas médias estão próximas de 20 °C.

A modificação do parâmetro assíntota ou até mesmo do parâmetro de inclinação de modelos de crescimento em altura dominante em função de variáveis ambientais já foram documentados com sucesso na literatura (FERRAZ FILHO *et al.*, 2011; SCOLFORO *et al.*, 2013; SCOLFORO *et al.*, 2016; SCOLFORO *et al.*, 2020). No entanto, Scolforo *et al.* (2013) mencionam que é prudente o uso dessas equações limitado a regiões próximas àquelas estudadas e com regime climático semelhante, isso porque, muitos outros fatores, como nutricionais e genéticos, influenciam na produtividade das florestas. O conjunto compatível de equações desenvolvido, ao incluir tratamentos silviculturais de desbaste e fertilização, os quais alteram o espaço de crescimento e a disponibilidade de recursos das árvores, conseguem retratar uma maior variedade de condições da floresta aos quais pode ser aplicado. Neste sentido, a abordagem proposta neste estudo é inovadora, uma vez que o parâmetro assíntota foi expandido combinando múltiplos efeitos, silviculturais e climáticos, e assim, garantindo maior robustez ao conjunto de equações compatíveis desenvolvido para predizer e projetar o crescimento da altura dominante de eucalipto clonal no Brasil.

Existem evidências que florestas de rotação curta são potencialmente sensíveis às variações do regime climático. Essa constatação está bem eluciada na maioria dos estudos anteriores que avaliaram a influência do clima no crescimento da altura dominante em plantios de eucalipto no Brasil manejados até a idade aproximada de 6 anos (FERRAZ FILHO *et al.*, 2011; SCOLFORO *et al.*, 2020). Os resultados aqui apresentados mostraram que o eucalipto conduzido em rotação longa (até a idade de 15,5 anos) também é vulnerável as flutuações no clima, especialmente da temperatura mínima, a qual se apresentou como uma covariável poderosa para aumentar a capacidade explicativa dos modelos de crescimento em altura dominante.

Embora os ganhos de precisão no ajustes dos modelos com a expansão da assíntota não sejam tão expressivos, a metodologia proposta neste estudo é importante quando se deseja atualizar inventários florestais e recalcular a qualidade de sítios a partir de variações na temperatura mínima e tratamentos de desbaste e fertilização, o que não é possível por meio dos modelos tradicionais. Este tipo de aplicação permite estimativas atualizadas do estoque de madeira com maior segurança, uma vez que são conhecidas as condições climáticas e silviculturais pelas quais a floresta passou. Em contrapartida, seu uso é limitado pela falta de dados climáticos futuros, apesar de que, o conhecimento de como o crescimento da altura

dominante varia em relação ao histórico de condições climáticas médias, possibilita prever a produtividade em áreas sem histórico de plantio prévio (FERRAZ FILHO *et al.*, 2011). Scolforo *et al.* (2013) também observaram que curvas de produtividade de altura dominante em diferentes locais podem ser obtidas em função de dados climáticos históricos.

As curvas de crescimento específicas do local podem ser geradas com precisão a partir dos modelos compatíveis desenvolvidos neste estudo, uma vez que o parâmetro assíntota é governado pelo tratamentos silviculturais aplicados e pelas mudanças na temperatura mínima. Embora a contribuição dos tratamentos de desbaste e fertilização nas estimativas de altura dominante não tenha sido expressiva, mantê-los no modelo não o invalidam, ficando a critério do manejador utilizá-los ou não como parâmetros em estudos futuros.

Por fim, o ajuste simultâneo realizado permitiu a predição e projeção da altura dominante compartilhando os mesmos coeficientes de assíntota e inclinação. O coeficiente de inflexão é definido explicitamente para a equação de predição, enquanto as condições iniciais de altura e idade o definem implicitamente para a projeção da altura dominante. De acordo com Scolforo *et al.* (2020) esta abordagem de ajuste é inovadora para modelar o crescimento em altura dominante no Brasil.

## 5. CONCLUSÃO

Dentre os diferentes conjuntos compatíveis de equações ajustados simultaneamente para prever e projetar a altura dominante em povoamentos clonais de eucalipto no Brasil, obteve-se estimativas mais precisas com a formulação de Lundqvist polimórfica e de assíntota única. O erro de estimativa dos modelos foi substancialmente reduzido ao expandir o parâmetro comum em função do índice de desbaste, do indicativo de fertilização e da temperatura mínima, variável climática que melhor descreveu o crescimento em altura dominante.

A fertilização na rotação intermediária permitiu uma pequena, mas estatisticamente significativa, vantagem no crescimento da altura dominante comparado ao tratamento sem fertilização. O desbaste realizado em idades mais avançadas combinado a maiores intensidades apresentou maior efeito negativo no crescimento da variável em questão. Em contrapartida, o aumento na temperatura mínima proporcionou melhorias na qualidade do local. O conjunto compatível de equações de crescimento desenvolvido foi capaz de prever e projetar a altura dominante a curto, médio e longo prazo com maior precisão e segurança sobre o comportamento biológico.

A metodologia proposta neste estudo é inédita para prever e projetar a altura dominante de plantios clonais de eucalipto no Brasil conduzidos em rotação longa, uma vez

que permite incorporar na modelagem as respostas de tratamentos silviculturais e de variações no clima. Esta abordagem permite atualizar inventários florestais e recalcular a qualidade de sítios a partir do histórico climático e da aplicação de tratamentos de desbaste e fertilização, bem como avaliar o potencial de crescimento de áreas sem registro prévio de plantios florestais. Na silvicultura pode auxiliar na tomada de decisão quanto ao melhor cronograma de manejo para a produção de madeira serrada de eucalipto.

## REFERÊNCIAS

- ALBAUGH, T. J. *et al.* Radiata pine response to tillage, fertilization, and weed control in Chile. **Bosque**, Valdivia, v. 25, n. 2, p. 5-15, 2004. DOI:10.4067/S0717-92002004000200002.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- AMATEIS, R. L. *et al.* Modeling response to midrotation nitrogen and phosphorus fertilization in loblolly Pine plantations. **Southern Journal of Applied Forestry**, Washington, v. 24, n. 4, p. 207-212, 2000. DOI:10.1093/sjaf/24.4.207.
- ARAÚJO JÚNIOR, C. A.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G. Curvas de índices de local em povoamentos de eucalipto obtidas por regressão quantílica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.51, n.6, p.720-727, 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X2016000600003.
- ASSMANN, E. **The principles of forest yield study**. Oxford: Pergamon Press, 506 p. 1970.
- BAILEY, R. L.; CLUTTER, J. L. Base-age invariant polymorphic site curves. **Forest Science**, Lawrence, v. 20, n. 2, p.155-159, 1974. DOI: 10.1093/forestscience/20.2.155.
- BURKHART, H. E.; TOME, M. **Modeling forest trees and stands**. 2 ed. New York: Springer, 2012. 458 p.
- CALEGARIO, N. *et al.* Modeling dominant height growth based on nonlinear mixed-effects model: a clonal *Eucalyptus* plantation case study. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 204, p. 11-20, 2005. DOI:10.1016/j.foreco.2004.07.051.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. 4. ed. Viçosa: Editora UFV, 2013. 605 p.
- CASNATI, A. C. R. **Hybrid mensurational-physiological models for *Pinus taeda* and *Eucalyptus grandis* in Uruguay**. 208 p. Tese (Doutorado em Filosofia Florestal) - University of Canterbury, Canterbury, 2016.

CIESZEWSKI, C. J. BAILEY, L. Generalized algebraic difference approach: theory based derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes. **Forest Science**, Lawrence, v. 46, n. 1, p. 116-126, 2000. DOI: 10.1093/forestscience/46.1.116.

CONSENZA, D. N. *et al.* Site classification for eucalypt stands using artificial neural network based on environmental and management features. **Cerne**, Lavras, v. 23, n. 3, p. 310-320, 2017. DOI: 10.1590/01047760201723032352.

DIAS, A. N. *et al.* Avaliação de métodos de ajuste de curvas de índices de local em povoamentos de eucalipto desbastados. **Revista Árvore**, Viçosa, v.29, n. 5, p.741-747, 2005. DOI: 10.1590/S0100-67622005000500009.

FERRAZ FILHO, A. C. *et al.* Dominant height projection model with the addition of environmental variables. **Cerne**, Lavras, n. 17, v. 3, p. 427-433, 2011. DOI: 10.1590/S0104-77602011000300018.

FERRAZ FILHO, A. C.; SCOLFORO, J. R. S.; MOLA-YUDEGO, B. The coppice-with-standards silvicultural system as applied to *Eucalyptus* plantations - a review. **Journal of Forestry Research**, v. 25, n. 2, p. 237-248, 2014. DOI:10.1007/s11676-014-0455-0.

FERRAZ FILHO, A. C. *et al.* Thinning regimes and initial spacing for *Eucalyptus* plantations in Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciência**, Rio de Janeiro, v. 90, n.1, p. 255-265, 2018. DOI: 10.1590/0001-3765201720150453.

FERREIRA, M. Z. **Modelagem da influência de variáveis ambientais no crescimento e na produção de *Eucalyptus* sp.** 101 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

FORRESTER, D. I.; BAKER, T. G. Growth responses to thinning and pruning in *Eucalyptus Globulus*, *Eucalyptus Nitens*, and *Eucalyptus Grandis* plantations in Southeastern Australia. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 42, n. 1, p. 75-87, 2012. DOI: 10.1139/x11-146.

GONÇALVES, J. L. M. *et al.* Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: The Brazilian experience. **Southern Forests**, Oxford, v. 70, n. 2, p. 105-118, 2008. DOI:10.2989/SOUTH.FOR.2008.70.2.6.534.

GYAWALI, N.; BURKHART, H. General response functions to silvicultural treatments in loblolly pine plantations. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 45, p. 252-265, 2015. DOI: 10.1139/cjfr-2014-0172.

HYNYNEN, J.; BURKHART, H. E.; ALLEN, H. L. Modeling tree growth in fertilized midrotation loblolly pine plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 107, p. 213-229, 1998.

ILES, K. **A sampler of inventory topics**: A practical discussion for resource samplers, concentrating on forest inventory techniques. British Columbia: Kim Iles & Associates Ltd. 2003. 869 p.

KOZAK, A.; KOZAK, R. Does cross validation provide additional information in the evaluation of regression models? **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 33, n. 6, p. 976-987, 2003. DOI: 10.1139/X03-022.

LIU, J.; BURKHART, H. E.; AMATEIS, R. L. Projecting Crown Measures for *Loblolly Pine* Trees Using a Generalized Thinning Response Function. **Forest Science**, Lawrence, v. 45, p. 43-53, 1995. DOI: 10.1093/forestscience/41.1.43.

MAESTRI, R. **Modelo de crescimento e produção para povoamentos clonais de *Eucalyptus grandis* considerando variáveis ambientais**. 143 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

MCTAGUE, J. P. Modelling the response of loblolly pine to juvenile fertilization. **The Open Forest Science Journal**, v. 1, p. 80-88, 2008.

MEDHURST, J. L.; BEADLE, C. L.; NEILSEN, W.A. Early-age and later-age thinning affects growth, dominance, and intraspecific competition in *Eucalyptus Nitens* plantations. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 31, n. 2, p. 187-97, 2001. DOI: 10.1139/x00-163.

NILSSON, U.; ALLEN, H. L. Short- and long-term effects of site preparation, fertilization and vegetation control on growth and stand development of planted loblolly pine. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 175, p. 367-377, 2003. DOI:10.1016/S0378-1127(02)00140-8.

PENG, C. Growth and yield models for uneven-aged stands: past, present and future. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 132, p. 259-279, 2000. DOI: 10.1016/S0378-1127(99)00229-7.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. **Linguagem Python**, versão 3.9.2. Disponível em <http://www.python.org>. Acesso em: 23 jul. 2020.

PIENAAR, L. V.; RHENEY, J. W. Yield prediction for mechanically site prepared slash pine plantations in the southeastern coastal plain. **Southern Journal of Applied Forestry**, Washington, v. 17, n. 4, p. 163-173, 1993.

PIENAAR, L.; RHENEY, J. W. Modeling stand level growth and yield response to silvicultural treatments. **Forest Science**, Lawrence, v. 41, n. 3, p. 629-638, 1995.

RAMÍREZ ALZATE, M. V. *et al.* Mid-rotation response to fertilizer by *Pinus radiata* D. Don at three contrasting sites. **Journal of Forest Science**, v. 62, n. 4, p. 153-162, 2016. DOI: 10.17221/106/2015-JFS.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2022. Disponível em: <https://www.R-project.org>. Acesso em: 19 mar. 2022.

RETSLAFF, F. A. S. *et al.* Curvas de sítio e relações hipsométricas para *Eucalyptus grandis* na região dos Campos Gerais, Paraná. **Cerne**, Lavras, v. 21, n. 2, p. 219-225, 2015. DOI: 10.1590/01047760201521021349.

SCHWINNING, S; WEINER, J. Mechanisms the degree of size asymmetry determining in competition among plants. **Oecologia**, v. 113, n. 4, p. 447-455, 1998. DOI:10.1007/s004420050397.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal: modelos de crescimento e produção florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2006, 393 p.

SCOLFORO, H. F. *et al.* Modeling dominant height growth of eucalyptus plantations with parameters conditioned to climatic variations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 380, p. 182-195, 2016. DOI:10.1016/j.foreco.2016.09.0010378-1127.

SCOLFORO, J. R. S. *et al.* Dominant height model for site classification of *Eucalyptus grandis* incorporating climatic variables. **International Journal of Forestry Research**, Cairo, p. 1-7, 2013. DOI: 10.1155/2013/139236.

SCOLFORO, H. F. *et al.* Site index estimation for clonal eucalypt plantations in Brazil: A modeling approach refined by environmental variables. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 466, 118079, 2020. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118079.

SHARMA, M.; SMITH, M.; BURKHART H. E.; AMATEIS, R. L. Modeling the impact of thinning on height development of dominant and codominant loblolly pine trees. **Annals of Forest Science**, Les Ulis, v. 63, p. 349-354, 2006. DOI: 10.1051/forest:2006015.

SNOWDON, P. Modeling type 1 and type 2 growth responses in plantations after application of fertilizer or other silvicultural treatments. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 163, p. 229-244, 2002. DOI:10.1016/S0378-1127(01)00582-5.

STAPE, J. L. **Production ecology of clonal *Eucalyptus* plantations in Management northeastern Brazil**. 225 p. Tese (Doutorado em Filosofia Florestal) - Colorado State University, Colorado, 2002, 225p.

WEISKITTEL, A. R. *et al.* **Forest growth and yield modeling**. West Sussex: John Wiley & Sons, 2011. 430 p.

WICKHAM, H. **ggplot2**: Elegant Graphics for Data Analysis. New York: Springer-Verlag, 216 p. 2009.

XAVIER, A. C. **Brazilian daily weather gridded data**. 2021. Disponível em: <https://sites.google.com/site/alexandrecandidoxavierufes/brazilian-daily-weather-gridded-data>. Acesso em: 15 jun. 2020.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, p. 2644-2659, 2016. DOI: 10.1002/joc.4518.

ZAPATA-CUARTAS, M. *et al.* A dynamic stand growth model system for loblolly pine responding to mid-rotation treatments. **Forests**, Basileia, v. 12, n. 5, p. 1-29, 2021. DOI: 10.3390/f12050556.