



ANNY FRANCIELLY ATAIDE GONÇALVES

**INTERAÇÃO GENÓTIPO E ESPAÇAMENTO NA FORMA DO
FUSTE E EFICIÊNCIA NO USO DA LUZ EM PLANTIOS DE
Eucalyptus SOB UM GRADIENTE CLIMÁTICO NO BRASIL**

LAVRAS - MG

2022

ANNY FRANCIELLY ATAIDE GONÇALVES

**INTERAÇÃO GENÓTIPO E ESPAÇAMENTO NA FORMA DO FUSTE E
EFICIÊNCIA NO USO DA LUZ EM PLANTIOS DE *Eucalyptus* SOB UM
GRADIENTE CLIMÁTICO NO BRASIL**

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. Otávio Camargo Campoe
Coorientador
Dr. Henrique Ferraço 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).

Gonçalves, Anny Francielly Ataide.

Interação genótipo e espaçamento na forma do fuste e
eficiência no uso da luz em plantios de *Eucalyptus* sob um gradiente
climático no Brasil/ Anny Francielly Ataide Gonçalves. - 2022.

175 p. : il.

Orientador(a): José Roberto Soares Scolforo.

Coorientador(a): Otávio Camargo Campoe,
Henrique Ferração Scolforo.

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

Bibliografia.

1. Modelos generalizados. 2. Modelos baseados em processos.
3. Gradiente de espaçamento. I. Scolforo, José Roberto Soares. II.
Campoe, Otávio Camargo. III. Scolforo, Henrique Ferração. IV.

ANNY FRANCIELLY ATAIDE GONÇALVES

INTERAÇÃO GENÓTIPO E ESPAÇAMENTO NA FORMA DO FUSTE E EFICIÊNCIA NO USO DA LUZ EM PLANTIOS DE *Eucalyptus* SOB UM GRADIENTE CLIMÁTICO NO BRASIL

GENOTYPE INTERACTION AND SPACING IN THE FORM OF STEM AND EFFICIENCY IN THE USE OF LIGHT IN PLANTS OF *Eucalyptus* UNDER A CLIMATE GRADIENT IN BRAZIL

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 31 de agosto de 2022

Dr. José Roberto Soares Scolforo UFLA

Dr. Otávio Camargo Campoé UFLA

Dr. Samuel José Silva Soares da Rocha UFLA

Dra. Ximena Mendes de Oliveira UFRA

Dr. Túlio Barroso Queiroz BRACELL

Prof. Dr. José Roberto Soares Scolforo
Orientador

Dr. Otávio Camargo Campoe
Coorientador

Dr. Henrique Ferrazo Scolforo
Coorientador

**LAVRAS – MG
2022**

*Aos meus amados pais, Helia e José Volmer.
Dedico*

AGRADECIMENTOS

À Deus, que por meio da sua misericórdia me proporcionou saúde e disposição para que esse estudo fosse desenvolvido, pois, sem Ele nada seria possível. É impossível não reconhecer a sua presença nos mínimos detalhes.

À Virgem Maria, pela intercessão constante.

À Universidade Federal de Lavras, especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, pelo aprendizado, oportunidade e pela infraestrutura disponibilizada.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa do doutorado, código de financiamento 001.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Roberto Soares Scolforo, e meus coorientadores, Prof. Dr. Otávio Camargo Campoe e Dr. Henrique Ferrazo Scolforo, pela orientação, paciência, diálogo e preciosos ensinamentos. Foi uma experiência incrível trabalhar com vocês no desenvolvimento desta tese.

Ao Projeto TECHS – Tolerância de *Eucalyptus* Clonais aos Estresses Hídrico e Térmico, conduzido pelo IPEF em parceria com empresas do setor florestal do Brasil. Agradeço na pessoa do Prof. Dr. Otávio Camargo Campoe por disponibilizar a base de dados desse projeto. Agradeço aos professores da Universidade Federal de Lavras que contribuíram para o meu processo de aperfeiçoamento, sejam nas disciplinas cursadas ou nas conversas extraclasse.

Aos servidores do Departamento de Ciências Florestais, Thiza, Kalil, Xica e Juliano pela disponibilidade em ajudar.

À toda minha família, meus alicerces de vida. Em especial, aos meus pais, irmãs, sobrinhos e cunhado por torcerem, incentivarem, compreenderem minha ausência em tantos momentos importantes e me apoiarem nessa jornada.

Ao Matheus, pelo companheirismo, incentivo e apoio incondicional para minha realização profissional e pessoal, e a família Guimarães Diniz que me receberam como uma filha.

Aos colegas e amigos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da UFLA, em especial Isa, Laís, Lorena, Ximena, Celina, Daniel, Vitor, Thiza, Luciane, Evandro, Luciano, Bruna, Alexandre e Debora pela amizade, pelas conversas, parceria, apoio e incentivo em momentos importantes.

À banca examinadora da defesa desta Tese, Dr. José Roberto Soares Scolforo, Dr. Otávio Camargo Campoe, Dra. Ximena Mendes de Oliveira, Dr. Samuel José Silva Soares da Rocha e Dr. Túlio Barroso Queiroz pela participação, pela disponibilidade e pelas contribuições.

A todos os meus colegas de curso, pelo companheirismo, amizade e pela interação produtiva.

MUITO OBRIGADA!

RESUMO GERAL

O desenvolvimento da modelagem florestal é uma ferramenta útil para entender quais são os fatores que influenciam o crescimento e a eficiência produtiva das árvores e assim, fornecer base para que as tomadas de decisões sejam mais assertivas pelos gestores florestais. A tese foi estruturada sob duas abordagens de pesquisa, e três artigos científicos foram desenvolvidos. No artigo 1 foi realizada uma revisão sistemática e bibliométrica sobre a evolução do modelo baseado em processo MAESTRO, MAESTRA e MAESPA e da sua aplicabilidade em pesquisas florestais em um período de 32 anos. Essa linhagem de modelo é de código livre, capaz de representar a árvore na sua forma individual, e com isso, calcular a interceptação da radiação solar pelas copas das árvores. O foco de pesquisas que está em alta é com o *Eucalyptus*, e os EUA é o país que lidera as pesquisas utilizando esse tipo de modelo. Já no artigo 2, a base de dados utilizada foi composta por informações de dois genótipos de *Eucalyptus* plantados em 4 sítios com características climáticas distintas e, submetidos a diferentes gradientes de espaçamentos de plantio em duas datas diferentes. Foi feita a aplicação do modelo MAESTRA com ênfase ao entendimento sobre a eficiência do uso da luz (LUE) para a produção de biomassa do fuste das árvores de eucalipto, sendo o primeiro trabalho com a simulação do MAESTRA em experimento de gradiente de espaçamento e de localização desenvolvido até o momento para *Eucalyptus*. Foi observado que o comportamento dos materiais genéticos avaliados em relação à radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelas árvores (APAR) e LUE variaram em função do local, data de análise e espaçamento. No artigo 3, foram utilizados dados de 17 locais de experimentação e um total de 18 genótipos de *Eucalyptus* distribuídos entre esses locais. Foi desenvolvido um modelo de afilamento generalizado e calibrado. As variáveis idade e déficit hídrico do solo, interativamente com a variável z (hi/ht) foram incluídas no expoente do modelo e, o método da restrição algébrica foi utilizado para restringir a função a passar pelo diâmetro localizado na altura de 6 m da árvore. Os resultados gerais dos capítulos foram importantes para compor informações sobre estudos da eficiência do uso da luz em relação a biomassa e do afilamento do fuste para árvores de *Eucalyptus* com amplitude de informações climáticas e de idades diferentes.

Palavras-chave: Modelos generalizados. Modelos baseados em processos. Gradiente de espaçamento.

GENERAL ABSTRACT

The development of forest modeling is a useful tool for understanding the factors that influence the growth, taper, and productive efficiency of trees and thus provides a basis for more assertive decision-making by forest managers. This thesis was structured under two research approaches, and three scientific articles were developed. In article 1, we performed a systematic and bibliometric review of the evolution of the process-based model's MAESTRO, MAESTRA, and MAESPA and its applicability in forestry research over 32 years. This type of model is free code and can represent the tree individually, calculating the interception of solar radiation across the canopy. The focus of research that's on the rise is on Eucalyptus, and the USA is the country that leads the research using this model. In article 2, the database was composed of information from two Eucalyptus genotypes of the plastic-type planted on four sites with distinct soil and climate characteristics and subjected to different gradients of planting spacing on two dates. The application of the MAESTRA model with emphasis on understanding the light use efficiency (LUE) for the biomass production of the stem of eucalyptus trees and this is the first work with MAESTRA simulation in spacing and location gradient experiments developed until now for Eucalyptus. We observed that the behavior of genetic materials evaluated compared with the photosynthetically active radiation absorbed by trees (APAR) and LUE varied as a function of the site, date of analysis, and spacing. In paper 3, we used data from 17 experimental sites and 18 Eucalyptus genotypes distributed between these sites. A generalized and calibrated tapering model was developed. The variables age and soil water deficit, interactively with the variable z (hi/ht) were included in the exponent of the model and the algebraic constraint method was used to constrain the function to pass through the diameter located at 6 m tree height. The overall results of the chapters were important to compose information about studies of light use efficiency about to with concerning biomass and stem tapering for Eucalyptus trees with different edaphoclimatic information and different ages.

Keywords: Generalized models. Process-based models. Spacing gradient.

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE.....	12
1 INTRODUÇÃO.....	13
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1 Plantios florestais de Eucalyptus.....	15
2.2 Espaçamento de plantio de Eucalyptus	16
2.3 Eficiência do uso da luz e o crescimento florestal.....	17
2.4 Modelagem florestal	19
2.4.1 Modelos de afilamento	21
2.4.2 Modelos baseados em processos	22
REFERÊNCIAS.....	29
1 Introduction.....	39
2 Thematic contextualization and applied methods.....	41
3 Processes based models applied in forestry studies.....	42
4 MAESTRO – MAESTRA evolution to MAESPA.....	51
5 Studies that applied the PBMs MAESTRO, MAESTRA AND MAESPA.....	55
6 Bibliometric analysis – scientific trends and thematic perspectives.....	65
6.1 Database characterization	65
6.2 Annual scientific production	66
6.3 Sources (journals).....	67
6.4 Authors' analysis	68
6.5 Keyword analysis.....	68
6.6 The most cited countries based on the author's addresses	71
7 Conclusions.....	71
ANNEX I.....	73
REFERENCES.....	86
1 INTRODUÇÃO.....	99
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	101
2.1 Locais de estudo.....	101
2.2 Design experimental	102
2.3 Absorção da radiação e eficiência do uso da luz na escala da árvore.....	103
2.4 Índice de Gini.....	110
3 RESULTADOS.....	111

3.1 Padrão de resposta dos sítios e clones em função da interação entre a biomassa do fuste das árvores, WNPP, APAR e LUE aos 3 e 6 anos de idade.....	111
3.2 Sobrevivência das árvores.....	116
3.3 Competição dentro das parcelas.....	117
3.4 Biomassa do caule das árvores por sítio e período de análise.....	121
3.5 Comportamento da biomassa do fuste, do incremento em biomassa, e da APAR em função do gradiente de área útil.....	122
3.6 LUE e WNPP das árvores por sítio e período de análise.....	131
4 DISCUSSÃO.....	134
4.1 Competição intra parcela.....	135
4.2 Variações da biomassa, WNPP e APAR com genótipo e idade do povoamento.....	136
4.3 Variações de LUE com genótipo e idade do povoamento.....	137
5 CONCLUSÃO.....	139
REFERENCIAS.....	140
1 INTRODUÇÃO.....	146
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	147
2.1 Área de estudo	147
2.2 Variáveis meteorológicas	151
2.3 Caracterização dos dados do inventário florestal	151
2.4 Desenvolvimento do modelo de afilamento	156
Etapa 1 - Modelo base de afilamento do fuste das árvores.....	156
Etapa 2 - Inserção de variáveis auxiliares no expoente do modelo base.....	156
Etapa 3 - Inserção de variáveis auxiliares no expoente do modelo base + restrição algébrica	157
2.5 Avaliação dos modelos	157
3 RESULTADOS.....	159
3.1 Inclusão de variáveis na função de afilamento	159
3.2 Calibração do modelo com inclusão do diâmetro superior	161
3.3 Análise do comportamento de dois clones em 4 sítios contrastantes	164
4 DISCUSSÃO.....	167
5 CONCLUSÃO.....	171
REFERÊNCIAS.....	172

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

Dentro do setor florestal são desenvolvidas atividades para avaliar o potencial do crescimento e da produtividade de madeira em diferentes sítios florestais. Essa atividade tem sido desenvolvida ao longo dos anos e acompanha a história dos processos produtivos florestais, e nos dias atuais, ainda detêm grande atenção da comunidade científica (COSENZA et al., 2017).

Em áreas tradicionalmente implantadas há uma maior segurança quanto à adaptação e capacidade produtiva dos clones, já em novas áreas, os riscos de perdas de crescimento e de baixa produtividade da madeira devido a variação de características climáticas são maiores. Pois, os clones poderão ser submetidos a diferentes tipos de estresses ambientais, como relacionados ao clima, ao solo, e a disponibilidade hídrica, comparados com os locais de onde foram inicialmente desenvolvidos (BOOTH, 2013; ELLSWORTH et al., 2017; FERRAZ et al., 2019; HUBBARD et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2021).

Com isso, entender os processos de adaptação e crescimento e, o porquê uma árvore cresce mais rápido do que outra é de suma importância para os manejadores florestais. Pois, os padrões de crescimento de árvores individuais determinam o padrão de crescimento do povoamento florestal, em relação ao tempo e em resposta aos tratamentos silviculturais (BINKLEY; LACLAU; STERBA, 2013), condições climáticas e sistemas de manejo florestal em que as árvores estão submetidas.

Nesse sentido, há a necessidade de pesquisas que envolvam os processos de eficiência do uso de recursos e do crescimento das árvores de diferentes tipos de materiais genéticos, implantados em locais com características climáticas distintas, para fornecer subsídios aos gestores florestais e auxiliá-los no processo de tomadas de decisões de ordem estratégica, tática e operacional.

Uma forma de entender esses processos é por meio do uso da modelagem dos dados florestais, já que os modelos são uma forma de representação da realidade com maior nível de precisão. Para esse propósito, podemos utilizar a classe de modelos empíricos e/ou os modelos baseados em processos (MBP).

O modelo de taper generalizado é um exemplo de modelos empíricos utilizado dentro do setor florestal. Esse modelo inclui fatores modificadores da forma do fuste das árvores (OLIVEIRA et al., 2022), como a idade, o clima, espaçamento, entre outros. Isso possibilita que os diâmetros em qualquer altura do fuste das árvores sejam estimados (KOIRALA et al., 2021), de maneira que é possível utilizar um único modelo que contempla diferentes fatores do

ambiente que são passíveis de modificar o formato do fuste das árvores.

Em relação a classe dos modelos baseados em processos, têm-se o MAESTRA, que se destaca entre os demais MBP por considerar a árvore na sua forma individual e tridimensional (MEDLYN, 2004). O principal output do MAESTRA é a APAR (radiação fotossinteticamente ativa absorvida), que é uma variável de difícil aquisição em campo, e de grande importância quando o assunto é entender a eficiência no uso da luz na produção de biomassa total ou a maior partição de biomassa para os fustes das árvores (CAMPOE et al., 2013a, 2013b). Pois, a LUE (eficiência no uso da luz) pode ser calculada por meio da combinação entre uma variável modelada que é a APAR e uma outra variável que pode ser medida ou modelada (CHARBONNIER et al., 2017) como por exemplo o incremento em biomassa dos fustes das árvores.

A tese foi estruturada em duas partes. A primeira parte contém a introdução geral e a revisão de literatura. A segunda parte contém 3 artigos. Nos artigos 1 e 2 foram desenvolvidos uma análise de revisão sistemática e bibliométrica aplicada aos modelos MAESTRO, MAESTRA e MAESPA e a aplicação do modelo MAESTRA em plantios de eucalipto submetidos a gradiente de área útil e climático do Brasil. No artigo 3 foi desenvolvido um modelo de *taper* generalizado para plantios de eucalipto submetidos a gradiente climático do Brasil.

A base de dados utilizada no primeiro artigo foi proveniente sobre pesquisas que fizeram uso do MBP MAESTRO, MAESTRA e MAESPA de dados indexados no *Scopus*. Já o segundo e o terceiro artigo utilizaram informações de povoamentos de *Eucalyptus*, plantados em diferentes gradientes climáticos do Brasil provenientes do projeto TECHS. Os dados deste projeto trazem informações raras para o plantio de *Eucalyptus* no Brasil, pois, buscaram avaliar como fatores relacionados ao estresse hídrico, térmico e biótico em conjunto com o espaçamento e genética poderiam influenciar os processos de crescimento e sobrevivência de árvores individuais e/ou de povoamentos deste gênero (BINKLEY et al., 2017).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Plantios florestais de *Eucalyptus*

Ao analisar o cenário mundial de plantios de *Eucalyptus*, Brockerhoff et al., (2013) observaram que mais da metade da área total de florestas plantadas de *Eucalyptus* encontram-se em três países: Brasil, Índia e China. No Brasil, a área de cultivo de *Eucalyptus* é quatro vezes maior do que, por exemplo, na Austrália, local de ocorrência natural do gênero.

Os primeiros plantios de *Eucalyptus* no Brasil localizavam-se nas zonas temperadas dos estados da região Sudeste e Sul. No entanto, nos últimos anos, as áreas de plantios expandiram-se para as regiões mais tropicais, localizadas no Nordeste e Centro-Oeste, abrangendo climas Am à Aw. Isso está atrelado ao preço das terras, que nesses locais são de menor valor, entretanto, essas regiões apresentam um longo período de estação seca no ano, o que pode ocasionar estresse hídrico as plantas. A saída encontrada foi o desenvolvimento de genótipos adaptados a essas condições de alta temperatura e baixa pluviosidade (GONÇALVES et al., 2013) de forma a manter o crescimento e a produtividade nesses ambientes.

Com isso, o aumento do plantio com áreas reflorestadas de *Eucalyptus* está ligado ao sucesso no desenvolvimento de novas espécies para esse gênero. Essa ampla variedade desenvolvida apresenta diferentes tipos de aptidões climáticas e edáficas, além da fácil propagação por vias clonais e por sementes, em que as variedades produzidas são adaptadas a plantios para diferentes regiões no Brasil (CASTRO et al., 2018; GONÇALVES et al., 2013).

O Brasil tem se destacado pelo aumento gradativo das áreas plantadas com *Eucalyptus*, que equivalem a 7,47 milhões de hectares, localizados principalmente nos estados de Minas Gerais (27,6%), São Paulo (18,1%) e no Mato Grosso do Sul (15,1%). E isso fez com que o Brasil se destacasse entre os 10 maiores produtores de madeira serrada no mundo, junto com a China e Estados Unidos, que são os líderes mundiais de produção de madeira serrada (IBÁ, 2021).

Em relação a produtividade de madeira por área, o Brasil é referência mundial quanto a sua produtividade florestal, pois é altamente produtivo por área e em curto ciclo. Com produtividade média de 36,8 m³/ha ao ano para os plantios de *Eucalyptus* e 30,4 m³/ha ao ano nos plantios de *Pinus* (IBÁ, 2021). Além de ter o menor período de colheita dos plantios florestais estabelecidos, ao realizar comparações com os demais países produtores florestais (Suécia, Finlândia, Portugal, sul dos EUA, África do Sul, Chile, Austrália, Indonésia, China, e Nova Zelândia) (ABRAF, 2013).

Além da alta produtividade, destaca-se entre as características da cadeia produtiva do setor florestal brasileiro a diversidade de produtos (ABRAF, 2013) e subprodutos obtidos nas áreas florestais plantadas. Historicamente, para os plantios puros de *Eucalyptus*, o uso madeireiro desse gênero era empregado em áreas como as indústrias de celulose, carvão vegetal, produção de lenha e de madeira serrada (COOK; BINKLEY; STAPE, 2016), fato que continua ocorrendo até os dias atuais.

Arelado às características desejáveis da madeira tem-se um amplo conhecimento silvicultural sobre o gênero *Eucalyptus*, o que incentiva ainda mais as pequenas e grandes empresas a realizarem plantios de florestas de produção com uso desse gênero (GONÇALVES et al., 2013).

2.2 Espaçamento de plantio de Eucalyptus

O espaçamento (ou área útil) e o tipo de arranjo disponível para o plantio de espécies florestais são técnicas silviculturais que influenciam de forma direta na competição das árvores por recursos para seu crescimento (VILLA, 2012). Assim, a definição de qual espaçamento utilizar torna-se uma das principais atividades a ser determinada dentro do planejamento do plantio de uma floresta, de forma que cada indivíduo tenha espaço suficiente para apresentar máximo crescimento. O espaçamento ideal para o plantio deve avaliar a relação custo/benefício e considerar a proteção do solo. Dessa forma, é necessário conhecimento sobre os fatores ambientais que podem afetar os processos fisiológicos que influenciam o crescimento das árvores (SCOLFORO, 1998).

Cabe destacar que a qualidade do sítio, a espécie, o objetivo do manejo florestal, as condições do mercado e os métodos de colheita estão entre os fatores que são determinantes para a escolha do melhor espaçamento. Os arranjos de espaçamentos de uso comum no Brasil para o gênero *Eucalyptus* e *Pinus* são 2,0 x 2,0; 2,5 x 2,5; 3,0 x 1,5; 3,0 x 2,0; 3,0 x 2,5 metros, no entanto, o arranjo 3,0 x 3,0 m tem sido o mais utilizado (SCOLFORO, 1998).

As árvores apresentam crescimento diferente de acordo com o espaçamento disponível para o seu desenvolvimento, no qual, em espaçamentos mais adensados, ocorre maior fechamento de dossel, desrama natural, produção de serapilheira (VILLA et al., 2016), e pode ocorrer também a diminuição da taxa de sobrevivência das árvores em campo, o que pode gerar a redução na produtividade do povoamento florestal (SILVA et al., 2016).

Cabe destacar também que o crescimento das árvores é variável em resposta a interação do espaçamento disponível com o tempo. A exemplo, Nascimento et al., (2012) observaram

que os arranjos do espaçamento (1,0 x 1,0; 1,5 x 1,5; 2,0 x 2,0 e 3,0 x 2,0 m) inicial de plantio de seis espécies florestais apresentaram influência significativa no crescimento em diâmetro ao nível do solo e na área de copa de todas as espécies analisadas, no qual, quanto maior foi o espaçamento, maior foi o crescimento das variáveis analisadas.

Em específico para o gênero *Eucalyptus*, existem na literatura estudos que abordam a relação entre o espaçamento disponível para o desenvolvimento das árvores e o crescimento e características da madeira. Em condições experimentais, analisando quatro tipos de arranjos de espaçamento (3,0 x 0,5; 3,0 x 1,0; 3,0 x 2,0; e 3,0 x 3,0 m) e quatro materiais genéticos de *Eucalyptus*, Sartorio (2014) observou que o arranjo de espaçamento 3,0 x 2,0 m apresentou a maior produção de biomassa seca total por hectare para todos os materiais genéticos analisados, seguido pelo arranjo de 3,0 x 3,0 m. Goulart et al., (2003) observaram que os arranjos de espaçamento mais adensados (1,5 x 1,0 m e 2,0 x 1,5 m) são os mais recomendados para plantios com finalidade energética, pois, produzem maiores valores de massa seca para a madeira e casca. Benin; Watzlawick; Hillig (2017) estudaram as propriedades físicas e mecânicas da madeira de *E. benthamii* submetidas a quatro arranjos de espaçamento de plantio (3,0 x 2,0; 3,0 x 3,0; 4,0 x 3,0; 4,0 x 4,0 m) e concluíram que os espaçamentos não influenciaram as propriedades físicas e mecânicas da madeira.

2.3 Eficiência do uso da luz e o crescimento florestal

O conceito de eficiência do uso da luz (LUE) foi apresentado por Monteith (1977), que relacionou a produtividade vegetal em função da síntese de carboidratos por energia (radiação solar) absorvida. Mas, para entender a eficiência do uso da luz, é necessário entender quais são os fatores que influenciam os processos de crescimento e produtividade das árvores.

Com isso, o termo ecologia de produção tem sido utilizado para referir a produtividade de árvores ou florestas em função dos recursos disponíveis para o crescimento das árvores, a porcentagem de recursos que são efetivamente utilizados, e o quão eficiente esses recursos estão sendo utilizados no processo produtivo de forma efetiva (CAMPOE, 2012).

Sabe-se que o crescimento das árvores é influenciado pela combinação da aquisição de recursos (luz, água e nutrientes), eficiência no uso desses recursos e a competição por esses recursos (BINKLEY, 2004), no qual varia entre espécies e entre árvores da mesma espécie.

Portanto, a disponibilidade de luz, nutrientes e água apresentam influência direta sobre o processo da captura do CO₂ da atmosfera pelas árvores e florestas. Esses recursos são utilizados no processo de fotossíntese, para que ocorra a síntese de carboidratos, que

posteriormente, serão utilizados nos processos produtivos de diferentes partes das árvores, como na formação de folhas, galhos, fuste e raízes (CAMPOE, 2012).

Conforme visto, a luz não é o único fator limitante para o crescimento das árvores. A luz solar chega à copa das árvores de forma uniforme, mas, a água e nutrientes não, eles apresentam forte irregularidade espacial no solo. A competição do sistema radicular entre árvores é diferente da competição da parte aérea por luz, no entanto, o sucesso na competição por água e nutrientes apresenta resposta direta na capacidade da árvore em competir por luz (BINKLEY; LACLAU; STERBA, 2013).

Como as plantas são indivíduos sésseis e incapazes de saírem do ambiente onde estão inseridas, é necessário que esses indivíduos desenvolvam mecanismos de controle celular e químico para realizar o controle da influência da variabilidade da radiação solar incidentes sobre elas. Conseqüentemente, as espécies florestais apresentam características de tolerância às variações na intensidade luminosa disponível no ambiente natural, por meio de mecanismos estruturais que controlam o processo de conversão de energia solar em energia química (LIAO et al., 2017).

Dessa forma, espécies com características mais evoluídas poderão conseguir desenvolver em diferentes ambientes, no qual estejam sujeitas a condições ambientais variantes. Pois, a mudança de espécies florestais de um local para outro faz com que essas espécies estejam expostas a quantidade e a qualidade da luz, a temperaturas (ALBAUGH et al., 2018), disponibilidade hídrica e nutricional variáveis. E espera-se que essas mudanças não interfiram no processo de crescimento das árvores.

Entre as espécies florestais que apresentam boa adaptação a diferentes características do ambiente, cabe destaque ao gênero *Eucalyptus*. Gonçalves et al. (2013) fizeram uma revisão sobre os principais aspectos dos plantios de florestas de *Eucalyptus* ao longo de um gradiente climático no Brasil, com o uso do sistema de classificação de Köppen (1936), no qual, é discutido que o gradiente climático apresenta estreita relação com as recomendações do tipo de genótipo de *Eucalyptus* e da produtividade florestal. Esses autores complementam ainda que as espécies de *Eucalyptus* apresentam características evolutivas que permitem que sejam desenvolvidas em uma ampla gama de ambientes hostis.

Em relação a esses ambientes hostis e a eficiência do uso da luz pelas árvores, faz-se necessário analisar a resposta da absorção de luz pelas árvores e quais são as suas influências sobre as mesmas. Com isso, entender a relação entre a interceptação da radiação e a produtividade de biomassa em povoamentos florestais é de suma importância para o ecossistema vegetal. No entanto, uma série de fatores influenciam essa relação, o índice de área

foliar e o tipo de estrutura do dossel, por exemplo, apresentam influência sobre a interceptação da radiação, já o processo fotossintético é dependente das características internas das folhas (LANDSBERG; SANDS, 2011) que são responsáveis pela interceptação da luz.

Cannell (1989) aplicou o conceito da LUE pela primeira vez em um estudo florestal, explicando a relação da interceptação da luz e a transformação da energia luminosa em biomassa, abordou ainda sobre o particionamento do carbono fixado pelas árvores em diferentes partes constituintes das plantas, como as folhas, raízes e fuste.

Desde então, o conceito da LUE tem sido estudado no setor florestal por vários pesquisadores, que objetivam conhecer os fatores ambientais e morfológicos limitantes da LUE, e as implicações no crescimento das espécies florestais. Albaugh et al. (2016) estudaram efeitos do ambiente e diferentes tratamentos de fertilização e disponibilidade hídrica na produção de biomassa do fuste acima do solo (fuste + folhas + galhos) e biomassa total (acima do solo + raízes) em relação a LUE, para espécies do gênero do *Eucalyptus* e *Pinus*. Da Silva et al. (2016a) estudaram a quantidade de biomassa de madeira produzida por unidade de luz absorvida (LUE) e por unidade de índice de área foliar em plantações do gênero *Eucalyptus* ao longo de um gradiente climático no sudeste do Brasil em resposta a tratamentos de fertilização.

Albaugh et al. (2016) citam que a quantificação da LUE serve como ferramenta aos pesquisadores que buscam entender como os plantios respondem a submissão de diferentes tipos tratamentos silviculturais e como eles podem influenciar no crescimento das árvores. Por meio desse tipo de informação, é possível desenvolver modelos matemáticos (á exemplo os modelos baseados em processo) como forma de auxílio à previsão da resposta das árvores submetidas a um determinado tipo de tratamento, mudança climática ou de localização, como ocorre no caso de plantios de espécies exóticas.

2.4 Modelagem florestal

Ao considerar o manejo em florestas equiâneas, três elementos são de suma importância para o desenvolvimento dessa atividade, são eles: a classificação da terra, a prescrição dos tratamentos silviculturais e a predição ou projeção do crescimento e da produção. Pois, isso implica de maneira direta no gerenciamento das florestas (CAMPOS; LEITE, 2017).

Uma etapa importante dentro do manejo florestal é o uso da modelagem dos dados florestais. No qual procura-se obter modelos que sejam capazes de descrever a realidade com maior nível de precisão (CARVALHO et al., 2011). Dessa forma, dentro da modelagem florestal têm-se os modelos de produção que retratam as características correntes e os modelos

de crescimento e produção, que representam as características correntes e futuras da floresta (CAMPOS; LEITE, 2017).

Em específico para a modelagem do crescimento e produção florestal, há duas formas de abordagens dos modelos, têm-se os modelos que se baseiam em processos ou mecanicistas e os modelos biométricos (SCOLFORO, 2006) ou empíricos. Para alguns autores como Landsberg e Sands (2011) existe uma terceira abordagem, que são os modelos híbridos. Esse tipo de modelo busca realizar a combinação dos modelos baseados em processo com os modelos empíricos, no qual fazem uso das melhores características de cada um dos tipos dos modelos anteriormente citados.

Entre os modelos biométricos (ou empíricos) podem ser citados os modelos em nível de povoamento total, por classe diamétrica e por árvore individual. Já os modelos baseados em processos têm-se os modelos ecofisiológicos, os modelos baseados no clima e os modelos baseados na arquitetura das árvores (SCOLFORO, 2006).

Tanto os modelos baseados em processo quanto os modelos biométricos (ou empíricos) possibilitam que algumas variáveis de interesse da floresta (como o volume, biomassa, carbono, dados da biodiversidade e o crescimento florestal) sejam estimadas por meio do uso de outras variáveis como os dados do clima, solo e informações da densidade do povoamento (VACCHIANO; MAGNANI; COLLALTI, 2012).

Carvalho e Lima (2015) citam que os modelos biométricos (ou empíricos) baseiam-se no uso de técnicas da regressão. Esses modelos apresentam, de forma geral, a característica de serem locais, pois, uma vez calibrados para determinado local, não é capaz de incorporar mudanças nas informações fornecidas em seu ajuste inicial (VACCHIANO; MAGNANI; COLLALTI, 2012). Esses modelos apresentam ainda como objetivo principal auxiliar no processo de gerenciamento econômico dos povoamentos florestais ao invés de explicar o “como” e o “porque” do crescimento dos povoamentos florestais (LANDSBERG; SANDS, 2011).

Já os modelos baseados em processos consideram as características do meio ambiente que podem influenciar no processo produtivo madeireiro, entre elas as relações ecofisiológicas, climáticas, a temperatura e a taxa fotossintética (CARVALHO; LIMA, 2015), e assim, explicar o “como” e o “porque” do crescimento das árvores.

Para o ajuste dos modelos baseados em processos faz-se necessário utilizar grandes bases de dados, o que limita a sua aplicação de acordo com a base de dados disponível. Entretanto, são mais versáteis devido a sua aplicabilidade em áreas com diferentes características ambientais e ao número de variáveis que esse tipo de modelo é capaz de explicar.

Já os modelos empíricos são de fácil execução, pois, não requerem grandes quantidades de informações prévias para o seu ajuste. Mas, devido a essa característica acabam tornando a sua aplicação mais limitada para a amplitude dos dados no qual foi originalmente ajustado (ADAMS et al., 2013; FONTES et al., 2011).

2.4.1 Modelos de afilamento

A modelagem do afilamento descreve a forma do caule das árvores ao possibilitar que estimativas de diâmetro em qualquer altura das árvores sejam realizadas (KOIRALA et al., 2021). As equações de afilamento são particularmente úteis porque permitem que o volume de madeira do caule das árvores seja estimado em qualquer altura e diâmetro comercializáveis, e podem, dessa forma, ser substitutos das tabelas de volume (MCTAGUE; WEISKITTEL, 2021). Esse tipo de modelagem fornece informações que servirá como base para tomadas de decisões em nível de árvore individual ou de povoamento florestal (SCOLFORO et al., 2018b).

No entanto, faz-se necessário entender quais são os fatores que alteram o afilamento e a forma do fuste das árvores, tornando-as mais ou menos afiladas. Como por exemplo, o espaçamento, que quanto mais amplo, maior será a probabilidade das árvores ali inseridas terem fustes mais cônicos em comparação com os menores espaçamentos (SOUZA et al., 2016; VENDRUSCOLO et al., 2016); outro fator é o comprimento de copa, no qual, quanto maior o tamanho das copas, maior a probabilidade dos fustes das árvores serem mais cônicos, em comparação a árvores com tamanhos de copas menores (LARSON, 1963a); a idade das árvores, pois, as árvores mais novas tendem a ter fuste mais cônicos comparado as árvores de maiores idades (FRIEDL, 1989); as características genéticas, ligado a taxa de crescimento das árvores que se difere entre espécies e matérias genéticos, e árvores com maiores taxas de crescimento apresentam maior conicidade do fuste (SOARES; NETO; SOUZA, 2011); entre outros fatores.

Sabendo dos fatores que podem afetar a forma e o afilamento do fuste das árvores e buscando conhecer os multiprodutos de madeira que podem ser obtidos em diferentes alturas das árvores, é necessário o desenvolvimento de modelos que consigam descrever o perfil do fuste das árvores de forma mais próxima da realidade (HUSCH; MILLER; BEERS, 1982).

Os pesquisadores florestais tem utilizado continuamente diferentes metodologias e técnicas no desenvolvimento de equações de afilamento das árvores (SALEKIN et al., 2021), como a equação de afilamento simples (KOZAK; MUNRO; SMITH, 1969; ORMEROD, 1973), regressão polinomial segmentada (MAX; BURKHART, 1976), técnicas não paramétricas (LAPPI, 2006) e semi-paramétricas (ROBINSON; LANE; THÉRIEN, 2011), splines (SCOLFORO et al., 2018b) e

a abordagem de expoente/forma variável (SOCHA; NETZEL; CYWICKA, 2020; ZHANG et al., 2021), que foram relatadas e avaliadas quanto à exatidão e precisão.

Relacionado a abordagem do modelo de afilamento de forma variável, cabe relatar que Kozak (1988) foi quem introduziu esse conceito metodológico com o objetivo de melhorar a capacidade preditiva das funções de afilamento das árvores. Este tipo de modelagem faz uso de modelos de regressão não segmentados, que implicitamente realizam a divisão da árvore em seções sem o uso de pontos de inflexão, representando assim os formatos neilóide, parabolóide, cônico e as demais formas geométricas intermediárias ao longo do caule das árvores (BERNARDI et al., 2021).

Em conjunto com a boa representação matemática do modelo, é necessário que os fatores modificadores da forma do fuste das árvores também sejam inseridos nos modelos, para que assim, propiciem uma abordagem generalizada e flexível no uso de modelos de afilamento (OLIVEIRA et al., 2022). Entretanto, é comum que dentro do campo de modelagem do afilamento do caule das árvores os modelos ajustados sejam pouco flexíveis, e isso se deve à ausência do uso de fatores generalistas na construção desses modelos. Portanto, faz-se necessário a priorização do uso de modelos mais generalistas como substituto ao uso de vários modelos específicos para o local (BI, 2000).

Além da incorporação dos possíveis fatores modificadores da forma do fuste das árvores, a inserção de um diâmetro superior do fuste como variável preditiva do modelo também pode ser considerada, resultando assim em modelos de afilamento calibrados (OLIVEIRA et al., 2022). Já existem diferentes metodologias que são utilizadas para a calibração dos modelos com o uso de diâmetros superiores (CAO; WANG, 2015; SABATIA; BURKHART, 2015), como por exemplo, o uso da restrição algébrica, que é um método que força as funções de afilamento a passarem por um ou mais pontos previamente especificados no fuste das árvores (CAO, 2009).

Portanto, os modelos de afilamento generalizados podem contar com a inserção de variáveis do povoamento que são responsáveis por influenciarem o afilamento do fuste das árvores, em conjunto com a inserção de um diâmetro superior, que fornecerá ao modelo uma característica aleatória, já que este valor é específico por árvore conforme apresentado nas pesquisas de Arias-Rodil; Diéguez-Aranda; Burkhart (2017); Oliveira et al. (2022); Liu et al. (2020a, b).

2.4.2 Modelos baseados em processos

Para que o crescimento das árvores ocorra, existe uma série de processos envolvidos.

Dessa forma, os modelos baseados em processo simulam o comportamento de todo o sistema onde as árvores estão localizadas, por meio do uso de submodelos que descrevem os processos causais que determinam o crescimento e a forma como as árvores respondem as mudanças das características ambientais (LANDSBERG; SANDS, 2011).

Os modelos baseados em processo são utilizados para estimativas do crescimento florestal a longo prazo, para avaliar a influência das variáveis ambientais no crescimento das árvores, e analisam os efeitos da densidade dos povoamentos florestais e das práticas silviculturais sobre a produtividade da floresta (GUPTA; SHARMA, 2019).

Esse tipo de modelo descreve o conjunto de relações funcionais das árvores, as suas interações entre si e as interações com o ambiente no qual as árvores estão localizadas (LANDSBERG; SANDS, 2011). De forma geral, utilizam informações da eficiência do uso da luz (ou do uso da radiação), no qual permite estimar a eficiência dos processos de conversão da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) em produção primária bruta (GPP) (VACCHIANO; MAGNANI; COLLALTI, 2012), e posteriormente, em produtividade primária líquida (NPP).

De acordo com Jin; He; Thompson (2016), ao considerar o grau de complexidade dos processos fisiológicos considerados nos modelos, os modelos florestais baseados em processos são divididos em três classes, o fisiológico simples, o fisiológico complexo e o híbrido que é empírico-fisiológico:

- i. Os modelos fisiológicos simples utilizam relações simples entre a fotossíntese, as variáveis ambientais e biológicas, na simulação de características dos ecossistemas florestais, como por exemplo, na dinâmica de carbono. O processo de parametrização desse tipo de modelo considera os diferentes tipos de ecossistemas florestais ao invés de considerar a espécie ou tipo funcional de plantas.
- ii. Os modelos fisiológicos complexos envolvem um número maior de variáveis quando comparado aos modelos fisiológicos de simples entrada, além de considerar uma escala temporal mais refinada.
- iii. Os modelos híbridos, que é empírico-fisiológico, utilizam dados empíricos de medições do povoamento para realizar a simulação da biomassa lenhosa aérea para cada uma das plantas individualmente no lugar de simular a dinâmica do carbono por meio do uso dos processos fisiológicos. Esse modelo realiza a simulação de informações de sucessão, competição, dinâmica da composição e da estrutura da floresta.

De acordo com Palma et al. (2018), dentre as principais limitações do uso dos modelos

baseados em processos cabe citar a disponibilidade dos dados climáticos, que são restritivos. Os dados climáticos utilizados para a modelagem são oriundos de estações meteorológicas próximas aos locais de medições das árvores, como por exemplo, uma estação meteorológica instalada *in situ*. No entanto, em ausência desse tipo de informação, podem ser utilizados dados de outras estações climáticas localizadas próximas ao experimento.

Entretanto, pode ocorrer a falta de medições dos dados climáticos em determinados períodos de tempo, grandes distâncias entre os locais de estudo das árvores e a estação meteorológica, e o alto valor agregado na compra de dados climáticos. Considerando nesse caso, o uso de modelos que necessitam da disponibilização de dados climáticos diários por grandes períodos de tempo, como os modelos de simulação do crescimento florestal de espécies de crescimento lento (PALMA et al., 2018).

Mesmo com essas limitações, os modelos baseados em processo têm sido utilizados em vários estudos florestais ao longo dos anos e apresentam diferentes abordagens quanto aos objetivos e métodos de ajuste. Landsberg e Sands (2011) citam e explicam alguns dos modelos baseados em processos que são mais usuais no setor florestal, dentre eles cabe citar o FOREST-BGC (RUNNING; COUGHLAN, 1988); o BIOME-BGC (RUNNING; HUNT, 1993); o TREE-BGC (KOROL et al., 1996); o BIOMASS (MCMURTRIE; ROOK; KELLIHER, 1990); o CenW (KIRSCHBAUM, 1999); o ITE Edinburgh (THORNLEY, 1991); o PROMOD (BATTAGLIA; SANDS, 1997); e o CABALA (BATTAGLIA et al., 2004). Esses autores citam ainda alguns modelos híbridos como o PROMOD-NITGRO (BATTAGLIA; SANDS; CANDY, 1999), o FOREST 5 (ROBINSON; EK, 2003); o TRIPLEX (PENG et al., 2002) e o modelo 3-PG (LANDSBERG; WARING, 1997).

Devido a maior praticidade, alguns modelos baseados em processos destacam-se dos demais nos estudos florestais, como, por exemplo, o modelo 3-PG. O modelo 3-PG (*Physiological Principles in Predicting Growth*) é ajustado em nível do povoamento florestal, no qual entre as principais variáveis de saída têm-se os valores de biomassa do fuste, folhas e das raízes. Pode ser utilizado para estimar o volume de madeira, a área basal, a densidade do povoamento, o diâmetro a altura do peito médio, o incremento médio anual do volume de madeira, a quantidade de água disponível no solo, a transpiração do povoamento florestal e o índice de área foliar (PALMA et al., 2018).

O 3-PG é amplamente utilizado como ferramenta auxiliar no inventário florestal e no planejamento estratégico dos recursos florestais, como por exemplo, em estudos do zoneamento de áreas produtivas para plantios de *Eucalyptus* (LEMOS et al., 2018); na estimativa de variáveis dendrométricas e produção florestal (OLIVEIRA et al., 2018);

FORRESTER; TANG, 2016; GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2016); efeitos da fertilidade do solo na produção florestal (VEGA-NIEVA et al., 2013); e na parametrização do modelo para diferentes espécies florestais (ALMEIDA; LANDSBERG; SANDS, 2004; BORGES et al., 2012; GONZALEZ-BENECKE et al., 2016; POTITHEP; YASUOKA, 2011; SANDS; LANDSBERG, 2002; XIE; WANG; LEI, 2017).

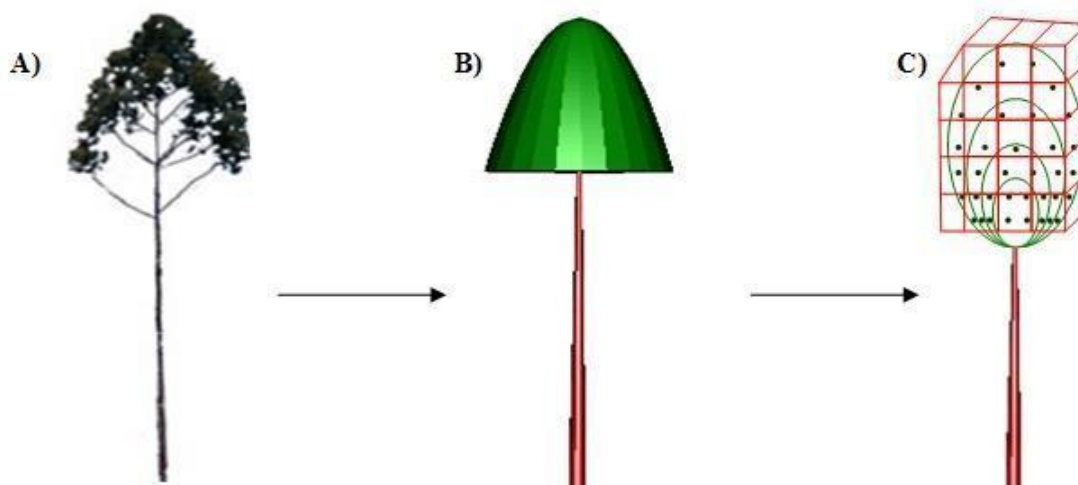
Entretanto, a modelagem das informações florestais tem avançado, e com ela, surgiram novas técnicas de ajuste, no qual, o modelo MAESTRA tem-se destacado, que é um MBP que é diferenciado dos demais MBP por trabalhar com informações em nível de árvore individual.

2.4.2.1 MAESTRA

O modelo MAESTRA foi desenvolvido por Medlyn (2004), no entanto, apresenta uma série cronológica de desenvolvimento e de usos em vários tipos de formações florestais (<https://maespa.github.io/bibliography.html>). Esse modelo é uma evolução do modelo MAESTRO (WANG; JARVIS; BENSON, 1990), e recentemente sofreu alterações, no qual foi implementado um módulo completo de balanço hídrico do solo e da planta denominado SPA (WILLIAMS; BOND; RYAN, 2001), e passou a ser chamado de MAESPA (DUURSMA; MEDLYN, 2012). É um modelo programado em linguagem FORTRAN 90 com formulário livre (“free form”), no qual fica disponível para o usuário (<https://maespa.github.io/download.html>) realizar alterações em seu código fonte, caso haja necessidade.

O modelo MAESTRA representa a floresta tridimensionalmente, analisando cada árvore de forma individual, calculando a interceptação e a distribuição da radiação solar dentro das copas das árvores. Com o uso de submodelos fisiológicos estima-se a fotossíntese, respiração e a transpiração de forma integrada para a copa das árvores (Le MAIRE et al., 2013). A copa da árvore é dividida em camadas horizontais, e cada uma dessas camadas apresentam vários “pontos de grade”, e para cada ponto, as distribuições dos ângulos das folhas e as propriedades ópticas foliares são utilizadas para o cálculo da APAR (FORRESTER et al., 2014) (Figura 1).

Figura 1- Representação de uma árvore de eucalipto via MAESTRA.



Em “A” é possível observar a forma como uma árvore de eucalipto é observada em campo; em “B” tem-se a representação da forma como a árvore é entendida pelo modelo MAESTRA, e representada pelo pacote *Maeswrap* do *software* R versão 3.4.1 (R CORE TEAM, 2018), já em “C” é representado os pontos de grade distribuídos pela copa das árvores.

O modelo de fotossíntese proposto por Farquhar; Von Caemmerer e Berry (1980) é utilizado para estimar a fotossíntese foliar, o modelo de Ball; Woodrow e Berry (1987) é utilizado para a estimativa da condutância estomática, já para o cálculo da transpiração faz-se uso da fórmula de Penman-Monteith (JARVIS; MCNAUGHTON, 1986).

As variáveis ambientais utilizadas para o desenvolvimento das simulações com o modelo MAESTRA são a radiação, temperatura do ar, umidade do ar, velocidade do vento e concentração atmosférica de CO₂ acima do dossel. Todavia, o modelo assume que a umidade do ar, a temperatura e a concentração de CO₂ estão uniformemente distribuídas dentro do dossel (HANSON et al., 2004).

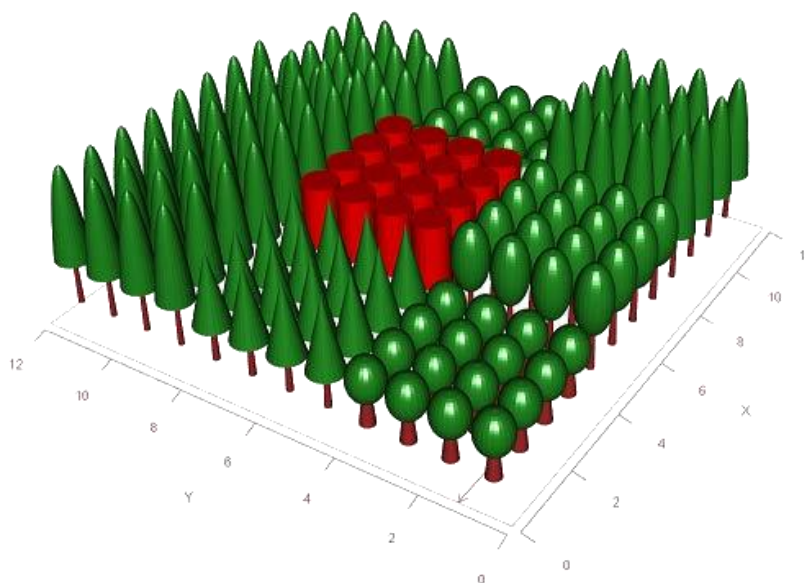
Têm-se ainda que fornecer como *input* ao modelo informações sobre as posições, dimensões e a área foliar para cada árvore do povoamento em análise. A copa das árvores é dividida em um ponto de grade no formato 3D com um determinado número de camadas horizontais e determinados números de pontos por camadas (“C”, Figura 1). Em cada um dos pontos na grade, a densidade de área foliar e as frações da área de inclinação das folhas são calculadas por meio do uso de distribuições beta normalizadas (Le MAIRE et al., 2013).

O modelo MAESTRA também é usual para representar diferentes tipos de dosséis florestais, por meio do uso de uma matriz de copas de árvores tridimensionalmente representadas, considerando o tipo de copa que mais representa a espécie florestal em análise. Pode ser simplificada como esférica, cônica, elipsoidal, parabolóide, cilíndrica ou em formato

de “caixa” (para representar pequenos ecossistemas) (

Figura 2). Além disso, o modelo permite que sejam consideradas diferentes espécies dentro do povoamento em análise, desde que especificadas o formato que mais representa a copa de cada uma das espécies e as suas respectivas propriedades.

Figura 2- Representação de alguns dos tipos de copas que o modelo MAESTRA considera, em vermelho estão destacadas as árvores que o modelo está analisando.



Fonte: Manual técnico do MAESTRA (<https://maespa.github.io/manual.html>).

O modelo MAESTRA fornece a resposta da APAR (radiação fotossinteticamente ativa absorvida) para árvores específicas em estudo, mas, é dependente da estrutura da copa e da forma como a radiação é distribuída sobre as copas. As posições de cada uma das árvores no talhão devem ser conhecidas e explicadas por um sistema de coordenadas cartesianas (BAUERLE et al., 2004), pois, as árvores que se encontram ao redor da árvore em estudo são consideradas pelo modelo, uma vez que, o MAESTRA determina a quantidade de radiação incidente na copa alvo após passar pelas demais copas vizinhas (HANSON et al., 2004).

A penetração da radiação em cada ponto de grade pode ser calculada para dois comprimentos de onda (a PAR e NIR), considerando a radiação direta e difusa (HANSON et al., 2004), por meio do uso da Lei de Lambert-Beer. O método de Norman e Welles (1983) é utilizado para calcular a dispersão múltipla da radiação dentro das copas das árvores e a penetração em cada um dos pontos. O modelo MAESTRA fornecerá para cada ponto de grade dentro das copas valores de frações da área foliar iluminada, ensolarada e a densidade de fluxo incidente para cada fração. Dessa forma, o valor da APAR diário por árvore será calculado

somando os valores de seus pontos de grade simulados ao longo do dia (Le MAIRE et al., 2013).

Alguns trabalhos já vêm sendo desenvolvidos com o uso do modelo MAESTRA para diferentes tipos de espécies florestais, como o de Bauerle et al. (2004); Bauerle et al. (2009); Forrester et al. (2013); Ibrom et al. (2006); Medlyn et al. (2007); Nelson et al. (2016); e de Richards e Schmidt (2010).

REFERÊNCIAS

- ABRAF. **Anuário estatístico ABRAF 2013 ano base 2012**. Brasília: Associação Brasileira dos Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF), 2013.
- ADAMS, H. D. et al. Empirical and process-based approaches to climate-induced forest mortality models. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 4, p. 438, 2013.
- ALBAUGH, T. J. et al. Tamm Review: Light use efficiency and carbon storage in nutrient and water experiments on major forest plantation species. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 376, p. 333–342, 2016.
- ALBAUGH, T. J. et al. A common garden experiment examining light use efficiency and heat sum to explain growth differences in native and exotic *Pinus taeda*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 425, p. 35–44, 2018.
- ALMEIDA, A. C.; LANDSBERG, J. J.; SANDS, P. J. Parameterisation of 3-PG model for fast-growing *Eucalyptus grandis* plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, n. 1–2, p. 179–195, 2004.
- ARIAS-RODIL, M.; DIÉGUEZ-ARANDA, U.; BURKHART, H. E. Effects of measurement error in total tree height and upper-stem diameter on stem volume prediction. **Forest Science**, Lawrence, v. 63, n. 3, p. 250–260, 2017.
- BALL, J. T.; WOODROW, I. E.; BERRY, J. A. A Model Predicting Stomatal Conductance and its Contribution to the Control of Photosynthesis under Different Environmental Conditions. **Progress in Photosynthesis Research**, Switzerland, v. 90, n. 1, p. 221–224, 1987.
- BATTAGLIA, M. et al. CABALA: a linked carbon, water and nitrogen model of forest growth for silvicultural decision support. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, n. 1–2, p. 251–282, 2004.
- BATTAGLIA, M.; SANDS, P. Modelling Site Productivity of *Eucalyptus globulus* in Response to Climatic and Site Factors. **Functional Plant Biology**, Australia, v. 24, n. 6, p. 831–850, 1997.
- BATTAGLIA, M.; SANDS, P. J.; CANDY, S. G. Hybrid growth model to predict height and volume growth in young *Eucalyptus globulus* plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 120, n. 1–3, p. 193–201, 1999.
- BAUERLE, W. L. et al. Modeling intra-crown and intra-canopy interactions in red maple: assessment of light transfer on carbon dioxide and water vapor exchange. **Tree Physiology**, Oxford, v. 24, n. 5, p. 589–597, 2004.
- BAUERLE, W. L. et al. Exploring the importance of within-canopy spatial temperature variation on transpiration predictions. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 60, n. 13, p. 3665–3676, 2009.
- BENIN, C. C.; WATZLAWICK, L. F.; HILLIG, É. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus benthamii* sob efeito do espaçamento de plantio. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 4, p. 1375–1384, 2017.

- BERNARDI, L. K. et al. Different models for *Eucalyptus* sp. Trunk taper for the Brazilian forestry scenario. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 3, p. 1364–1382, 2021.
- BI, H. Trigonometric Variable-Form Taper Equations for Australian *Eucalypts*. **Forest Science**, Lawrence, v. 46, n. 3, p. 397–409, 2000.
- BINKLEY, D. A hypothesis about the interaction of tree dominance and stand production through stand development. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 190, n. 2–3, p. 265–271, 2004.
- 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, p. 271–283, 2017.
- BINKLEY, D.; LACLAU, J. P.; STERBA, H. Why one tree grows faster than another: Patterns of light use and light use efficiency at the scale of individual trees and stands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 288, p. 1–4, 2013.
- BOOTH, T. H. *Eucalypt* plantations and climate change. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 28–34, 2013.
- BORGES, J. S. et al. Parameterization of the 3-PG model for *eucalypt* in the region of Cerrado in Minas Gerais state. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 3, p. 567–578, 2012.
- BROCKERHOFF, E. G. et al. Role of *eucalypt* and other planted forests in biodiversity conservation and the provision of biodiversity-related ecosystem services. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 43–50, 2013.
- CAMARGO ZANI LEMOS, C. et al. Estimation, zoning and sensitive analyses of forest productivity of *Eucalyptus* in northeast São Paulo using the 3-PG model. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 46, p. 459–471, 2018.
- CAMPOE, O. C. **Ecologia da produção e da competição intra-específica do *Eucalyptus grandis* ao longo de um gradiente de produtividade no Estado de São Paulo**. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2012.
- 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, 2013a.
- CAMPOE, O. C. et al. Stem production, light absorption and light use efficiency between dominant and non-dominant trees of *Eucalyptus grandis* across a productivity gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 288, p. 14–20, 2013b.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. 5. ed. Viçosa: Ufv, 2017.
- CANNELL, M. G. R. Physiological basis of wood production: A review. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 4, n. 1–4, p. 459–490, 1989.
- CAO, Q. V. Calibrating a Segmented Taper Equation with Two Diameter Measurements. **Southern Journal of Applied Forestry**, Washington, v. 33, n. 2, p. 58–61, 2009.

- CAO, Q. V.; WANG, J. Evaluation of methods for calibrating a tree taper equation. **Forest Science**, Lawrence, v. 61, n. 2, p. 213–219, 2015.
- CARVALHO, S. DE P. C. et al. Modelos não lineares generalizados aplicados na predição da área basal e volume de *Eucalyptus* clonal. **CERNE**, Lavras, v. 17, n. 4, p. 541–548, 2011.
- CARVALHO, S. DE P. C.; LIMA, M. P. Uma proposta para o preparo de bases de dados utilizadas nos ajustes de modelos de crescimento e produção florestal. **Advanced Forest Science**, Mato Grosso, n. 3, p. 69–72, 2015.
- CASTRO, C. A. DE O. et al. Comportamento da interação genótipos por locais aos três e nove anos em clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 46, n. 120, 21 dez. 2018.
- CHARBONNIER, F. et al. Increased light-use efficiency sustains net primary productivity of shaded coffee plants in agroforestry system. **Plant, Cell & Environment**, Oxford, v. 40, n. 8, p. 1592–1608, 2017.
- COOK, R. L.; BINKLEY, D.; STAPE, J. L. *Eucalyptus* plantation effects on soil carbon after 20 years and three rotations in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 359, p. 92–98, 2016.
- COSENZA, 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.
- DA SILVA, R. M. L. et al. Fertilization Response, Light Use, and Growth Efficiency in *Eucalyptus* Plantations across Soil and Climate Gradients in Brazil. **Forests**, Switzerland, v. 7, n. 6, p. 117, 2016a.
- DA SILVA, R. S. et al. Desempenho Silvicultural de *Tectona grandis* L. f. em Diferentes Espaçamentos em Cáceres, MT. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 23, n. 3, p. 397–405, 2016b.
- DE OLIVEIRA, C. M. M. et al. Modelo 3-PG na previsão do potencial produtivo de áreas para plantios comerciais de *Eucalyptus* spp. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 1, p. 249–262, 2018.
- DE OLIVEIRA, X. M. et al. Impact of the inclusion of the sociological position and upper-stem diameter in the taper modeling of *Pinus taeda* trees, subjected to different thinning regimes. **Trees, Forests and People**, Netherlands, v. 8, 2022.
- DO NASCIMENTO, D. F. et al. Crescimento inicial de seis espécies florestais em diferentes espaçamentos. **CERNE**, Lavras, v. 18, n. 1, p. 159–165, 2012.
- DUURSMA, R. A.; MEDLYN, B. E. MAESPA: A model to study interactions between water limitation, environmental drivers and vegetation function at tree and stand levels, with an example application to [CO₂] × drought interactions. **Geoscientific Model Development**, Europe, v. 5, n. 4, p. 919–940, 2012.
- ELLSWORTH, David S. et al. Elevated CO₂ does not increase eucalypt forest productivity on a low-phosphorus soil. **Nature Climate Change**, United Kingdom, v. 7, n. 4, p. 279–282, 2017.
- FARQUHAR, G. D.; VON CAEMMERER, S.; BERRY, J. A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. **Planta**, Berlin, v. 149, n. 1, p. 78–90, 1980.

- FERRAZ, S. F. DE B. et al. Effects of *Eucalyptus* plantations on streamflow in Brazil: Moving beyond the water use debate. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 453, 2019.
- FONTES, L. et al. Models for supporting forest management in a changing environment. **Forest Systems**, Spain, v. 3, n. 4, p. 8, 2011.
- 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, p. 21–30, 2013.
- FORRESTER, D. I. et al. Using a stand-level model to predict light absorption in stands with vertically and horizontally heterogeneous canopies. **Forest Ecosystems**, Berlin, v. 1, n. 1, p. 1–19, 2014.
- FORRESTER, D. I.; TANG, X. Analysing the spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests and the effects of stand density using the 3-PG model. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 319, p. 233–254, 2016.
- FRIEDL, R. A. **Dinâmica e prognose da forma dos fustes em povoamentos plantados de *Araucarian angustifolia* (Bert.) O. Ktze**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1989.
- GONÇALVES, J. L. DE 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.
- GONZALEZ-BENECKE, C. A. et al. Regional validation and improved parameterization of the 3-PG model for *Pinus taeda* stands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 361, p. 237–256, 2016.
- GONZÁLEZ-GARCÍA, M. et al. Application of a process-based model for predicting the productivity of *Eucalyptus nitens* bioenergy plantations in Spain. **GCB Bioenergy**, Germany, v. 8, n. 1, p. 194–210, 2016.
- GOULART, M. et al. Massa específica básica e massa seca de madeira de *Eucalyptus grandis* sob o efeito do espaçamento de plantio e da posição axial no tronco. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 167–175, 2003.
- GUPTA, R.; SHARMA, L. K. The process-based forest growth model 3-PG for use in forest management: A review. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 397, p. 55–73, 2019.
- HANSON, P. J. et al. Oak Forest carbon and water simulations: model intercomparisons and evaluations against independent data. **Ecological Monographs**, Ithaca, v. 74, n. 3, p. 443–489, 2004.
- HUBBARD, R. M. et al. Contrasting water use of two *Eucalyptus* clones across a precipitation and temperature gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 475, 2020.
- HUSCH, B.; MILLER, C. I.; BEERS, T. W. **Forest Mensuration**. New York: Wiley, 1982.
- IBROM, A. et al. A comparative analysis of simulated and observed photosynthetic CO₂ uptake in two coniferous forest canopies. **Tree Physiology**, Oxford, v. 26, n. 7, p. 845–864, 2006.

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório anual IBÁ 2021, ano base 2020**, 2021. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2022.

JARVIS, P. G.; MCNAUGHTON, K. G. Stomatal Control of Transpiration: Scaling Up from Leaf to Region. **Advances in Ecological Research**, United States, v. 15, n. C, p. 1–49, 1986.

JIN, W.; HE, H. S.; THOMPSON, F. R. Are more complex physiological models of forest ecosystems better choices for plot and regional predictions?. **Environmental Modelling & Software**, Netherlands, v. 75, p. 1–14, 2016.

KIRSCHBAUM, M. U. F. CenW, a forest growth model with linked carbon, energy, nutrient and water cycles. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 118, n. 1, p. 17–59, 1999.

KOIRALA, A. et al. Developing taper equations for planted teak (*Tectona grandis* L.F.) trees of central lowland Nepal. **Trees, Forests and People**, Netherlands, v. 5, 2021.

KOROL, R. L. et al. Testing a mechanistic model for predicting stand and tree growth. **Forest Science**, Lawrence, v. 42, n. 2, p. 139–153, 1996.

KOZAK, A. A variable-exponent taper equation. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 18, n. 11, p. 1363–1368, 1988.

KOZAK, A.; MUNRO, D. D.; SMITH, J. H. G. Taper Functions and their Application in Forest Inventory. **The Forestry Chronicle**, Mattawa, v. 45, n. 4, p. 278–283, 1969.

LANDSBERG, J. J.; WARING, R. H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 95, n. 3, p. 209–228, 1997.

LANDSBERG, J.; SANDS, P. **Physiological Ecology of Forest Production: Principles, Processes and Models**. London: Academic Press, 2011.

LAPPI, J. A multivariate, nonparametric stem-curve prediction method. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 36, n. 4, p. 1017–1027, 2006.

LARSON, P. R. Stem Form Development of Forest Trees. **Forest Science**, Lawrence, v. 9, p. a0001-42, 1963.

LE MAIRE, G. et al. Tree and stand light use efficiencies over a full rotation of single- and mixed-species *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 288, p. 31–42, 2013.

LIAO, K. L. et al. A shadow detector for photosynthesis efficiency. **Journal of Theoretical Biology**, v. 414, p. 231–244, 2017.

LIU, Y. et al. Incorporating climate effects in *Larix gmelinii* improves stem taper models in the Greater Khingan Mountains of Inner Mongolia, northeast China. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 464, 2020a.

LIU, Y. et al. Tree profile equations are significantly improved when adding tree age and stocking degree: an example for *Larix gmelinii* in the Greater Khingan Mountains of Inner Mongolia, northeast China. **European Journal of Forest Research**, v. 139, n. 3, p. 443–458, 2020b.

- MAX, T. A.; BURKHART, H. E. Segmented polynomial regression applied to taper equations. **Forest Science**, Lawrence, v. 22, n. 3, p. 283–289, 1976.
- MCMURTRIE, R. E.; ROOK, D. A.; KELLIHER, F. M. Modelling the yield of *Pinus radiata* on a site limited by water and nitrogen. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 30, n. 1–4, p. 381–413, 1990.
- MCTAGUE, J. P.; WEISKITTEL, A. Evolution, history, and use of stem taper equations: a review of their development, application, and implementation. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 51, n. 2, p. 210–235, 2021.
- MEDLYN, B. A MAESTRO retrospective. In: MENCUCCINI, M. et al. (Eds.). **Forests at the land-atmosphere interface**. Wallingford: CABI International, 2004. p. 105–122.
- MEDLYN, B. E. et al. Linking leaf and tree water use with an individual-tree model. **Tree Physiology**, Oxford, v. 27, n. 12, p. 1687–1699, 2007.
- MONTEITH, J. L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences**, v. 281, n. 980, p. 277–294, 1977.
- NELSON, A. S. et al. Light absorption and light-use efficiency of juvenile white spruce trees in natural stands and plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 376, p. 158–165, 2016.
- NORMAN, J. M.; WELLES, J. M. Radiative transfer in an array of canopies. **Agronomy Journal**, United States, v. 75, n. 3, p. 481–488, 1983.
- OLIVEIRA, R. DE S. et al. Wood energy yield for *Eucalyptus* clones growing under seasonal drought-stress in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, United Kingdom, v. 154, 2021.
- ORMEROD, D. W. A simple bole model. **The Forestry Chronicle**, Mattawa, v. 49, n. 3, p. 136–138, 1973.
- PALMA, J. H. N. et al. Using high-resolution simulated climate projections in forest process-based modelling. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 263, p. 100–106, 2018.
- PENG, C. et al. TRIPLEX: a generic hybrid model for predicting forest growth and carbon and nitrogen dynamics. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 153, n. 1–2, p. 109–130, 2002.
- POTITHEP, S.; YASUOKA, Y. Application of the 3-PG model for gross primary productivity estimation in deciduous Broadleaf Forests: a study area in Japan. **Forests**, Switzerland, v. 2, n. 2, p. 590–609, 2011.
- RICHARDS, A. E.; SCHMIDT, S. Complementary resource use by tree species in a rain forest tree plantation. **Ecological Applications**, Washington, v. 20, n. 5, p. 1237–1254, 2010.
- ROBINSON, A. P.; EK, A. R. Description and validation of a hybrid model of forest growth and stand dynamics for the Great Lakes region. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 170, n. 1, p. 73–104, 2003.
- ROBINSON, A. P.; LANE, S. E.; THÉRIEN, G. Fitting forestry models using generalized additive models: a taper model example. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 41, n. 10, p. 1909–1916, 2011.

- RUNNING, S. W.; COUGHLAN, J. C. A general model of forest ecosystem processes for regional applications I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 42, n. 2, p. 125–154, 1988.
- RUNNING, S. W.; HUNT, E. R. Generalization of a Forest Ecosystem Process Model for Other Biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models. **Scaling Physiological Processes**, Cambridge, p. 141–158, 1993.
- SABATIA, C. O.; BURKHART, H. E. On the use of upper stem diameters to localize a segmented taper equation to new trees. **Forest Science**, Lawrence, v. 61, n. 3, p. 411–423, 2015.
- SALEKIN, S. et al. Global Tree Taper Modelling: a review of applications, methods, functions, and their parameters. **Forests**, Switzerland, v. 12, n. 7, p. 913, 2021.
- SANDS, P. J.; LANDSBERG, J. J. Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 163, n. 1–3, p. 273–292, 2002.
- SARTORIO, I. P. **Avaliação e modelagem do crescimento de florestas energéticas de eucalipto plantadas em diferentes densidades**. Curitiba: Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, 2014.
- SCOLFORO, H. F. et al. Comparison of taper functions applied to eucalypts of varying genetics in Brazil: application and evaluation of the penalized mixed spline approach. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 48, n. 5, p. 568–580, 2018.
- SCOLFORO, J. R. S. **Manejo Florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. v. 1. 438p.
- SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal: modelos de crescimento e produção florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2006. v. 1. 393p.
- SOARES, C. P. B.; NETO, F. DE P.; DE SOUZA, A. L. **Dendrometria e inventário florestal**. 3. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2011, 276 p.
- SOCHA, J.; NETZEL, P.; CYWICKA, D. Stem taper approximation by artificial neural network and a regression set models. **Forests**, Switzerland, v. 11, n. 1, 2020.
- SOUZA, R. R. et al. Stem form of *Eucalyptus* trees in plantations under different initial densities. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, p. 33–40, 2016.
- THORNLEY, J. H. M. A Transport-resistance model of forest growth and partitioning. **Annals of Botany**, Oxford, v. 68, n. 3, p. 211–226, 1991.
- VACCHIANO, G.; MAGNANI, F.; COLLALTI, A. Modeling Italian forests: state of the art and future challenges. **iForest - Biogeosciences and Forestry**, Viterbo, v. 5, n. 1, p. 113–120, 2012.
- VEGA-NIEVA, D. J. et al. Developing a general method for the estimation of the fertility rating parameter of the 3-PG model: application in *Eucalyptus globulus* plantations in northwestern Spain. **Canadian Journal Of Forest Research**, Ottawa, v. 43, n. 7, p. 627–636, 2013.
- VENDRUSCOLO, D. G. S. et al. Forma do fuste de árvores de *Tectona grandis* em diferentes espaçamentos. **Advanced Forest Science**, Mato Grosso, n. 3, p. 51–54, 2016.

VILLA, E. B. **Aspectos silviculturais e ecológicos em área de restauração florestal com diferentes espaçamentos de plantio**. Seropédica: Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2012.

VILLA, E. B. et al. Aporte de serapilheira e nutrientes em área de restauração florestal com diferentes espaçamentos de plantio. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 23, n. 1, p. 90–99, 2016.

WANG, Y. P.; JARVIS, P. G.; BENSON, M. L. Two-dimensional needle-area density distribution within the crowns of *Pinus radiata*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 32, n. 2–4, p. 217–237, 1990.

WILLIAMS, M.; BOND, B. J.; RYAN, M. G. Evaluating different soil and plant hydraulic constraints on tree function using a model and sap flow data from ponderosa pine. **Plant, Cell & Environment**, Oxford, v. 24, n. 7, p. 679–690, 2001.

XIE, Y.; WANG, H.; LEI, X. Application of the 3-PG model to predict growth of *Larix olgensis* plantations in northeastern China. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 406, p. 208–218, 2017.

ZHANG, S. et al. Variable-exponent taper equation based on multilevel nonlinear mixed effect for Chinese fir in China. **Forests**, Switzerland, v. 12, n. 2, p. 1–13, 2021.

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

O artigo 1 foi redigido de acordo com as normas do Journal: Ecological Modelling e os demais artigos foram redigidos conforme a norma para publicação periódica científica NBR 6022 (ABNT, 2003)

ARTICLE 1: The evolution of the process-based model MAESTRO: a systematic and bibliometric review

Anny Francielly Ataide Gonçalves*^a, Lorena Oliveira Barbosa^a, Juscelina Arcanjo dos Santos^a,
Otávio Camargo Campoe^b, José Roberto Soares Scolforo^b

^aGraduate Program in Forest Engineering, Federal University of Lavras (UFLA), Lavras, Minas Gerais State, 37200-900, Brazil. ORCID: 0000-0001-5189-0259, 0000-0002-8133-1084; 0000-0003-4731-2610.

^bGraduate Program in Forest Engineering, Department of Forest Engineering, Federal University of Lavras (UFLA), Lavras, Minas Gerais State, 37200-900, Brazil. ORCID: 0000-0001-9810-8834; 0000-0002-5888-6751.

*Corresponding author.

E-mail address: annyfrancielly@gmail.com

Highlights

- MAESTRO, MAESTRA, and MAESPA are tree-level, process-based models.
- MAESTRO, MAESTRA, and MAESPA can be used to calculate tree light-use in forest plantations.
- The evolution of the MAESTRO, MAESTRA, and MAESPA models is analyzed.
- MAESTRO, MAESTRA, and MAESPA models support silvicultural decision-making.
- We identify the strengths and weaknesses of the model that can be improved.

Abstract

The need to understand what factors influence tree development has leveraged the use of process-based modeling in several studies around the world. Process-based models (PBMs) have been developed from a system of mathematical equations representing the biological systems of trees and provide crucial information for forest managers. Thus, this study aimed to perform a bibliographic and bibliometric review of the lineages of PBMs MAESTRO, MAESTRA, and MAESPA. The PBM - Multi Array Evaporation Stand Tree Radiation Orgy (MAESTRO) was the first of its lineage, developed in 1988. After that, the code was restructured and internal structural changes were made, such as the incorporation of gas exchange models in the leaves, becoming MAESTRA. The most recent version of this lineage of PBMs originated from the union of MAESTRA with the PBM called soil-plant-atmosphere (SPA), thus originating MAESPA. MAESPA arose out of the need to understand the hydraulic relations of trees and the soil water balance. By the deadline of this study, 85 published articles using this PBM lineage were found in the Scopus article indexer between 1989-2021 (return period of articles). Its first publication was in 1989 when the PBM MAESTRO was used in a study on a review of deposition forms of

atmospheric pollutants in forest areas. Through bibliometric analysis, we found that 2013 was the year with the most publications (8 publications); *Forest Ecology and Management* (15 publications, h-index: 10) is the journal with the highest number of publications on this topic; and the most productive researcher identified was William L. Bauerle (22 publications, USA). The authors' keywords are grouped into seven groups: (i) forest data estimated using PBM; (ii) the canopy effect on atmospheric carbon absorption; (iii) carbon balance processes on earth; (iv) climate change; (v) MAESPA; (vi) MAESTRA; and (vii) tree light use efficiency. The separation of the themes showed that the new focus of the search is the studies directed at *Eucalyptus* and the use of the PBM MAESPA. The USA was identified as the country with the highest number of citations in the world (1584, 40 publications) when it refers to research using the PBMs MAESTRO; MAESTRA, and MAESPA. The results presented in this study can serve as a theoretical compilation of great importance for understanding the applicability of PBMs MAESTRO, MAESTRA, and MAESPA in different types of forestry studies, making these PBMs a support tool in the decision-making process of forest managers.

Keywords: Forest management, individual tree, MAESTRA, MAESPA, bibliographic.

1 Introduction

The analysis of forest growth and production processes can be developed using biometric models, process-based models (Scolforo, 2006), or hybrid models (Landsberg and Sands, 2011) that combine the best features of biometric and process-based models. These classes of models are complementary and not mutually exclusive, which allows the needs of forest managers.

Biometric models are the classical models in forestry studies. This class of models is developed from the effect of the growth of trees and/or forest stands; it uses correlations between the variables of a system and is represented by a system of equations (Caldeira et al., 2020). These models are simple to use because they do not require large amounts of prior information for their adjustment. However, this simple characteristic of their application is limited to the range of data for which they were originally adjusted (Fontes et al., 2010; Adams et al., 2013).

Process-based modeling, on the other hand, uses physical and biological information of the system under study, which allows its applicability in areas with different environmental characteristics, but may be of lower accuracy (Caldeira et al., 2020). The adjustment of this class of model must use large databases, which limits its application according to the available database. However, they are more versatile because of the number of variables that this type of model can explain (Fontes et al., 2010; Adams et al., 2013).

Process-based modeling provides insights into the behavior of individual trees, groups of trees, or entire ecosystems (Landsberg and Sands, 2011; Gupta and Sharma, 2019). They are useful tools for predicting and understanding ecological processes and tree responses to environmental variations (Cuddington et al., 2013). Because they mathematically represent the biological systems

of plants, encompassing their physiological and ecological mechanisms as well as their interactions with the environment by using predictive algorithms (Johnsen et al., 2001, Landsberg and Sands, 2011), which allow these models to be reapplied in different environments (Cuddington et al., 2013).

An important feature that stands out is that process-based models (PBMs) can explain the "why" of tree development, which makes it possible to complement the information on forest stand development. This type of information is efficient in identifying and verifying what interferes with the development of forests, and that allows obtaining information from areas where there is a desire to reforest, but there is no preliminary information to meet the needs of forest planning. Currently, the success of the purchase of new land has been based on empirical methods to determine the quality of the site (Klippel, 2015).

One class of PBM that has been highlighted among forestry studies is the MAESTRO, MAESTRA, and MAESPA lineages, which are PBMs used in studies on the behavior of different forest species located in environments with contrasting edaphoclimatic characteristics, such as in Australia, Brazil, the United States of America, Costa Rica, Scotland, Vietnam, Germany, China, Belgium, and other countries, as shown in table 3.

The history of the PBM - Multi Array Evaporation Stand Tree Radiation Orgy (MAESTRO) started in 1988 in the research developed by Wang. Later, this PBM was revised and modified by Medlyn (2004) and was named MAESTRA. The last modification of this model was made for Duursma and Medlyn (2012), who combined the PBM MAESTRA with the PBM soil-plant-atmosphere (SPA), creating the last PBM of this line named MAESPA. Nowadays, the PBM MAESTRO is not usual, just MAESTRA and MAESPA are active. These models provide information at the level of individual trees, allowing the development of research with more than one species. The code is free and open-source (Medlyn, 2004; Duursma and Medlyn, 2012).

It is necessary to understand the specifics of each of these models so that they can be used properly. And for this, review studies play a key role as a link between scientific research (theoretical basis) and technology (practical applicability of the models) (Mirkouei et al., 2017). In this way, bibliometric analyzes complement review studies by analyzing the main knowledge gaps in the field of science (Leal et al., 2019) and previous research, thus exploring the development of studies (Guan; Kang; Liu, 2018).

Review articles are already available for some PBMs, such as the 3-PG (Gupta and Sharma, 2019) and the forest landscape models (Xi et al., 2009). On this topic, there is also a bibliometric article that deals with different PBMs in forestry studies (Gonçalves et al., 2021). However, thus

far, no bibliographic and/or bibliometric review has been found in the literature on PBM MAESTRO, MAESTRA, or MAESPA.

In this way, we have combined the bibliographic and bibliometric review of the PBMs MAESTRO, MAESTRA, and MAESPA to provide an analysis of the development and improvements of this lineage of process-based models; review previous studies that have used MAESTRO, MAESTRA, or MAESPA; identify and understand the applicability of these PBMs can provide to forest managers; identify the authors, journals, and countries that have advanced research using this lineage of PBMs; and analyze what are the main themes and topics of emerging research using MAESTRO, MAESTRA, and MAESPA. Complementing this, we will use the results found to demonstrate the potential of these models to quantify the effects of climate change on forest development.

2 Thematic contextualization and applied methods

This article was developed using two complementary approaches. We conducted a systematic literature review addressing the state of the art of science on the process-based models (PBMs) MAESTRO, MAESTRA, and MAESPA, followed by a bibliometric analysis.

The procedure and methods used to conduct this research are shown in Figure 1.

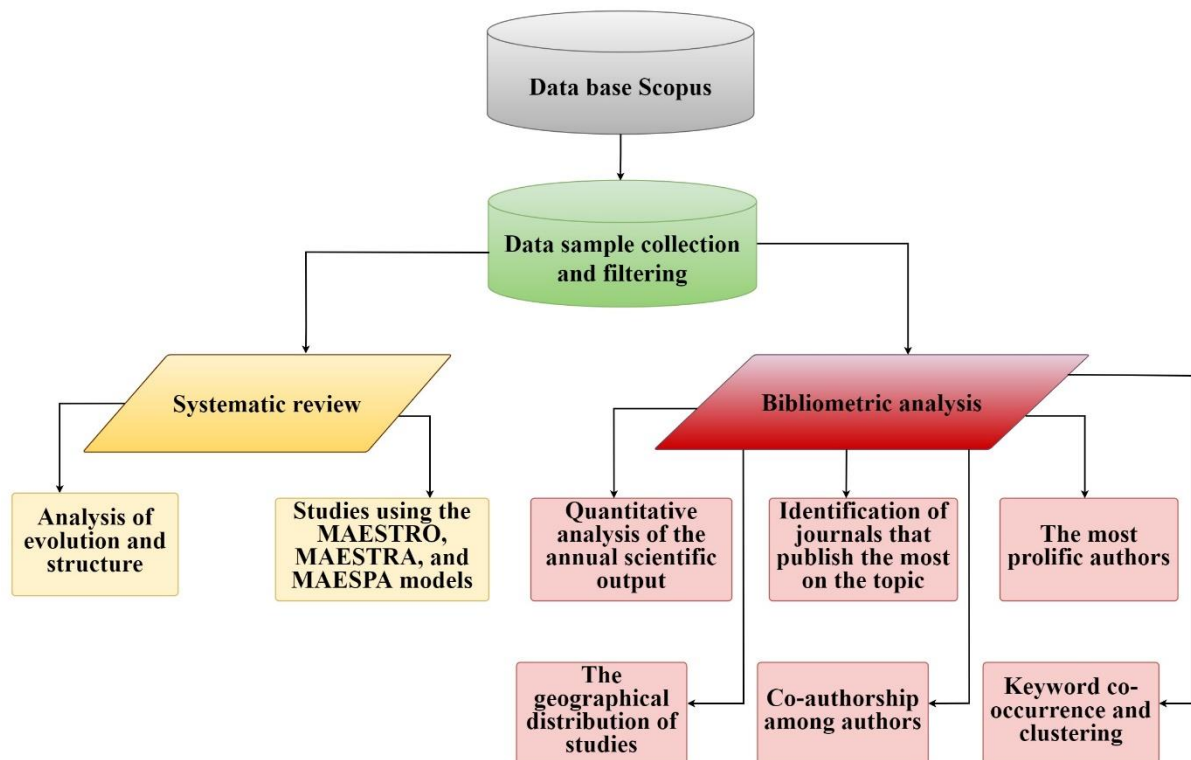


Fig. 1. Summary of the methods used for developing this research.

First, a systematic approach to the literature on the subject was applied to collect and filter the sample of data. The systematic review of the MAESTRO, MAESTRA, and MAESPA models was performed directly, as proposed by Gupta and Sharma (2019), who conducted a systematic review of the PBM Physiological Processes Predicting Growth (3-PG). Initially, process-based modeling is defined, and some examples of PBMs applied in forestry studies are presented. The main findings are outlined in section 3.

Then, the PBMs MAESTRO, MAESTRA, and MAESPA are analyzed, and their evolution and structure are presented in section 4. Subsequently, different studies using the MAESTRO, MAESTRA, and MAESPA models are outlined in section 5. Last, these three models are examined by bibliometric analysis.

To collect systematic review data, we used the information available on the MAESPA website “<https://maespa.github.io/bibliography.html>”, which lists the main publications that have applied these PBMs, in addition to the database of peer-reviewed literature Scopus, which is a classical research mechanism, consulting studies made available up to March 2022. However, no articles were found for 2022, in section 5 summarizes the articles found in this search.

Subsequently, bibliometric analysis was applied to investigate the sample of data collected in the search through the literature indexed in the Scopus database. Scopus was chosen because it is considered the largest bibliometric database available online (Chadegani et al., 2013; Choudhri et al., 2015) for storing scientific research metadata. The metadata of the articles make it is possible (i) to perform a quantitative analysis of the annual scientific output; to identify (ii) the journals that publish the most on the topic; (iii) the most prolific authors; and (iv) the geographical distribution of studies; and to analyze (v) co-authorship among authors; and (vi) keyword co-occurrence and clustering.

The bibliometrics data were analyzed using the software R version 4.1.0 (R Core Team 2021) to access the Bibliometrix library and the Biblioshiny App web interface (Aria; Cuccurullo, 2017) and the software VOSviewer version 1.6.13 (Van Eck; Waltman, 2009). The metadata of the articles was retrieved in the format BibTeX (.bib) and in CSV (.csv).

3 Processes based models applied in forestry studies

Techniques such as modeling forest data are key tools in predicting tree growth under different environmental conditions and understanding their ecophysiological relationships. Mathematical models are used to estimate the values of the systems that they seek to represent. However, the represented system (for example, tree growth) can be complex, which implies that

mathematical models are unable to address all underlying processes and variables. Thus, these data are modeled as simplifications of reality, even when they present goodness of fit (Silva et al., 2013).

Models used to model and simulate forest data within forest management are classified as production models, which depict the current characteristics of the forest, and as growth and production models, which represent the current and future characteristics of the forest (Campos; Leite, 2017). According to their approach, simulation models of forest data can be classified as process-based (mechanistic) or biometric (empirical) models. PBMs are subdivided into ecophysiological, climate-based, and tree architecture models (Scolforo, 2006).

Biometric models are widely, effectively, and reproducibly applied to forest data in the forestry literature. However, such models are typically limited to the location and to the breadth of data to which they are fitted. Since they disregard variations in the quality characteristics of the locations to which are applied, variable factors such as climate and water relations are often disregarded (Weiskittel et al., 2009). Nevertheless, currently, what has been observed within the research that uses biometric models in forestry research is that more researchers have sought to incorporate environmental variables into their biometric models to increase precision and explanatory capacity, thus providing improvement in your results (Sharma et al., 2015; Scolforo et al., 2017; Scolforo et al., 2020).

As an alternative, PBMs can be used for forest simulations requiring consideration of the variability in different local factors. PBMs consider the environmental and system characteristics that can affect tree processes, such as wood production. These variable characteristics include ecophysiological, edaphoclimatic, temperature, and photosynthetic relationships (Carvalho; Lima, 2015). PBMs are crucial for describing the functional relationships of trees, their interactions, and the interaction of local environmental factors (Landsberg; Sands, 2011). This rationale broadens the applicability and use of PBM in forestry studies.

Studies have used PBM to estimate forest growth (Caldeira et al., 2020; Fernández-Tschieder; Binkley; Bauerle, 2020), to assess the effect of environmental variables on the tree growth process (Augustynczyk et al., 2020) and on the relationship between water use and forest growth (Almeida et al., 2007; Schwaiger et al., 2018), to analyze tree growth in agroforestry systems (Vezy et al., 2020), to evaluate silvicultural treatments used in forest growth (Bartelink, 2000), to assess the effects of soil water deficit and soil fertility on C gain and allocation very effectively (Stape; Ryan and Binkley, 2004), and to understand the nutritional relationships between trees and their growth (Eliasson et al., 2005), among others.

Thus, the PBM literature contains different research focuses, types of approaches, aims, and fitting methods for forest data. Table 1 is adapted from the review by Pretzsch, Forrester, and Rötzer (2015) and outlines examples of PBMs that can be used for forest growth analysis.

Few PBMs work on spatial and temporal scales at the individual tree and hourly data levels, respectively, such as the approach of the PBMs MAESTRO, MAESTRA, and MAESPA reviewed in this study.

Table 1

Examples of forest growth models based on process.

Model name	Model information	Spatial scale	Temporal scale	Reference
3-PG	The model 3-PG (use of Physiological Principles in Predicting Growth) is a grouping of concepts like as efficiency in the use of radiation, C balance model, C partitioning and relation of simple stand nutritional parameters. And this model runs for periods up to 120 years.	Stand	Month	Landsberg and Waring (1997)
4C	The physiologically based model 4C ('FORESEE'—FORESt Ecosystems in a changing Environment) can be used to evaluate different of silvicultural treatments. In addition, this model is usual to simulates tree species composition, forest structure, leaf area index, ecosystem carbon, water balances and their relationships.	Cohort	Day	Lasch et al. (2005)
ANAFORE	The ANAFORE (ANALYSIS of FOREst Ecosystems) is the stand-scale process-based forest growth model. ANAFORE is usual to simulate stand C, H ₂ O and nitrogen (N) fluxes, tree growth, and wood tissue development. Another advantage of this model is that it allows information to simulates the daily evolution of tracheid or vessel biomass and radius, parenchyma and branch development.	Cohort	Hour	Deckmyn et al. (2008)
BALANCE	The model BALANCE describes how trees develop and what environmental influences can cause individual tree development. Furthermore, there is can be used to estimation of radiation distribution and the simulation of carbon and	Individual	Day	Grote and Pretzsch (2002), Rötzer et al., (2017)

	nutrient exchange in trees. This enables analyze of the influence of competition, stand structure, species mixture, and management impacts.			
BIOME-BGC	The model BIOME-BGC (biogeochemical ecosystem models-BGC) perform a good description of ecophysiological processes. Furthermore, it simulates the cycle of energy, water, carbon and nitrogen within a given ecosystem.	Stand	Day	Running and Hunt (1993)
CABALA	The model called CARbon BALance (CABALA) is a dynamic forest growth model. It links carbon, water and nitrogen flows through the atmosphere, trees and soil including soil organic matter. This model is suitable for exploring stand management options and the effects of climatic factors on growth.	Cohort	Day	Battaglia et al. (2004)
CASTANEA	The forest ecosystem model (CASTANEA) is used to predict the carbon and the water balances of an even-aged monospecific forest stand. And, it can be used to describe some processes like canopy photosynthesis, transpiration, maintenance and growth respiration, seasonal development, partitioning of assimilates to leaves, stems, branches, coarse and fine roots, evapotranspiration, soil heterotrophic respiration, water and carbon balances of the soil.	Stand	Hour	Dufrêne et al. (2005)
COMMIX	The model COMMIX (COMpetition in MIXtures) can be used for calculation of interception of radiation by a tree, translation of APAR into dry matter, partitioning of the dry matter, and updating the biomass and structure of the tree. The use of the model allows taking into account the effects of	Individual	Year	Bartelink (2000)

	management on the stand's dynamics. For example, in COMMIX, three thinning types can be chosen: a systematic thinning, a thinning from below or a thinning from above.			
FOREST v5.1	The model Forest v5.1 is used for predict the carbon, nutrient and water cycle. These are the factors that influence different process like tree growth, light interception and assimilation. This model included information on individual tree growth, biomass and water use efficiency as a result of climate change.	Individual	Day	Schwalm and Ek (2004)
FOREST-BGC	The FOREST-BGC (BioGeochemical Cycles) is an ecosystem process model. This model calculates the carbon, water and nitrogen cycles. Specifically, treats information about canopy interception and evaporation, transpiration, photosynthesis, growth and maintenance respiration, carbon allocation above and below-ground, litterfall, decomposition and nitrogen mineralization.	Stand	Day	Running and Coughlan (1988), Running and Gower (1991)
FORGRO (-SWIF)	The forest growth/hydrology model FORGRO–SWIF, is formed by the combination of a forest growth model (FORGRO) and a soil water model (SWIF). That way, it is possible to simulate dynamic feedback relations between forest water use efficiency, forest growth and carbon dioxide exchange.	Stand	Hour	Van der Voet and Mohren (1994), Van Wijk et al. (2000)
FORMIND	The model Formind is used for simulate the tree growth of tropical rainforests, to model biomass increment, simulate tree mortality and recruitment. Additionally, this model can use to investigate temporal and spatial forest dynamics.	Individual	Year	Köhler and Huth (1998), Bohn, Frank, and Huth (2014)

FORSKA	The model FORSKA is used to simulate the dynamics of forest landscapes, forest structure, composition and biomass. This model works with the interactions of the tree canopy and the labile aspects of the local environment (light and nutrients). For this reason, the model can be used to analyze the sensitivity of forests to climate change.	Cohort	Day	Prentice, Sykes and Cramer (1993)
FORUG	The model FORUG is a multi-layer process-based model. It can be used that simulates CO ₂ and H ₂ O between vegetation stands and atmosphere. Therefore, information such as NEE, TER, GPP and evapotranspiration can be simulated.	Cohort	Hour	Verbeeck et al. (2006)
G-DAY	The G'DAY (Generic Decomposition and Yield) model can be used to describe the influence of photosynthesis and nutritional factors on the productivity of forests growing in regions with limited nitrogen. Through the simulation of carbon and nitrogen dynamics in the plant and soil.	Stand	Week	Comins and McMurtrie (1993)
LIGNUM	The LIGNUM model is used to predict the growth and development of trees. In this model, the structural units of the trees are considered, such as segments, branching points and buds. In addition, this model uses the principles of the pipe model. In which, a tree is pictured as a bundle of pipes that extend from the elements of the foliage to the tips of the roots.	Individual	Year	Perttunen, Sievänen, and Nikinmaa (1998)
MAESPA	It is the latest PBM in his lineage, MAESTRO and MAESTRA. MAESPA is used to understand the hydraulic relations of trees and the soil water balance. Furthermore, this PBM class provides	Individual	Hour	Duursma and Medlyn (2012)

	information at the level of individual trees, allowing the development of research with more than one species.			
PIPEQUAL	The model called PipeQual (PIPE model as a basis for wood QUALity predictions) is based on the annual carbon balance of individual trees. And, it can be used for wood quality predictions. This model performs carbon balance simulations and uses the tube model based for the carbon allocation of the trees.	Individual	Day	Mäkelä and Makinen (2003)
SECRETS	The model SECRETS (Stand to Ecosystem CaRbon and EvapoTranspiration Simulator) is a modification the process model BIOMASS. This model was desenvolved to to evaluate C and water fluxes from a mixed foresty. Thus, is possible use the SECRETS model to simulates the interception, reflectance, and transmittance of photosynthetically active radiation (PAR) through canopies.	Stand	Hour	Sampson, Janssens, and Ceulemans (2001)
SIMWAL	The model SIMWAL (SIMulated WALnut) is a structural-functional tree model. It was developed to simulate the 3D structure dynamics of the tree, and the partitioning of biomass between its different organs. Only carbon-related physiological processes are considered in this model. Thus, evaluations such as the 3D structure dynamics and biomass partitioning among organs in relation to climate and pruning can be performed.	Individual	Hour	Balandier et al. (2000)
TREEDYN3	The forest simulation model called TREEDYN3 is a generic model based of tree growth, carbon and nitrogen dynamics. Additionally, this model	Stand	Day	Bossel (1996)

	simulates the flows and accumulations of carbon and nitrogen inside and outside the different parts of the tree-soil system.			
YIELD-SAFE	The model is called Yield-SAFE which means Yield Estimator for Long term Design of Silviculture AgroForestry in Europe. With this model it's possible to describe the process of competitive resource acquisition and the associated growth of the constituent components in an agroforestry stand. Therefore, the growth dynamics and final yields of trees and crops can be simulated using the Yield-SAFE model.	Individual	Day	Van der Werf et al. (2007)

*Cohort differs a Stand because in that it allows considering more than one species.

4 MAESTRO – MAESTRA evolution to MAESPA

In 1988, the PBM Multi Array Evaporation Stand Tree Radiation Orgy (MAESTRO) was presented and validated for *Radiata Pine* and *Sitka Spruce* plantations by Wang (1988) in his thesis under the supervision of Paul Gordon Jarvis. This model was based on research by Norman and Welles (1983) and by Grace et al (1987).

The studies of Norman and Jarvis (1974, 1975) were seminal as precursors of MAESTRO because these authors painstakingly took field measurements and characterized the structural nonrandomness of forest canopies, subsequently incorporating these data into a model. Thus, they helped to develop modeling studies of photosynthesis and radiation data for tree crowns (Medlyn, 2004).

MAESTRO and its successors made it possible to develop studies on individual tree crown processes, to represent them in three dimensions, and to vary the leaf distribution within tree crowns and the leaf area density (Medlyn et al., 2005). These PBMs help to gather data on the fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FAPAR), photosynthetic rate, stomatal conductance, and tree crown transpiration (Wang, 1988; Wang and Jarvis, 1990a; Medlyn et al., 2005; Medlyn et al., 2007) and to estimate tree carbon gains (Baldwin et al., 1993).

The model was programmed at the hourly time scale and at the leaf spatial scale, totaling up to 120 grid points within a tree crown. However, these scales are flexible and suitable for different purposes in this model because they can be easily extrapolated to plots and to days, months, or years. MAESTRO differed at the time from the other PBMs at the individual tree level because this model considers the heterogeneous leaf distribution and the different ages of leaves within the same tree crown (Wang and Jarvis, 1990a).

The primary structure of the MAESTRO model is based on seven submodels, namely, sun position, radiation partitioning, crown structure, radiation absorption, stomatal conductance, transpiration, and photosynthesis. The model requires entering data on the position, optical characteristics, dimensions, and total area of the leaves for each tree under analysis. Location and soil spectral and climatic data of the study area are also required (Wang, 1988; Wang and Jarvis, 1990a).

The structure of the PBM MAESTRO has endured over the years since its development due to its formulation, which is based on solid physical principles that represent the processes of radiation transmission between the crowns of individual trees. However, this model has undergone improvements over the years, as gaps emerged in its formulation. Craig Barton, Jon Massheder, and Bob Teskey added data on responses to ozone and water balance to the model. Additionally, Bart Kruijt added data linked to CO₂ responses, leaf nitrogen, and photosynthetic acclimation.

However, Belinda Medlyn was the researcher who revised and rewrote the successor to MAESTRO called MAESTRA. Medlyn simplified the code to make it easier to use the model and to introduce further modifications to its structure, in addition to incorporating standard formulations of leaf gas exchange models (Medlyn, 2004).

In the PBM MAESTRA, the data processing follows a hierarchical structure that iteratively integrates its different submodels and processes data (Barnard; Bauerle, 2015). When used to analyze the carbon balance of the forest canopy, the PBM MAESTRA shows good results, but this model has some limitations when considering the hydraulics relationships of plants, underground physiological relationships of trees, and deciduous species (Cavaleri et al., 2017).

Thus, understanding the need for improving information on water in the MAESTRA model, Medlyn et al. (2005) incorporated data on soil moisture into their research, introducing changes to the stomatal conductance model. Other authors, such as Bauerle et al. (2002), Bauerle et al. (2004), and Reynolds, Bauerle and Wang (2009), also modified the MAESTRA model and incorporated information on water use by plants.

However, even with these changes, MAESTRA cannot dynamically calculate soil moisture ratios. This inability limits the application of the model when analyzing conditions in drier environments because the model cannot simulate tree performance related to soil moisture parameters. With that in mind, Remko Duursma and Belinda Medlyn decided to combine the PBM MAESTRA with the PBM called soil–plant–atmosphere (SPA), thus generating the last PBM of this lineage, named MAESPA (Duursma; Medlyn, 2012).

The PBM SPA was developed by Williams et al. (1996) and subsequently improved by Williams, Bond, and Ryan (2001) and by Williams et al. (2001) primarily to explain plant hydraulics processes and relationships. This model simulates the C_3 processes of plants (Williams et al., 2001) and is used to understand water availability relationships and impacts on forest canopies (Duursma; Medlyn, 2012).

The SPA model subdivides the forest canopy into 10 layers, performing an iterative process every 30 minutes to determine the maximum stomatal conductance (G_s) for each subdivision of the canopy layer and the assimilation rate that is associated with that conductance (Williams et al., 1996). In relation to the forest canopy structure, SPA considers the effects of vertical variations between the different layers on the light absorption processes, leaf area, photosynthetic capacity, and hydraulic properties of trees (Williams et al., 2001).

The PBM SPA consists of submodels subdivided into physical and biological components. The physical components include submodels for calculating the canopy structure, radiation regime, leaf boundary layer characteristics, and soil water characteristics. The biological

components refer to the soil resistance, plant hydraulics, dynamic flow, leaf biochemical parameters, maximum carboxylation capacity (V_{cmax}), and maximum electron transport rate (J_{max}) (Williams et al., 1996). However, despite its potential, the PBM SPA has some limitations when studying an individual tree because this model assumes that the forest canopy is horizontally homogeneous; that is, SPA cannot be applied in individual tree studies (Duursma; Medlyn, 2012).

The PBM MAESPA was designed to overcome the limitations of the MAESTRA and SPA models. MAESPA consists of iterative submodels and incorporates in detail tree hydraulics relationships, soil water balances, leaf physiological relationships, and the crown structure of individual trees. Its stomatal conductance submodel covers the root water uptake processes, drainage relationships, infiltration, canopy interception and flow, radiation interception, and foliar physiological routines of the MAESTRA model (Duursma; Medlyn, 2012).

Table 2 outlines the main steps and differences between the PBMs MAESTRO, MAESTRA, and MAESPA.

Table 2

MAESTRO, MAESTRA, and MAESPA data processing stages and main differences among the submodels.

STEPS	MAESTRO	MAESTRA	MAESPA
Read in structural, physical and physiological parameters.			
Locate the grid points and compute the associated area of leaves.	Beta function with three parameters in both the vertical and the horizontal dimensions.	The same of PBM MAESTRO.	The same of PBM MAESTRO.
Read meteorological data.			
Compute daylength and positions of the sun.	The submodel calculates the hourly position of the sun.	The same of PBM MAESTRO.	The same of PBM MAESTRO.
Loop over hours in a step of one hour.			
Partition the incident solar radiation.	A model by Weiss and Norman (1985).	The same of PBM MAESTRO.	The same of PBM MAESTRO.
Loop over grid points.			
Compute radiation absorption.	A model by Norman (1979,1980).	The same of PBM MAESTRO.	The same of PBM MAESTRO.
Loop over sunlit and shaded leaves			

<hr/>			
Loop over leaf age			
Compute boundary, stomatal & mesophyll conductances.	A modified Jarvis (1976) model.	Ball-Berry (Collatz et al., 1991), Ball-Berry-Leuning (Leuning, 1995) or Ball-Berry-Optimized models (Medlyn et al. 2011).	A modified Tuzet et al. (2003) with Medlyn et al. (2011).
Compute transpiration.	The Penman-Monteith equation.	The same of PBM MAESTRO.	The same of PBM MAESTRO.
Compute net photosynthesis	The empirical model by Jarvis et al. (1976) or the mechanistic model by Farquhar and Von Caemmerer (1982).	The mechanistic model by Farquhar and Von Caemmerer (1982).	The same of PBM MAESTRA.
Canopy rainfall interception	Not present.	Not present.	Rutter et al. (1975) model.
Soil drainage	Not present.	Not present.	Runge-Kutta integrator (according the SPA model, Williams et al., (2001) and Williams, Bond and Ryan (2001).
Soil evaporation	Not present.	Not present.	Choudhury and Monteith (1988) physical-based model and modified by Williams, Bond and Ryan (2001).
Soil surface energy balance	Not present.	Not present.	Present
Soil temperature profile	Not present.	Not present.	The SPA model (Williams et al., 2001).
Soil water balance	Not present.	Not present.	Present
Infiltration	Not present.	Not present.	Simple exponential function, taken from the BROOK90 model (Federer, Vörösmarty, and Fekete, 2003).
Root water uptake	Not present.	Not present.	Modified from SPA; Taylor and Keppler (1975).
Soil water retention and hydraulic conductivity	Not present.	Not present.	Campbell (1974).

Sum up to give the hourly and daily totals of radiation absorbed, photosynthesis and transpiration by a tree crown.

Compute daily totals.

Write out the hourly and daily totals.

The time for running the PBM MAESPA is arbitrarily set by the user, and this model can be executed every minute, half hour (most commonly), and hour. To calculate the soil water balance, this PBM considers the soil as a homogeneous horizon. However, for canopy-level data, individual-tree data are considered (Duursma; Medlyn, 2012).

The MAESTRA and MAESPA code is open source, and the programming language is Fortran, with data input and output in text format (Duursma; Medlyn, 2012). The necessary inputs and the generated outputs are presented in annex I (Table 5). An executable available online (<http://maespa.github.io/index.html>) makes it easier to use the model.

In connection with the open-source software environment R (R Core Team 2021), Duursma (2015) developed a package called Maeswrap (<https://cran.r-project.org/web/packages/Maeswrap/index.html>) to facilitate the interface with users. The Maeswrap package represents the trees analyzed by the PBM MAESTRA and MAESPA three-dimensionally, thereby enabling users to visually assess whether the PBM input data are correct. As a final product of this application, the crowns of the trees under analysis by the PBM are be plotted and colored red, whereas the others remain green.

5 Studies that applied the PBMs MAESTRO, MAESTRA AND MAESPA

Light, water, and nutrients are the necessary resources for tree growth and development. At the same location, the availability of these resources varies from tree to tree and over time due to competition between trees and to the specific conditions of the location (Christina et al., 2016a).

In relation to the resources needed for tree growth, in Brazilian plantations, fertilized eucalyptus growth is limited in the first years after planting by light absorption because the soil should be replenished with water due to the previous harvest in the plots. Water and nutrients are limiting factors only once the canopy closes. Thus, photosynthate allocation patterns and light-use efficiency (LUE) likely change then (Maire et al., 2019).

Tree development requires, in addition to the availability of these three resources, their efficient use in the photosynthetic process. The amount of photosynthates allocated to wood production in tree trunks across different forest ecosystems depends on the absorbed photosynthetically active radiation (APAR), LUE (Maire et al., 2019), water efficiency use (WUE) (Christina et al., 2018), and nutrient efficiency use (NUE) (Resquin et al., 2020).

In addition, the way in which these photosynthates are partitioned among woody tissues determines how different tree parts grow (Binkley et al., 2010). For example, in individual trees, carbon, which is a photosynthesis byproduct, is allocated according to the tree size and age (Franklin et al., 2012).

The PBMs MAESTRA and MAESPA simulate the APAR, tree hydraulics relationships, and soil water balance (the last two only in the MAESPA model), which subsequently are converted into tree growth factors. This is the main limitation of these models, that is, their inability to directly calculate tree growth. However, this limitation is linked to the lack of understanding of carbon allocation patterns in different tree parts (Medlyn, 2004).

Despite this disadvantage, this factor does not alter the functionality of these PBMs. Furthermore, these models have been applied in different research scenarios. Table 3 presents the studies identified in this literature review that have used the PBMs MAESTRO, MAESTRA, or MAESPA.

Table 3

Details and information regarding the articles used in this review.

Authors	Study place	Species studied or Type of forest formation	Type of PBM used
Barnard and Bauerle (2013)	USA	<i>Acer rubrum L.</i> ; <i>Betula nigra</i> ; <i>Carpinus betula</i> ; and <i>Cercis canadensis</i> .	MAESTRA
Barnard and Bauerle (2015)	USA	<i>Acer rubrum L.</i> ; <i>Betula nigra</i> ; <i>Carpinus betula</i> ; <i>Cercis canadensis</i> and <i>Quercus rubra</i> .	MAESTRA
Barnard and Bauerle (2016)	USA	<i>Acer rubrum</i> ; <i>Betula nigra</i> ; <i>Quercus nuttallii</i> ; <i>Quercus phellos</i> and <i>Paulownia elongata</i> .	MAESTRA
Bauerle and Bowden (2011a)	USA	<i>Acer rubrum L.</i>	MAESTRA
Bauerle and Bowden (2011b)	USA	<i>Acer rubrum L.</i>	MAESTRA
Bauerle et al. (2002)	USA	<i>Acer rubrum</i> .	MAESTRA
Bauerle et al. (2004)	USA	<i>Acer rubrum</i> .	MAESTRA
Bauerle et al. (2006)	*1	*1	MAESTRA
Bauerle et al. (2009)	USA	<i>Acer rubrum L.</i>	MAESTRA
Bauerle, Bowden and Wang (2007)	USA	<i>Acer rubrum L.</i>	MAESTRA

Bauerle, Daniels and Barnard (2013)	USA	<i>Acer rubrum L.</i> and temperate hardwood forest C3 species.	MAESTRA
Binkley et al. (2002)	Brazil and USA	<i>E. grandis</i> ; <i>E. saligna</i> ; <i>E. urophylla</i> ; and <i>E. grandis</i> x <i>urophylla</i> .	MAESTRO/MAESTRA
Binkley et al. (2010)	Brazil	<i>Eucalyptus spp.</i>	MAESTRA
Bowden and Bauerle (2008)	USA	<i>Prunus</i> × <i>yedoensis</i> Matsum.; <i>Acer rubrum L.</i> ; <i>Acer buergeranum</i> Miq.; <i>Prunus serrulata</i> Lindl.; and <i>Platanus</i> × <i>acerifolia</i> (Ait.) Willd.	MAESTRA
Braghiere et al. (2020)	Canada and USA	Deciduous Broadleaf Forest (contains mostly <i>Populus tremuloides</i>) and Woody Savanna (<i>Quercus douglasii</i> with occasional <i>Pinus sabiniana</i>)	MAESPA
Campoe et al. (2013a)	Brazil	<i>Eucalyptus grandis.</i>	MAESTRA
Campoe et al. (2013b)	USA	<i>Pinus taeda L.</i>	MAESTRA
Cavaleri et al. (2017)	Costa Rica	The tropical wet forest.	MAESTRA
Charbonnier et al. (2013)	Costa Rica	<i>Erythrina poeppigiana</i> and <i>Coffea arabica.</i>	MAESTRA
Charbonnier et al. (2017)	Costa Rica	<i>Erythrina poeppigiana</i> (Walp.) and <i>Coffea arabica L.</i> var Caturra.	MAESPA
Chaves and Pereira (1992)	*2	*2	MAESTRO
Chen et al. (2008)	USA	Savanna woodland (<i>Quercus douglasii</i>) and a minority of <i>Pinus sabiniana.</i>	MAESTRA
Christina et al. (2015)	Brazil	<i>Eucalyptus grandis.</i>	MAESPA
Christina et al. (2016a)	Brazil	<i>Eucalyptus grandis.</i>	MAESPA

Christina et al. (2016b)	Brazil	<i>Eucalyptus grandis</i> .	MAESPA
Christina et al. (2018)	Brazil	<i>Eucalyptus grandis</i> .	MAESPA
Cohan et al. (2002)	Scotland	Sitka spruce (<i>Picea sitchensis</i>) forest.	MAESTRA
Daniels et al. (2012)	USA	<i>Acer rubrum L.</i> ; <i>Acer saccharum L.</i> ; <i>Betula nigra</i> ; <i>Carpinus betula</i> ; <i>Cercis canadensis</i> ; <i>Gleditsia triacanthos var. inermis</i> ; <i>Magnolia stellata</i> ; <i>Platanus acerifolia</i> ; <i>Quercus rubra L.</i> and <i>Thuja standishii</i> × <i>plicata</i> .	MAESTRA
Dick, Jarvis and Barton (1990)	Scotland	<i>Pinus contorta</i> Dougl.	MAESTRO
Dong et al. (2016)	Vietnam	<i>Acacia hybrid</i> and <i>Hopea odorata</i> .	MAESTRA
Duursma and Medlyn (2012)	*3	<i>Prunus avium</i> .	MAESPA
Emhart et al. (2007)	USA	<i>Pinus taeda L.</i> and <i>Pinus elliottii Engelm. var. elliotti</i> .	MAESTRA
Fernández-Tschieder, Binkley and Bauerle (2020)	USA	<i>Pinus ponderosa</i>	MAESTRA
Forrester (2014)	Unquoted.	Range of horizontally and vertically heterogeneous canopies.	MAESTRA
Forrester (2021)	Switzerland	<i>Picea abies</i> ; <i>Abies alba</i> ; <i>Pinus sylvestris</i> ; <i>Pseudotsuga menziesii</i> ; <i>Fagus sylvatica</i> ; <i>Quercus petraea</i> and <i>Quercus robur</i> .	MAESTRA
Forrester and Albrecht (2014).	Germany	<i>Abies alba</i> Mill. and <i>Picea abies</i> (L.) Karst.	MAESTRA

Forrester et al. (2013).	Australia	<i>Eucalyptus nitens.</i>	MAESTRA
Forrester et al. (2017)	Spain, Bulgaria and Sweden	<i>Fagus sylvatica</i> and <i>Pinus sylvestris.</i>	MAESTRA
Forrester et al. (2019)	China	<i>Castanea henryi; Castanopsis eyrei; Castanopsis sclerophylla; Choerospondias axillaris; Cyclobalanopsis glauca; Cyclobalanopsis myrsinifolia; Koelreutina bipinnata; Liquidambar formosana; Lithocarpus glaber; Nyssa sinensis; Quercus fabri; Quercus serrata; Rhus chinensis; Sapindus saponaria; Triadica sebifera</i> and <i>Schima superba.</i>	MAESTRA
Forrester et al. (2021)	Switzerland	<i>Fagus sylvatica; Picea abies; Abies alba; Fagus sylvatica; Larix decidua</i> and <i>Pinus cembra.</i>	MAESTRA
Gspaltl et al. (2013)	Austria	<i>Picea abies</i> (L.) Karst.	MAESTRA
Hanson et al. (2004)	USA	Deciduous forest that are dominated by upland-oak.	MAESTRA
Ibrom et al. (2006)	Germany	<i>Picea abies</i> L. (Karst.) and <i>Picea sitchensis</i> (Bong.) Carr.	MAESTRA
Janssens et al. (2005)	Belgium	<i>Pinus sylvestris</i> L.	MAESTRA
Jarvis (1995)	*4	*4	MAESTRO
Junior Baldwin et al. (2001)	USA	<i>Pinus taeda</i> L.	MAESTRO
Kauwe et al. (2013)	USA	<i>Pinus taeda</i> and <i>Liquidambar styraciflua.</i>	MAESTRA
Keith et al. (2009)	Australia	<i>Eucalyptus delegatensis.</i>	MAESTRA
Kirschbaum et al. (1994)	Australia	<i>Pinus radiata.</i>	MAESTRO

Kruijt et al. (1999)	Unquoted	<i>Picea sitchensis</i> (Bong.) Carr. and <i>Betula pendula</i> Roth.	MAESTRO
Lawson et al. (1995)	Australia and Somalia	<i>Eucalyptus globulus</i> Labill.	MAESTRO
Leuning, Wang and Cromer (1991)	Unquoted.	<i>Eucalyptus grandis</i> .	MAESTRO
Linderson et al. (2012)	Denmark	<i>Fagus sylvatica</i> .	MAESTRA
Livingston et al. (1998)	New Zealand	<i>Pinus radiata</i> D. Don.	MAESTRO
Loustau et al. (1999)	France	<i>Pinus pinaster</i>	MAESTRO
Luo et al. (2001)	USA	<i>Pinus taeda</i> L.	MAESTRA
Luxmoore et al. (2000)	USA	Southern pine species and Eastern deciduous forests.	MAESTRO
Luxmoore et al. (2002)	USA	<i>Pinus</i> spp.	MAESTRO
Maire et al. (2013)	Brazil	<i>Eucalyptus grandis</i> and <i>Acacia mangium</i> .	MAESTRA
Maire et al. (2019)	Brazil	<i>E. grandis</i> ; <i>E. grandis</i> × <i>E. urophylla</i> ; <i>E. urophylla</i> × <i>sp</i> ; <i>E. saligna</i> and <i>E. grandis</i> × <i>E. camaldulensis</i> .	MAESTRA
Mcmurtrie and Wang (1993)	Australia	<i>Pinus radiata</i> D. Don.	MAESTRO
Mcmurtrie et al. (1992)	Australia	<i>Pinus radiata</i> D. Don.	MAESTRO
Medlyn (1998)	Australia	<i>Pinus radiata</i> .	MAESTRO

Medlyn et al. (2005)	Sweden, Scotland and France.	<i>Picea abies</i> (L.) Karst; <i>Picea sitchensis</i> (Bong.) Carr. and <i>Pinus pinaster</i> Ait.	MAESTRA
Medlyn et al. (2007)	Australia	<i>Eucalyptus delegatensis</i> .	MAESTRA
Morales et al. (2016)	Spain	<i>Olea europaea</i> L.	MAESPA
Nelson et al. (2016)	USA	<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss; <i>Populus grandidentata</i> Michx.; <i>Betula papyifera</i> Marsh.; <i>Betula populifolia</i> Marshall; <i>Acer rubrum</i> L.; <i>Abies balsamifera</i> (L.) Mill.; <i>Tsuga canadensis</i> L. and <i>Picea rubens</i> Sarg.	MAESTRA
Nice, Coutts and Tapper (2018)	Australia	<i>Olea europaea</i> and <i>Lophostemon confertus</i>	MAESPA
Reynolds, Bauerle and Wang (2009)	USA	<i>Acer rubrum</i> ; <i>Betula nigra</i> ; <i>Quercus nuttallii</i> ; <i>Quercus phellos</i> and <i>Paulownia elongata</i> .	MAESTRA
Richards and Schmidt (2010)	Australia	<i>Elaeocarpus angustifolius</i> ; <i>Grevillea robusta</i> and <i>Castanospermum australe</i> .	MAESTRA
Stinziano, Bauerle and Way (2018)	Canada	<i>Abies balsamea</i> ; <i>Larix laricina</i> ; <i>Picea abies</i> ; <i>Picea glauca</i> ; <i>Picea mariana</i> ; <i>Pinus banksiana</i> ; and <i>Pinus sylvestris</i> .	MAESTRA
Stinziano, Way and Bauerle (2017)	USA	<i>Pinus taeda</i> .	MAESTRA
Unsworth and Wilshaw (1989)	*5	*5	MAESTRO
Vezy et al. (2020)	Costa Rica	<i>Coffea arabica</i> L. var <i>Caturra</i> and <i>Erythrina poeppigiana</i> .	MAESPA

Vezy et al. (2018)	Brazil and Costa Rica	<i>Eucalyptus urophylla x grandis</i> ; <i>Coffea arábica</i> ; <i>Erythrina poeppigiana</i> ; <i>Chloroleucon eurycyclum</i> and <i>Terminalia amazonia</i> .	MAESPA
Wang and Jarvis (1990a)	Scotland and Australia	<i>Picea sitchensis</i> and <i>Pinus radiata</i> .	MAESTRO
Wang and Jarvis (1990b)	Scotland.	<i>Picea sitchensis</i> .	MAESTRO
Wang and Polglase (1995)	Unquoted.	Tundra, Boreal forest and Humid tropical forest.	MAESTRO
Wang, Rey and Jarvis (1998)	Scotland	<i>Betula pendula</i> Roth.	MAESTRO
Waring, Landsberg and Linder (2016)	*6	*6	MAESTRO/MAESTRA/MAESPA
Wendell et al. (1998)	USA	<i>Pinus taeda</i> L.	MAESTRO
Whitley et al. (2016)	Australia	<i>Eucalyptus Miniata</i> ; <i>Eucalyptus tectifica</i> ; <i>Terminalia grandiflora</i> ; <i>Eucalyptus tetradonta</i> ; <i>Planchonia careya</i> ; <i>Corymbia terminalis</i> ; <i>Erythrophleum chlorostachys</i> ; <i>Corymbia latifolia</i> ; <i>Eucalyptus dichromophloia</i> . (florestais) <i>Sorghum spp.</i> ; <i>Sorghum intrans</i> ; <i>Hetropogan triticeus</i> ; <i>Chrysopogon fallax</i> ; <i>Themda tiandra</i> and <i>Astrabla spp.</i> (gramíneas)	MAESPA
Ye et al. (2021)	China	<i>Malus domestica</i> Borkh	MAESPA
Yang et al. (2019)	Australia	<i>Eucalyptus tereticornis</i> and <i>Eucalyptus parramattensis</i> .	MAESPA
Yang et al. (2020)	Australia	<i>Eucalyptus tereticornis</i> Sm.	MAESPA

*¹ the article addresses an adaptation of the model MAESTRA to a “generic user interface”.

- *² the article assesses the effects of water stress, CO₂ concentration and environmental changes on plants.
- *³ the article describes the model MAESPA and performs a case study applying the model based on the study by Centritto et al. (1999a, b).
- *⁴ the article analyzes a large experiment simulating CO₂ fixation by different genetic materials and tree growth.
- *⁵ the article reviews forms of deposition of air pollutants on forest areas.
- *⁶ the article reviews two production indices, the light-use efficiency (LUE) and (leaf) growth efficiency (GE).

6 Bibliometric analysis – scientific trends and thematic perspectives

In this section, we present the results from the bibliometric analysis, in which we highlight the historical series of publications, the main journals, the leading researchers, and the most commonly used field-specific terms, in addition to performing a thematic analysis and identifying the most productive countries.

6.1 Database characterization

For the 85 articles on the topic of this review found in the literature, the period of publication of the articles spanned from 1989 to 2021 (Table 4). Among these articles, 3 were authored by a single researcher, and 316 authors worked in groups in the other studies. These studies were published in 35 journals, and review articles account for 2.35% of all publications consulted in the literature.

Table 4

Main characteristics of the database.

Main Information	Explanation	Results
Return period of articles	Years of publication	1989-2021
Sources	The frequency distribution of sources as journals	35
Average citations per article	Average number of citations in each article	43.09
Authors	Total number of authors	316
Documents per Author	Average number of documents per author	0.27
Authors per article	Average number of authors in each document	3.72
Co-Authors per article	Average number of co-authors in each document	6.13
Collaboration Index	The ratio between as the total number of authors of multi-authored articles and total number of multi-authored articles (Elango and Rajendran, 2012)	3.82
Article	Total number of articles	83
Review	Total number of reviews	2

6.2 Annual scientific production

The first record of the use of the PBM MAESTRO dates back to 1989 (Figure 2). The study by Unsworth and Wilshaw (1989) reviewed forms of deposition of air pollutants on forest areas, referencing the PBM MAESTRO, which had been published for the first time in the thesis of Wang (1988). In 1990, the studies by Wang and Jarvis (1990ab) provided more information about the parameterization of the MAESTRO model for the forest species *Radiata Pine* and *Stika Spruce*.

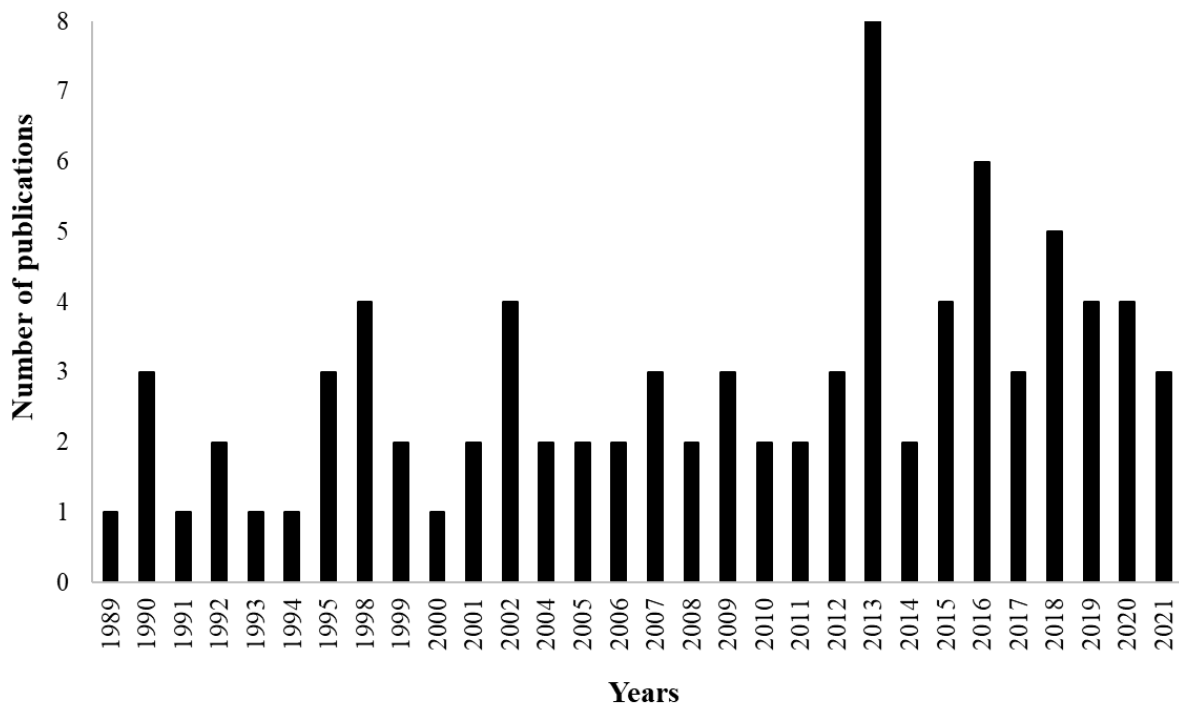


Fig. 2. Number of publications by period of the MAESTRO, MAESTRA, and MAESPA model.

The number of research studies that applied the PBMs MAESTRO, MAESTRA, and MAESPA ranged from 1 to 4 articles published per year between 1989 and 2012. However, in 2013, the number of publications increased considerably, the peak (8 publications) of the historical series under analysis. The increase in the number of publications using the PBMs MAESTRA or MAESPA in 2013 correlates with the special issue published in *Forest Ecology and Management* with the theme: Light interception and growth of trees and stands, which was organized by Binkley; Laclau; and Sterba (2013, <https://www.sciencedirect.com/journal/forest-ecology-and-management/vol/288>).

The interest in using the MAESTRO, MAESTRA, and MAESPA models is because this software is open source and free, and users can adjust it to their needs. Additionally, the outputs of these PBM provide information that can be used in the decision-making process of forestry and

silvicultural management activities (Campoe et al., 2013ab; Vezy et al., 2018; Forrester et al., 2019; Maire et al., 2019).

6.3 Sources (journals)

The networks generated in VOSviewer consist of items under analysis. In Figure 3, the items are the journals, and these items are connected by lines that represent the relationship between a source and the remaining set of sources. Items can also be grouped into clusters, which are represented by a circle. The size of the circle is linked to its weight, which is calculated by the VOSviewer; the closer the items are, the stronger their relationship is (van Eck and Waltman, 2020).

In total, 35 journals, including Forest Ecology and Management (15 publications, h-index: 10), Agricultural and Forest Meteorology (11 publications, h-index: 9), and Tree Physiology (10 publications, h-index: 8) were identified in this research. Combined, they account for 42% of the publications on this topic under study. The distribution of the journals is shown in Figure 3.

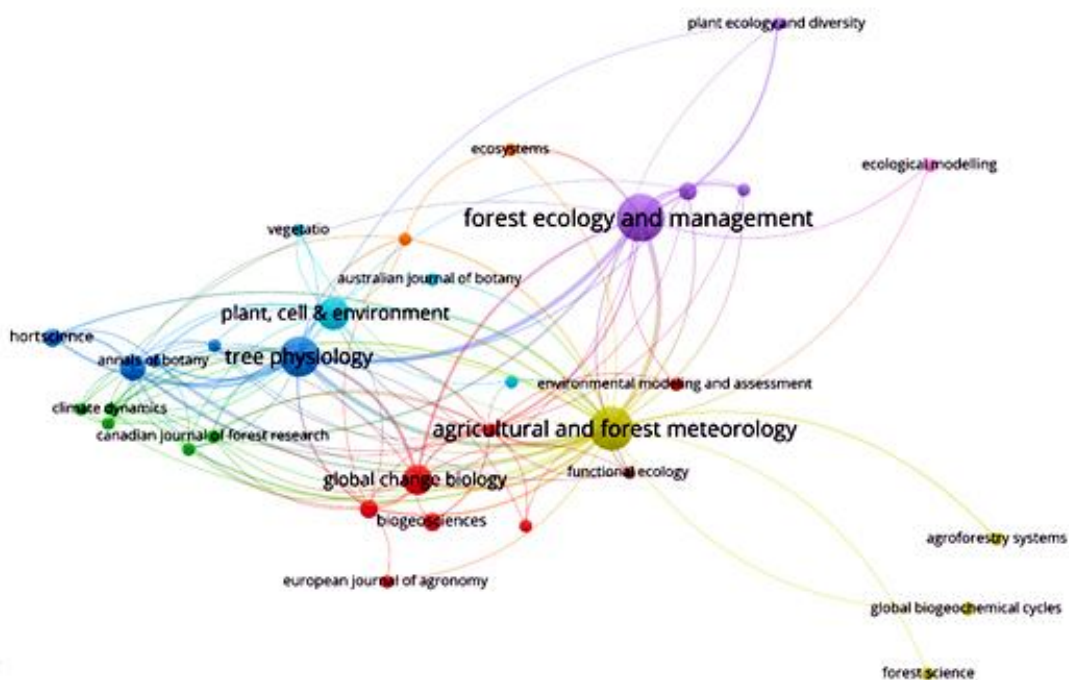


Fig.3. Network visualization map based on bibliographic data between the journals. Legend: The size or width of each node (represented per circles) of each link (represented per lines) are proportional to the link strength between the nodes.

All of the journals that have published about this PBM lineage were related to forest or environmental studies.

6.4 Authors' analysis

The analysis of the output of the main authors that have used the PBMs MAESTRO, MAESTRA, and MAESPA for forestry studies is shown in Figure 4. The researcher William L. Bauerle (22 publications, USA) stood out among his peers with the highest number of publications, followed by Belinda E. Medlyn, who developed MAESTRA (14 publications, Australia), Gueric Le Maire (11 publications, France), and Ying-Ping Wang, who developed MAESTRO (11 publications, Australia).

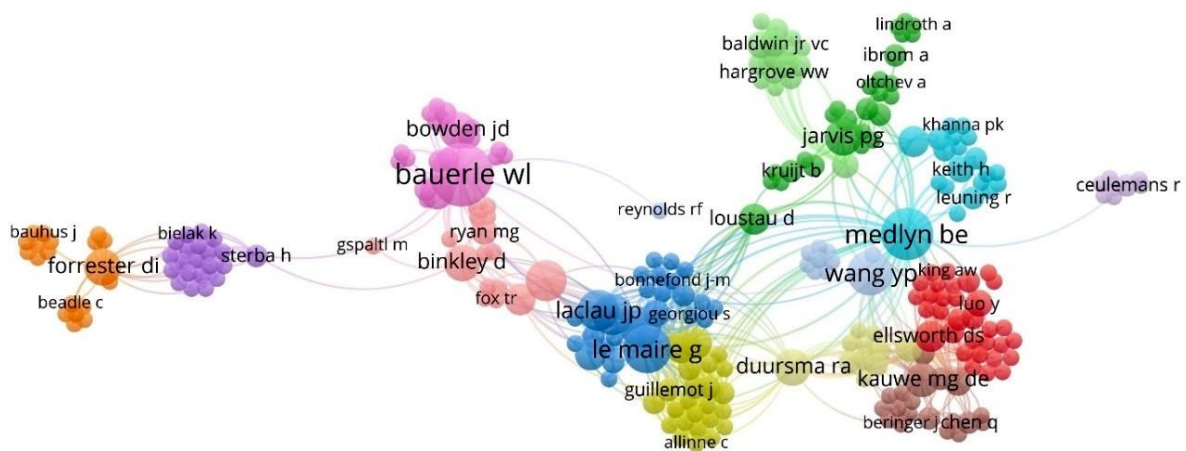


Fig.4. Main authors with publications related to MBP over the last 32 years, from 1989 to 2021.

This type of analysis is important for researchers who want to use this PBM lineage to identify the main research lines that conduct studies using this type of forest data modeling.

6.5 Keyword analysis

To analyze common themes among studies involving forest data modeling using the PBMs MAESTRO, MAESTRA, and MAESPA, author keywords are considered. The analysis of author keywords provides important information about the areas that have been prioritized within the research field and the researchers' interest (Martinez et al., 2019; Zhang et al., 2019) in using this class of PBM in forestry studies. Keywords can also be used to investigate trends in a research field and its direction over time, thereby detecting research gaps (Guo et al., 2015). Keywords with at least two occurrences in the publications identified in this study are shown in Figure 5.

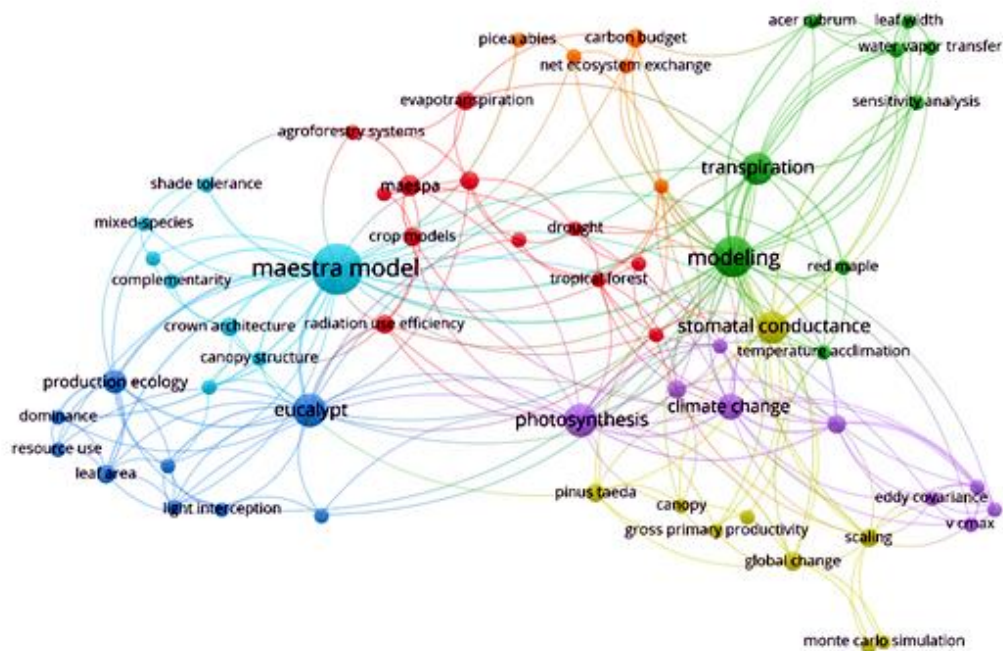


Fig.5. Co-occurrence network for the most frequently used author's keywords. The size of the circle refers to the total number of citations, the thickness and color of the line refer to link strength and indicate which cluster of subjects the item belongs to, respectively.

The author keywords are distributed into 7 clusters, each of which is represented by one color. The cluster of forest data estimated using PBM is in green, highlighting the uncertainties of this modeling. The yellow cluster is directly related to the canopy effect on atmospheric carbon absorption by the forest ecosystem. In addition, the orange cluster represents carbon balance processes on earth. The purple cluster depicts climate change effects on tree physiological processes. The red cluster applies MAESPA, and the blue cluster applies MAESTRA. Both PBMs are applied to different forest ecosystems. Last, the navy-blue cluster represents studies on tree light use efficiency.

The analysis of the authors' keywords shows that this PBM lineage has been used in research that seeks to analyze the effect of climate change on forest ecosystems since 3 (yellow, orange, and purple) of the 7 clusters presented are related to this theme of research.

The top five most frequent author keywords are MAESTRA model (22), modeling (14), eucalypt (10), photosynthesis (10), stomatal conductance (9), and transpiration (9). The term modeling showed the strongest connection among all keywords, particularly with the terms photosynthesis, stomatal conductance, transpiration, and climate change (Figure 5). The strength between these terms of the network demonstrates once again that researchers focus on studying ways to model key tree processes using the PBMs MAESTRO, MAESTRA, and MAESPA and

on analyzing how climatic variability can affect these processes. Many researchers are interested in this link (Braghiere et al., 2020; Stinziano, Bauerle and Way, 2018; Yang et al., 2020).

Complementarily to the need to find gaps in this research field, a thematic analysis was performed (Figure 6) using the Bibliometrix library (Aria, Cuccurullo, 2017). For this purpose, a strategic diagram was used to separate the main themes into four quadrants and to identify the most studied themes among the articles found in the literature search.

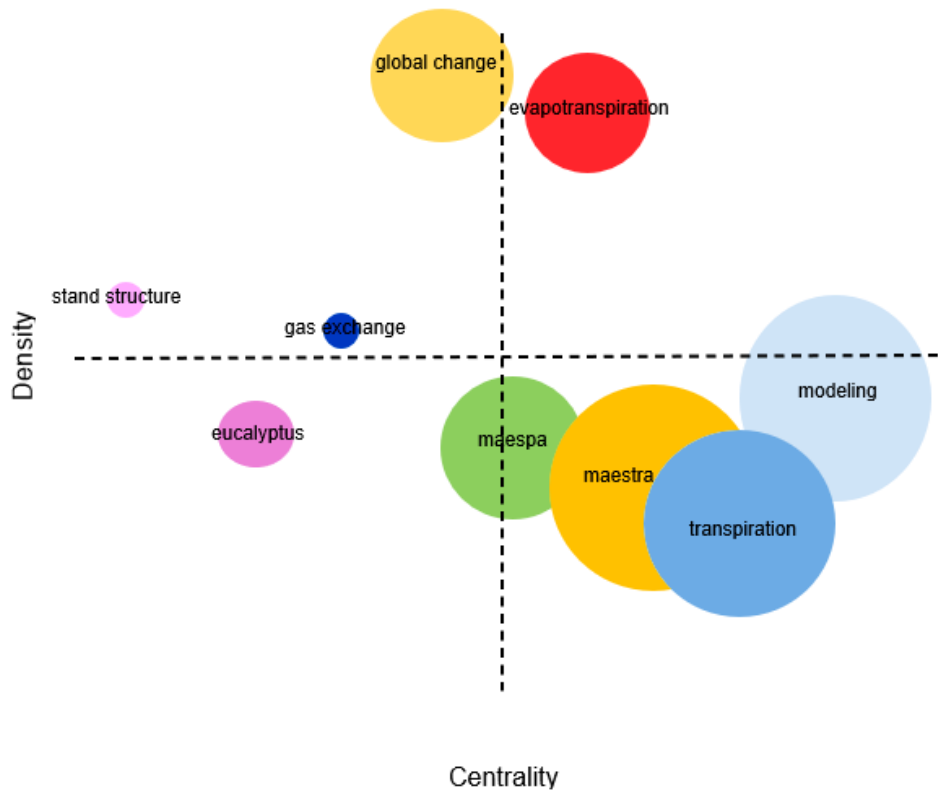


Fig.6. Strategic diagram with the distribution of the most common themes in studies using the MAESTRO/MAESTRA/MAESPA.

Cobo et al., (2011) and Lam-Gordillo et al., (2020) explain how this diagram should be analyzed, in which each quadrant presents the specificities of the themes. The upper left quadrant includes themes considered highly researched and specialized, for example, global change, stand structure, and gas exchange. Below, the lower left quadrant encompasses emerging themes, such as eucalyptus studies. Evapotranspiration is considered a driving, highly researched, and important theme for properly structuring models based on forestry processes and is located in the upper right quadrant. Understudied themes, albeit important, such as modeling, MAESTRA, and transpiration, are located in the lower right quadrant, and MAESPA lies in the transition between the lower quadrants because this theme is undergoing a development and learning phase among the studies identified in this search.

6.6 The most cited countries based on the author's addresses

The USA is the country with the highest number of citations in the world (1584, with 40 publications) during the study period in terms of published articles using the PBMs MAESTRO, MAESTRA, and MAESPA. This finding is a strong indication that the United States has been leading forestry research using this category of PBM and that this country is highly productive in this line of research. Australia comes second (1317, 26 publications), with a considerable difference from the USA. Countries such as the United Kingdom (932, 13 publications), France (529, 14 publications), Canada (506, 6 publications), and Brazil (494, 10 publications) are also highly cited (Figure 7).

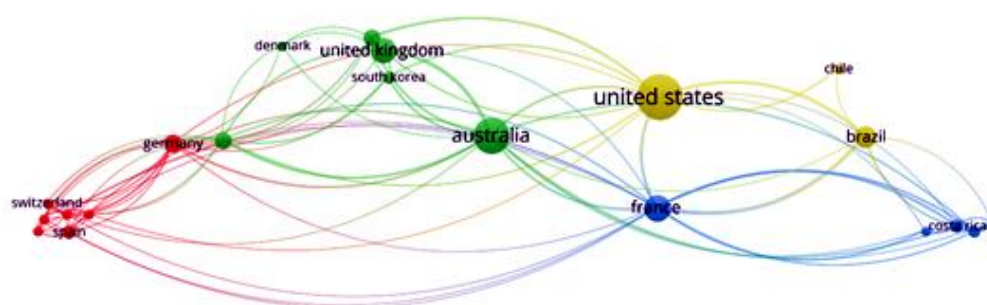


Fig.7. Co-authorship network of the top countries based on the total number of highly cited articles. A threshold of 2 was applied, which resulted in a total of 21 countries. The circle size refers to the total number of highly cited articles, the line thickness and color refer to link strength and clustering, respectively.

Some of these countries, including the USA, are among the main manufacturing countries worldwide; therefore, because they need to consume more natural resources, they tend to conduct more research related to the environment and its natural resources (Zhong et al., 2016). In addition, the USA is at the forefront of research on other forestry areas, such as forestry entrepreneurship (Mourão and Martinho, 2020), forest carbon sequestration (Huang et al., 2020), and ecosystem services (Zhang et al., 2019).

7 Conclusions

This work proposal aimed to present a review of the state of the art on the evolution of PBM MAESTRO, MAESTRA, and MAESPA and a bibliometric analysis at a quantitative level; however, no detailed analysis of the content of the papers was carried out, leaving this field of research open with the possibility of developing further complementary reviews in a more in-depth way on the content of the articles.

Review studies and bibliometric surveys like this one serve to show us the importance of using the PBMs MAESTRO, MAESTRA, and MAESPA and the improvements that these models had over the years to satisfy the needs of their users. As well as the limitations related to the use of this class of models because although the improvements and modifications make these models more accurate, they can also make them more complex and require a greater number of variables in their parameterization process.

Thus, the future challenge for the developers of this class of PBMs is to simplify the processes involved in the use of these models to facilitate their use and operationalization by forest managers, making them support tool in their decision-making.

Acknowledgements

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001, we also thank the Federal University of Lavras for all support.

ANNEX I

Table 5

The data inputs and outputs; description of the variables and units used by the PBMs MAESTRA and MAESPA (were obtained from the articles by Medlyn (2004); Medlyn et al., (2005); Medlyn et al., (2007); Duursma and Medlyn (2012) and <https://maespa.github.io/>).

Model inputs		
The trees file (trees.dat)		
Variable	Definition	Unit
Xmax	maximum x coordinate of tree location	m
Ymax	maximum y coordinate of tree location	m
Notrees	total number of trees	
Xslope	slope of the plot in x Direction	(°)
Yslope	slope of the plot in y Direction	(°)
Bearing	bearing of the x-axis from SOUTH	(°)
Shadeht	describe the external shading of the plot	m
Zht	canopy measurement height	m
Zpd	zero-plane displacement	m
z0ht	roughness length	m
crown radius x	the radio of the crown in x direction	m
crown radius y	the radio of the crown in y direction	m
crown height stem	for individual tree	m
diameter	for individual tree	cm
trunk height	for individual tree	m
leaf área	for individual tree	m ²

Stand structure information (str.dat)		
Cshape	specific the shape of the crown	
Avgang	the mean leaf inclination angle	(°)
Nalpha	specific the leaf angle class	
Jleaf	beta distributions for leaf area density	
Noagec	the number of age classes for which beta-distributions are specified	
Random	the level of clumping of foliage into shoots	
Extwind	is the exponential coefficient related to the decrease in wind speed in the canopy	
Coefft	parameter used to calculate woody biomass	
Expont	parameter used to calculate woody biomass	
Winterc	parameter used to calculate woody biomass	
Simulation control parameters (confile.dat)		
Iohrly	indicates the details of the outputs	hour, day, week, month or year
Iotutd	refers to the diffuse transmittance calculation	day or week
Ioresp	indicates whether the respiration fluxes should be printed	
Iohist	indicates whether the PAR histogram should be printed out	
Startdate	when the process started	
Enddate	when the process ended	
Itargets	specifies target trees	
Nolay	is the number of layers in the crown to calculate radiation interception	
Nzen	number of zenith angles used for calculates diffuse transmittance	
Naz	number of azimuth angles used for calculates diffuse transmittance	
Modelgs	indicates the model used to calculate stomatal conductance	
Modelrd	indicates how the leaf respiration rates parameters should be read	
Modeljm	indicates how the Jmax and Vcmax parameters should be read	
Itermax	controls iterations in the combined photosynthesis-transpiration model	
Modelss	indicates how the photosynthesis calculations will be done	

The physiology file (phy.dat)

	the number of age classes of foliage for which physiological parameters are specified.	
Noagep		
Prop	is the proportion of leaf area in each age class	
Nolayers	is the number of crown layers for which reflectance and transmittance are specified	
Rhosol	is the soil reflectance in the PAR, NIR and thermal bands	
Atau	is the leaf transmittance in the PAR, NIR and thermal bands	
Arho	is the leaf reflectance in the PAR, NIR and thermal bands	
Nodates	gives the dates at which X contents were specified	
Conduits	refers to the control of units of stomatal conductance parameters	CO ₂ or H ₂ O
g0	parameter used to calculate stomatal conductance	mol m ⁻² s ⁻¹
g1	parameter used to calculate stomatal conductance	dimensionless
Nsides	is the number of sides of the leaf with stomata	
Wleaf	is the width of the leaf	m
Gamma	parameter used to calculate stomatal conductance	μmol mol mol ⁻¹
Nolayers	the number of layers for which leaf X is specified	
Noages	the number of ages for which leaf X is specified	
J _{MAX}	Maximum rate of photosynthetic electron transport at 25 °C	μmol m ⁻² s ⁻¹
V _C MAX	Maximum rate of Rubisco carboxylase activity at 25 °C	μmol m ⁻² s ⁻¹
Jmaxpars	parameter that specifies the physiology of the understorey	
Theta	is the curvature of the light-response curve of electron transport	
Eavj	parameter required to calculation photosynthesis	
Edvj	parameter required to calculation photosynthesis	
Delsj	parameter required to calculation photosynthesis	
Ajq	is the quantum yield of electron transport	
Vcmaxpars	parameter that specifies the physiology of the understorey	
Eavc	parameter required to calculation photosynthesis	
Rdpars	parameter required to calculation leaf respiration	

Rtemp	is the temperature at which the values of leaf respiration rates are specified	°C
q10f	is the exponential coefficient of the temperature response of foliage respiration	
Dayresp	determines the respiration in the light, relative to respiration in the dark	
Effyrf	parameter required to calculation leaf respiration	$\text{g g}^{-1} \text{C}$
Sla	specific leaf area	$\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$
The met file (met.dat)		
Difsky	controls the distribution of diffuse radiation incident from the sky	
Ca	refers the atmospheric CO ₂ concentration	$\mu\text{mol mol mol}^{-1}$
Lat	Latitude	degrees, minutes and seconds
Long	Longitude	degrees, minutes and seconds
Tzlong	refers the longitude of the meridian of the time zone	(°)
Lonhem	indicates the hemisphere 'W' or 'E'	
Lathem	indicates the hemisphere 'N' or 'S'	
Dayorhr	indicates will be the met file is daily	hour, day, week, month or year
Khrsperday	specifies the number of time steps per day	year
Nocolumns	indicates the number of columns of meteorological data	
TAIR	air temperature	°C
RH%	relative humidity	%
PPT	Precipitation	mm
WIND	wind speed above the canopy	m s^{-1}
RAD	hourly incident total short-wave radiation	W m^{-2}
PRESS	atmospheric pressure	Pa
PAR	hourly incident photosynthetically active radiation	$\mu\text{mol mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
The water balance file (watpars.dat) - Specific to a model MAESPA		
Keepwet	controls the calculate the soil water balance	

simtsoil	controls simulation of soil temperature	
reassignrain	controls the precipitation Reading	
Retfunction	specifies which soil water retention curve should be used	
Equaluptake	sets the option to use equal relative water uptake from all soil layers	
Usemeaset	refers that the soil water balance is calculated with measured canopy transpiration	
Usemeassw	refers to use measured soil water content in the simulations	
Rutterb	parameter of Rutter model of rainfall interception in forests	
Rutterd	parameter of Rutter model of rainfall interception in forests	
Maxstorage	parameter of Rutter model of rainfall interception in forests	
Throughfall	parameter of Rutter model of rainfall interception in forests	
Rootrad	is the average root radius	m
Rootdens	the density of root biomass	g m^{-3}
Rootmasstot	is the total root biomass	g m^{-2}
Nrootlayer	the number of soil layers that are rooted	
Fracroot	refers the fraction of water-uptaking roots in each rooted layer	
Minleafwp	is the minimum leaf water potential	
Plantk	is the leaf-specific (total) plant hydraulic conductance	$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{MPa}^{-1}$
Bpar	parameter of the soil water retention curve	
Psie	parameter of the soil water retention curve	
Ksat	is the saturated soil hydraulic conductivity	$\text{mol m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{MPa}^{-1}$
Nlayer	number of soil layers in the model	
laythick	is the thickness of each layer of soil	m
Porefrac	soil porosity	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
Fracorganic	the fraction of soil solids that is organic matter	
Initwater	the initial soil water content	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
Soiltemp	the initial soil temperature	$^{\circ}\text{C}$

Drythickmin	the minimum thickness of the layer of dry soil	m
Tortpar	parameter used for describe the tortuosity of the soil	

Model inputs and constants

The trees file (trees.dat)

Variable	Definition	Unit
xmax	maximum x coordinate of tree location	m
ymax	maximum y coordinate of tree location	m
notrees	total number of trees	
xslope	slope of the plot in x direction	(°)
yslope	slope of the plot in y direction	(°)
bearing	bearing of the x-axis from SOUTH	(°)
shadeht	describe the external shading of the plot	m
zht	canopy measurement height	m
zpd	zero-plane displacement	m
z0ht	roughness length	m
crown radius x	the radio of the crown in x direction	m
crown radius y	the radio of the crown in y direction	m
crown height	for individual tree	m
stem diameter	for individual tree	cm
trunk height	for individual tree	m
leaf area	for individual tree	m ²
Stand structure information (str.dat)		
cshape	specific the shape of the crown	
avgang	the mean leaf inclination angle	(°)
nalpha	specific the leaf angle class	

jleaf	beta distributions for leaf area density
noagec	the number of age classes for which beta-distributions are specified
random	the level of clumping of foliage into shoots
extwind	is the exponential coefficient related to the decrease in wind speed in the canopy
coefft	parameter used to calculate woody biomass
expont	parameter used to calculate woody biomass
winterc	parameter used to calculate woody biomass

Simulation control parameters (confile.dat)

iohrly	indicates the details of the outputs	hour, day, week, month or year
iotutd	refers to the diffuse transmittance calculation	day or week
ioresp	indicates whether the respiration fluxes should be printed	
iohist	indicates whether the PAR histogram should be printed out	
startdate	when the process started	
enddate	when the process ended	
itargets	specifies target trees	
nolay	is the number of layers in the crown to calculate radiation interception	
nzen	number of zenith angles used for calculates diffuse transmittance	
naz	number of azimuth angles used for calculates diffuse transmittance	
modelgs	indicates the model used to calculate stomatal conductance	
modelrd	indicates how the leaf respiration rates parameters should be read	
modeljm	indicates how the Jmax and Vcmax parameters should be read	
itermax	controls iterations in the combined photosynthesis-transpiration model	
modelss	indicates how the photosynthesis calculations will be done	

The physiology file (phy.dat)

noagep	the number of age classes of foliage for which physiological parameters are specified.
prop	is the proportion of leaf area in each age class
nolayers	is the number of crown layers for which reflectance and transmittance are specified

rhosol	is the soil reflectance in the PAR, NIR and thermal bands	
atau	is the leaf transmittance in the PAR, NIR and thermal bands	
arho	is the leaf reflectance in the PAR, NIR and thermal bands	
nodates	gives the dates at which X contents were specified	
condunits	refers to the control of units of stomatal conductance parameters	CO ₂ or H ₂ O
g0	parameter used to calculate stomatal conductance	mol m ⁻² s ⁻¹
g1	parameter used to calculate stomatal conductance	dimensionless
nsides	is the number of sides of the leaf with stomata	
wleaf	is the width of the leaf	m
gamma	parameter used to calculate stomatal conductance	μmol mol mol ⁻¹
nolayers	the number of layers for which leaf X is specified	
noages	the number of ages for which leaf X is specified	
J _{MAX}	Maximum rate of photosynthetic electron transport at 25 °C	μmol m ⁻² s ⁻¹
V _C MAX	Maximum rate of Rubisco carboxylase activity at 25 °C	μmol m ⁻² s ⁻¹
jmaxpars	parameter that specifies the physiology of the understory	
theta	is the curvature of the light-response curve of electron transport	
eavj	parameter required to calculation photosynthesis	
edvj	parameter required to calculation photosynthesis	
delsj	parameter required to calculation photosynthesis	
ajq	is the quantum yield of electron transport	
vcmaxpars	parameter that specifies the physiology of the understory	
eavc	parameter required to calculation photosynthesis	
rdpars	parameter required to calculation leaf respiration	
rtemp	is the temperature at which the values of leaf respiration rates are specified	°C
q10f	is the exponential coefficient of the temperature response of foliage respiration	
dayresp	determines the respiration in the light, relative to respiration in the dark	
effyrf	parameter required to calculation leaf respiration	g g ⁻¹ C

sla	specific leaf area	$\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$
The met file (met.dat)		
difsky	controls the distribution of diffuse radiation incident from the sky	
ca	refers the atmospheric CO ₂ concentration	$\mu\text{mol mol}^{-1}$
lat	latitude	degrees, minutes and seconds
long	longitude	degrees, minutes and seconds
tzlong	refers the longitude of the meridian of the time zone	(°)
lonhem	indicates the hemisphere 'W' or 'E'	
lathem	indicates the hemisphere 'N' or 'S'	
dayorhr	indicates will be the met file is daily	hour, day, week, month or year
khersperday	specifies the number of time steps per day	year
nocolumns	indicates the number of columns of meteorological data	
TAIR	air temperature	°C
RH%	relative humidity	%
PPT	Precipitation	mm
WIND	wind speed above the canopy	m s^{-1}
RAD	hourly incident total short-wave radiation	W m^{-2}
PRESS	atmospheric pressure	Pa
PAR	hourly incident photosynthetically active radiation	$\mu\text{mol mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
The water balance file (watpars.dat) - Specific to a model MAESPA		
keepwet	controls the calculate the soil water balance	
simtsoil	controls simulation of soil temperature	
reassignrain	controls the precipitation reading	
retfunction	specifies which soil water retention curve should be used	
equaluptake	sets the option to use equal relative water uptake from all soil layers	
usemeaset	refers that the soil water balance is calculated with measured canopy transpiration	

usemeassw	refers to use measured soil water content in the simulations	
rutterb	parameter of Rutter model of rainfall interception in forests	
rutterd	parameter of Rutter model of rainfall interception in forests	
maxstorage	parameter of Rutter model of rainfall interception in forests	
throughfall	parameter of Rutter model of rainfall interception in forests	
rootrad	is the average root radius	m
rootdens	the density of root biomass	g m^{-3}
rootmasstot	is the total root biomass	g m^{-2}
nrootlayer	the number of soil layers that are rooted	
fracroot	refers the fraction of water-uptaking roots in each rooted layer	
minleafwp	is the minimum leaf water potential	
plantk	is the leaf-specific (total) plant hydraulic conductance	$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{MPa}^{-1}$
bpar	parameter of the soil water retention curve	
psie	parameter of the soil water retention curve	
ksat	is the saturated soil hydraulic conductivity	$\text{mol m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{MPa}^{-1}$
nlayer	number of soil layers in the model	
laythick	is the thickness of each layer of soil	m
porefrac	soil porosity	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
fracorganic	the fraction of soil solids that is organic matter	
initwater	the initial soil water content	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
soiltemp	the initial soil temperature	$^{\circ}\text{C}$
drythickmin	the minimum thickness of the layer of dry soil	m
tortpar	parameter used for describe the tortuosity of the soil	

Model Output

The daily flux data file (dayflx.dat)

Variable	Definition	Unit
DOY	simulation date	

Tree	tree number	
Spec	tree species number	
absPAR	absorbed PAR	MJ tree ⁻¹ d ⁻¹
absNIR	absorbed NIR	MJ tree ⁻¹ d ⁻¹
absTherm	absorbed thermal	MJ tree ⁻¹ d ⁻¹
totPs	gross photosynthesis	mol tree ⁻¹ d ⁻¹
totRf	daily foliar respiration	mol tree ⁻¹ d ⁻¹
netPs	photosynthesis net of foliar respiration	mol tree ⁻¹ d ⁻¹
totLE1	daily transpiration	mol H ₂ O tree ⁻¹ d ⁻¹
totLE2	daily transpiration (CANOPY calc)	mol H ₂ O m ⁻² d ⁻¹
totH	daily sensible heat flux	MJ tree ⁻¹ d ⁻¹

The simulation errors and warnings file (maeserr.dat)

simulation completed successfully or problems with the simulation

The water balance file (watbal.dat) - Specific to a model MAESPA

wsoil	total soil water storage	mm
wsoilroot	soil water storage in rooted zone	mm
ppt	precipitation	mm
canopystore	storage of intercepted rain	mm
evapstore	evaporation of wet canopy	mm
drainstore	drainage of wet canopy	mm
tfall	throughfall of rain	mm
et	modelled canopy transpiration	mm
etmeas	measured ET, if provided in input	mm
discharge	drainage at bottom of profile	mm
overflow	over-land flow	mm
weightedswp	soil water potential weighted by roots	MPa

ktot	soil to leaf hydrologic condition	mmol m ⁻² s ⁻¹ Mpa
drythick	thickness of dry surface layer	mm
soilevap	soil evaporation	mm
soilmoist	measured soil water content	units vary
fsoil	soil water modifier function	0-1
qh	soil sensible heat flux	W m ⁻²
qe	soil latent heat flux	W m ⁻²
qn	soil net radiation	W m ⁻²
qc	soil heat transport	W m ⁻²
rglobund	net radiation underneath canopy	W m ⁻²
rglobabv	net radiation above canopy	W m ⁻²
radinterc	total radiation intercepted by canopy	W m ⁻²
rnet	net radiation above the canopy	W m ⁻²
totlai	leaf area index	m ² m ⁻²
tair	air temperature	deg C
soilt1, soilt2	soil T in 1st and 2nd layer	deg C
fracw1,fracw2	water content 1st and 2nd layer	m ³ m ⁻³
FracaPAR	fraction of absorbed PAR	

The daily water balance file (watbalday.dat) - Specific to a model MAESPA

Wsoil	total soil water storage	mm
wsoilroot	soil water storage in rooted zone	mm
swp	weighted soil water potential	MPa
ppt	precipitation	mm
tfall	throughfall of rain	mm
et	modelled canopy transpiration	mm
etmeas	measured ET, if provided in input	mm

discharge	drainage at bottom of profile	mm
soilevap	soil evaporation	mm
fsoil	soil water modifier function	0-1
qh	sensible heat flux	MJ m ⁻² day ⁻¹
qe	latent heat flux	MJ m ⁻² day ⁻¹
qn	net radiation	MJ m ⁻² day ⁻¹
qc	soil heat transport	MJ m ⁻² day ⁻¹
radinterc	total radiation intercepted	MJ m ⁻² day ⁻¹
<hr/>		
Other detailed water balance output files (watlay.dat, watupt.dat, watsoilt.dat) - Specific to a model MAESPA		
watlay.dat	The soil water content	m ³ m ⁻³
watupt.dat	the fractional water uptake from each rooted layer	
watsoilt.dat	the soil temperature for each layer	
<hr/>		

REFERENCES

- Adams, H. D., Williams, A. P., Xu, C., Rauscher, S. A., Jiang, X., McDowell, N. G., 2013. Empirical and process-based approaches to climate-induced forest mortality models. *Frontiers In Plant Science*, 4, 1-5. <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2013.00438>.
- Almeida, A. C., Soares, J. V., Landsberg, J. J., Rezende, G. D., 2007. Growth and water balance of *Eucalyptus grandis* hybrid plantations in Brazil during a rotation for pulp production. *Forest Ecology and Management*, 251, 1-2, 10-21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.009>.
- Aria, M., Cuccurullo, C., 2017. Bibliometrix: an r-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11, 4, 959-975. <http://dx.doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>.
- Augustynczyk, A. L. D., Gutsch, M., Basile, M., Suckow, F., Lasch, P., Yousefpour, R., Hanewinkel, M., 2020. Socially optimal forest management and biodiversity conservation in temperate forests under climate change. *Ecological Economics*, 169, 106504. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106504>.
- Balandier, P., Lacoite, A., Roux, X. L., Sinoquet, H., Cruiziat, P., Dizès, S. L., 2000. SIMWAL: a structural-functional model simulating single walnut tree growth in response to climate and pruning. *Annals Of Forest Science*, 57, 5, 571-585. <http://dx.doi.org/10.1051/forest:2000143>.
- Baldwin, V. C., Burkhart, H. E., Dougherty, P. M., Teskey, R. O., 1993. Using a growth and yield model (PTAEDA2) as a driver for a biological process model (MAESTRO). United States Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station, New Orleans, 276., [n.pp].
- Barnard, D. M., Bauerle, W. L., 2015. Species-specific irrigation scheduling with a spatially explicit biophysical model: A comparison to substrate moisture sensing with insight into simplified physiological parameterization. *Agricultural And Forest Meteorology*, 214-215, 48-59. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.08.244>.
- Bartelink, H. H., 2000. A growth model for mixed forest stands. *Forest Ecology and Management*, 134, 1-3, 29-43. [http://dx.doi.org/10.1016/s0378-1127\(99\)00243-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0378-1127(99)00243-1).
- Battaglia, M., Sands, P., White, D., Mummery, D., 2004. CABALA: a linked carbon, water and nitrogen model of forest growth for silvicultural decision support. *Forest Ecology and Management*, 193, 1-2, 251-282. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.033>.
- Bauerle, W. L., Post, C. J., Mcleod, M. F., Dudley, J. B., Toler, J., 2002. Measurement and modeling of the transpiration of a temperate red maple container nursery. *Agricultural and Forest Meteorology*, 114, 1-2, 45-57. [http://dx.doi.org/10.1016/s0168-1923\(02\)00136-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0168-1923(02)00136-3).

Bauerle, W. L., Bowden, J. D., Mcleod, M. F., Toler, J. E., 2004. Modeling intra-crown and intra-canopy interactions in red maple: assessment of light transfer on carbon dioxide and water vapor exchange. *Tree Physiology*, 24, 5, 589-597. <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/24.5.589>.

Binkley, D., Laclau, J. P., Sterba, H., 2013. Special Issue: Light interception and growth of trees and stands. *Forest Ecology and Management*, 288, 1-59.

Binkley, D., Stape, J. L., Bauerle, W. L., Ryan, M. G., 2010. Explaining growth of individual trees: light interception and efficiency of light use by *Eucalyptus* at four sites in Brazil. *Forest Ecology and Management*, 259, 9, 1704-1713. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2009.05.037>.

Bohn, F. J., Frank, K., Huth, A., 2014. Of climate and its resulting tree growth: simulating the productivity of temperate forests. *Ecological Modelling*, 278, 9-17. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.01.021>.

Bossel, H., 1996. Treedyn3 forest simulation model. *Ecological Modelling*, 90, 3, 187-227. [http://dx.doi.org/10.1016/0304-3800\(95\)00139-5](http://dx.doi.org/10.1016/0304-3800(95)00139-5).

Braghiere, R. K., Quaife, T., Black, E., Ryu, Y., Chen, Q., Kauwe, M. G. de, Baldocchi, D., 2020. Influence of sun zenith angle on canopy clumping and the resulting impacts on photosynthesis. *Agricultural And Forest Meteorology*, 291, 108065-108065. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108065>.

Caldeira, D. R. M., Alvares, C. A., Campoe, O. C., Hakamada, R. E., Guerrini, I. A., Cegatta, Í. R., Stape, J. L., 2020. Multisite evaluation of the 3-PG model for the highest phenotypic plasticity *Eucalyptus* clone in Brazil. *Forest Ecology and Management*, 462, 117989. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117989>.

Campbell, G. S., 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Science*, 117, 6, 311-314. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-197406000-00001>.

Campoe, O. C., Stape, J. L., Albaugh, T. J., Allen, H. L., Fox, T. R., Rubilar, R., Binkley, D., 2013. 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*, 288, 43-48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.05.026>.

Campoe, O. C., Stape, J. L., Nouvellon, Y., Laclau, J.-P., Bauerle, W. L., Binkley, D., Maire, G. L., 2013. Stem production, light absorption and light use efficiency between dominant and non-dominant trees of *Eucalyptus grandis* across a productivity gradient in Brazil. *Forest Ecology and Management*, 288, 14-20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.07.035>.

Campos, J. C. C., Leite, H. G., 2017. *Mensuração Florestal: perguntas e respostas*. 5. Edition, Viçosa: Ufv, 636 pp.

Carvalho, S. P. C., Lima, M. P., 2015. Uma proposta para o preparo de bases de dados utilizadas nos ajustes de modelos de crescimento e produção florestal. *Advances in Forestry Science*, Cuiabá, 2, 3, 69-72. <https://doi.org/10.34062/afs.v2i3.2468>.

Cavaleri, M. A., Coble, A. P., Ryan, M. G., Bauerle, W. L., Loescher, H. W., Oberbauer, S. F., 2017. Tropical rainforest carbon sink declines during El Niño as a result of reduced photosynthesis and increased respiration rates. *New Phytologist*, 216, 1, 136-149. <http://dx.doi.org/10.1111/nph.14724>.

Chadegani, A. A., Salehi, H., Yunus, M. M., Farhadi, H., Fooladi, M., Farhadi, M., Ebrahim, N. A., 2013. A Comparison between Two Main Academic Literature Collections: Web of Science and Scopus Databases. *Asian Social Science*, 9, 5, 18-26. <http://dx.doi.org/10.5539/ass.v9n5p18>.

Choudhri, A. F., Siddiqui, A., Khan, N. R., Cohen, H. L., 2015. Understanding Bibliometric Parameters and Analysis. *Radiographics*, 35, 3, 736-746. <https://doi.org/10.1148/rg.2015140036>.

Choudhury, B. J., Monteith, J. L., 1988. A four-layer model for the heat budget of homogeneous land surfaces. *Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society*, 114, 480, 373-398. <http://dx.doi.org/10.1002/qj.49711448006>.

Christina, M., Nouvellon, Y., Laclau, J.P., Stape, J.L., Campoe, O.C, Maire, G. Le., 2016. Sensitivity and uncertainty analysis of the carbon and water fluxes at the tree scale in *Eucalyptus* plantations using a metamodeling approach. *Canadian Journal Of Forest Research*, 46, 3, 297-309. <http://dx.doi.org/10.1139/cjfr-2015-0173>.

Christina, M., Maire, G. Le, Nouvellon, Y., Vezy, R., Bordon, B., Battie-Laclau, P., Gonçalves, J.L.M., Delgado-Rojas, J.S., Bouillet, J.-P., Laclau, J.-P., 2018. Simulating the effects of different potassium and water supply regimes on soil water content and water table depth over a rotation of a tropical *Eucalyptus grandis* plantation. *Forest Ecology and Management*, 418, 4-14. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.12.048>.

Christina, M., Nouvellon, Y., Laclau, J.-P., Stape, J. L., Bouillet, J.-P., Lambais, G. R., Maire, G., 2016. Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest. *Functional Ecology*, 31, 2, 509-519. <http://dx.doi.org/10.1111/1365-2435.12727>.

Cobo, M. J., López-Herrera, A. G., Herrera-Viedma, E., Herrera, F., 2011. An approach for detecting, quantifying, and visualizing the evolution of a research field: A practical application to the Fuzzy Sets Theory field. *Journal of Informetrics*, 5, 1, 146-166. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2010.10.002>.

Collatz, G. J., Ball, J. T., Grivet, C., Berry, J., 1991. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer. *Agricultural and Forest Meteorology*, 54, 2-4, 107-136. [http://dx.doi.org/10.1016/0168-1923\(91\)90002-8](http://dx.doi.org/10.1016/0168-1923(91)90002-8).

Comins, H. N., Mcmurtrie, R. E., 1993. Long-Term Response of Nutrient-Limited Forests to CO₂ Enrichment, Equilibrium Behavior of Plant-Soil Models. *Ecological Applications*, 3, 4, 666-681. <http://dx.doi.org/10.2307/1942099>.

Cuddington, K., Fortin, M.-J., Gerber, L. R., Hastings, A., Liebhold, A., O'connor, M., Ray, C., 2013. Process-based models are required to manage ecological systems in a changing world. *Ecosphere*, 4, 2, 20. <http://dx.doi.org/10.1890/es12-00178.1>.

Deckmyn, G., Verbeeck, H., Beeck, M. Op de, Vansteenkiste, D., Steppe, K., Ceulemans, R., 2008. ANAFORE: a stand-scale process-based forest model that includes wood tissue development and labile carbon storage in trees. *Ecological Modelling*, 215, 4, 345-368. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.04.007>.

Dufrêne, E., Davi, H., François, C., Maire, G. Le, Dantec, V. Le, Granier, A., 2005. Modelling carbon and water cycles in a beech forest. *Ecological Modelling*, 185, 2-4, 407-436. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.01.004>.

Duursma, R. 2015. Package Maeswrap. Disponível em < <https://cran.r-project.org/web/packages/Maeswrap/index.html>>. Accessed in: 01 de nov. 2019.

Duursma, R. A., Medlyn, B. E., 2012. MAESPA: a model to study interactions between water limitation, environmental drivers and vegetation function at tree and stand levels, with an example application to [CO₂] × drought interactions. *Geoscientific Model Development*, 5, 4, 919-940. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-919-2012>.

Elango, B., Rajendran, P., 2012. Authorship trends and collaboration pattern in the marine sciences literature: a scientometric study. *International Journal of Information Dissemination and Technology*, 2, 166-169.

Eliasson, P. E., Mcmurtrie, R. E., Pepper, D. A., Stromgren, M., Linder, S., Agren, G. I., 2005. The response of heterotrophic CO₂ flux to soil warming. *Global Change Biology*, 11, 1, 167-181. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00878.x>.

Farquhar, G., Von Caemmerer, S., 1982. Modelling of photosynthetic responses to environmental conditions. In: Lange OL, Nobel PS, Osmond CB, Ziegler H (eds) *Physiological Plant ecology II. Encyclopedia of plant physiology, new series, vol 12B*. Springer-Verlag, Heidelberg, 550–587.

Federer, C. A., Vörösmarty, C., Fekete, B., 2003. Sensitivity of Annual Evaporation to Soil and Root Properties in Two Models of Contrasting Complexity. *Journal Of Hydrometeorology*, 4, 6, 1276-1290. [http://dx.doi.org/10.1175/1525-7541\(2003\)0042.0.co;2](http://dx.doi.org/10.1175/1525-7541(2003)0042.0.co;2).

Fernández-Tschieder, E., Binkley, D., Bauerle, W., 2020. Production ecology and reverse growth dominance in an old-growth ponderosa pine forest. *Forest Ecology and Management*, 460, 117891. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117891>.

Fontes, L., Bontemps, J.-D., Bugmann, H., Van Oijen, M., Gracia, C., Kramer, K., Lindner, M., Rötzer, T., Skovsgaard, J. P., 2011. Models for supporting forest management in a changing environment. *Forest Systems*, 3, 4, 8. <http://dx.doi.org/10.5424/fs/201019s-9315>.

Forrester, D. I., Rodenfels, P., Haase, J., Härdtle, W., Leppert, K. N., Niklaus, P. A., Von Oheimb, G., Scherer-Lorenzen, M., Bauhus, J., 2019. Tree-species interactions increase light absorption and growth in Chinese subtropical mixed-species plantations. *Oecologia*, 191, 2, 421-432. <http://dx.doi.org/10.1007/s00442-019-04495-w>.

Franklin, O., Johansson, J., Dewar, R. C., Dieckmann, U., Mcmurtrie, R. E., Brannstrom, A., Dybzinski, R., 2012. Modeling carbon allocation in trees: a search for principles. *Tree Physiology*, 32, 6, 648-666. <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/tp138>.

Gonçalves, A. F. A., Santos, J. A. dos, França, L. C. de J., Campoe, O. C., Altoé, T. F., Scolforo, J. R. S., 2021. Use of the process-based models in forest research: a bibliometric review. *Cerne*, 27, 102769. <http://dx.doi.org/10.1590/01047760202127012769>.

Grace, J. C., Jarvis, P. G., Norman, J. M., 1987. Modelling the interception of solar radiant energy in intensively managed stands. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 17, 2/3, 193-209.

Grote, R., Pretzsch, H., 2002. A Model for Individual Tree Development Based on Physiological Processes. *Plant Biology*, 4, 2, 167-180. <http://dx.doi.org/10.1055/s-2002-25743>.

Guan, Y., Kang, R., Liu, J., 2018. Evolution of the field of ecological restoration over the last three decades: a bibliometric analysis. *Restoration Ecology*, 27, 3, 647-660. <https://doi.org/10.1111/rec.12899>.

Guo, L., Xu, F., Feng, Z., Zhang, G., 2015. A bibliometric analysis of oyster research from 1991 to 2014. *Aquaculture International*, 24, 1, 327-344. <https://doi.org/10.1007/s10499-015-9928-1>.

Gupta, R., Sharma, L. K., 2019. The process-based forest growth model 3-PG for use in forest management: A review. *Ecological Modelling*, 397, 55-73. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.01.007>.

Huang, L., Zhou, M., Lv, J., Chen, K., 2020. Trends in global research in forest carbon sequestration: a bibliometric analysis. *Journal of Cleaner Production*, 252, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119908>.

Jarvis, P. G., 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions Of The Royal Society Of London. Biological Sciences*, 273, 927, 593-610. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.1976.0035>.

Johnsen, K., Samuelson, L., Teskey, R., McNulty, S., Fox, T., 2001. Process models as tools in forestry research and management. *Forest Science*, 47, 1, 2-8. <https://doi.org/10.1093/forestscience/47.1.2>.

Klippel, V.H., 2015. Modelagem ecofisiológica de cultivos de eucalipto em regiões subtropicais do Brasil. 89 pp. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

Köhler, P., Huth, A., 1998. The effects of tree species grouping in tropical rainforest modelling: simulations with the individual-based model formind. *Ecological Modelling*, 109, 3, 301-321. [http://dx.doi.org/10.1016/s0304-3800\(98\)00066-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0304-3800(98)00066-0).

Lam-Gordillo, O., Baring, R., Dittmann, S., 2020. Ecosystem functioning and functional approaches on marine macrobenthic fauna: A research synthesis towards a global consensus. *Ecological Indicators*, 115, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106379>.

Landsberg, J. J., Sands, P. J., 2011. *Physiological Ecology of Forest Production: Principles, Processes and Models*. Vol. 4. London, Elsevier/Academic Press, 331 pp.

Landsberg, J.J., Waring, R.H., 1997. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, 95, 3, 209-228. [http://dx.doi.org/10.1016/s0378-1127\(97\)00026-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0378-1127(97)00026-1).

Lasch, P., Badeck, F.-W., Suckow, F., Lindner, M., Mohr, P., 2005. Model-based analysis of management alternatives at stand and regional level in Brandenburg (Germany). *Forest Ecology and Management*, 207, 1-2, 59-74. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2004.10.034>.

Leal, A. I., Correia, R. A., Palmeirim, J. M., Bugalho, M. N., 2019. Is research supporting sustainable management in a changing world? Insights from a Mediterranean silvopastoral system. *Agroforestry Systems*, 93, 1, 355-368. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-018-0231-9>.

Leuning, R., 1995. A critical appraisal of a combined stomatal-photosynthesis model for C3 plants. *Plant, Cell and Environment*, 18, 4, 339-355. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3040.1995.tb00370.x>.

Maire, G. L., Guillemot, J., Campoe, O. C., Stape, J. L., Laclau, J.-P., Nouvellon, Y., 2019. Light absorption, light use efficiency and productivity of 16 contrasted genotypes of several *Eucalyptus* species along a 6-year rotation in Brazil. *Forest Ecology and Management*, 449, 117443-117458. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2019.06.040>.

Mäkelä, A., Mäkinen, H., 2003. Generating 3D sawlogs with a process-based growth model. *Forest Ecology and Management*, 184, 1-3, 337-354. [http://dx.doi.org/10.1016/s0378-1127\(03\)00152-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0378-1127(03)00152-x).

Martinez, S., Delgado, M. d. M., Marin, R. M., Alvarez, S., 2019. Science mapping on the Environmental Footprint: a scientometric analysis-based review. *Ecological Indicators*, 106, 105543. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105543>.

Medlyn, B. E., 2004. A MAESTRO retrospective. Mencuccini, M., Moncrieff, J., Mcnaughton, K., Grace, J. (Eds.), *Forests at the Land-Atmosphere Interface*, CABI Publishing, Wallingford, UK, 105-122.

Medlyn, B. E., Duursma, R. A., Eamus, D., Ellsworth, D. S., Prentice, I. C., Barton, C. V. M., Crous, K. Y., Angelis, P. de, Freeman, M., Wingate, L., 2011. Reconciling the optimal and empirical approaches to modelling stomatal conductance. *Global Change Biology*, 17, 6, 2134-2144. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02375.x>.

Medlyn, B. E., Pepper, D. A., O'Grady, A. P., Keith, H., 2007. Linking leaf and tree water use with an individual-tree model. *Tree Physiology*, 27, 12, 1687-1699. <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/27.12.1687>.

Medlyn, B. E., Berbigier, P., Clement, R., Grelle, A., Loustau, D., Linder, S., Wingate, L., Jarvis, P. G., Sigurdsson, B. D., Mcmurtrie, R. E., 2005. Carbon balance of coniferous forests growing in contrasting climates: model-based analysis. *Agricultural And Forest Meteorology*, 131, 1-2, 97-124. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.05.004>.

Mirkouei, A., Haapala, K. R., Sessions, J., Murthy, G. S., 2017. A review and future directions in techno-economic modeling and optimization of upstream forest biomass to bio-oil supply chains. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 67, 15-35. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.053>.

Mourão, P. R., Martinho, V. D., 2020. Forest entrepreneurship: a bibliometric analysis and a discussion about the co-authorship networks of an emerging scientific field. *Journal of Cleaner Production*, 256, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120413>.

Norman, J. M., 1980. Interfacing leaf and canopy light interception models, in: *Predicting photosynthesis for ecosystem models*, edited by: Hesketh, J. D. and Jones, J. W., CRC, Boca Raton, 49-67.

Norman, J. M., 1979. Modeling the complete crop canopy, in: *Modification of the aerial environment of plant*, edited by: Barfield, B. J. and Gerber, J. F., American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, 249-277.

Norman, J. M., Jarvis, P. G., 1974. Photosynthesis in Sitka Spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.). III. Measurements of Canopy Structure and Interception of Radiation. *The Journal Of Applied Ecology*, 11, 1, 375. <http://dx.doi.org/10.2307/2402028>.

Norman, J. M., Jarvis, P. G., 1975. Photosynthesis in Sitka Spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.): V. Radiation penetration theory and a test case. *The Journal Of Applied Ecology*, 12, 3, 839. <http://dx.doi.org/10.2307/2402094>.

Norman, J.M. and Welles, J.M., 1983. Radiative transfer in an array of canopies 1. *Agronomy Journal*, 75, 3, 481-488. <https://doi.org/10.2134/agronj1983.00021962007500030016x>.

Perttunen, J, Sievänen, R, Nikinmaa, E., 1998. LIGNUM: a model combining the structure and the functioning of trees. *Ecological Modelling*, 108, 1-3, 189-198. [http://dx.doi.org/10.1016/s0304-3800\(98\)00028-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0304-3800(98)00028-3).

Prentice, I. C., Sykes, M. T., Cramer, W., 1993. A simulation model for the transient effects of climate change on forest landscapes. *Ecological Modelling*, 65, 1-2, 51-70. [http://dx.doi.org/10.1016/0304-3800\(93\)90126-d](http://dx.doi.org/10.1016/0304-3800(93)90126-d).

Pretzsch, H., Forrester, D. I., Rötzer, T., 2015. Representation of species mixing in forest growth models. A review and perspective. *Ecological Modelling*, 313, 276-292. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.06.044>.

R Core Team. 2021. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing.

Resquin, F., Navarro-Cerrillo, R. M., Carrasco-Letelier, L., Casnati, C. R., Bentancor, L., 2020. Evaluation of the nutrient content in biomass of *Eucalyptus* species from short rotation plantations in Uruguay. *Biomass And Bioenergy*, 134, 105502-105502. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105502>.

Reynolds, R. F., Bauerle, W. L., Wang, Y., 2009. Simulating carbon dioxide exchange rates of deciduous tree species: evidence for a general pattern in biochemical changes and water stress response. *Annals Of Botany*, 104, 4, 775-784. <https://doi.org/10.1093/aob/mcp156>.

Rötzer, T., Häberle, K. H., Kallenbach, C., Matyssek, R., Schütze, G., Pretzsch, H., 2017. Tree species and size drive water consumption of beech/spruce forests - a simulation study highlighting growth under water limitation. *Plant And Soil*, 418, 1-2, 337-356. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-017-3306-x>.

Running, S. W., Gower, S. T., 1991. FOREST-BGC, A general model of forest ecosystem processes for regional applications. II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. *Tree Physiology*, 9, 1-2, 147-160. <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/9.1-2.147>.

Running, S. W., Coughlan, J. C., 1988. A general model of forest ecosystem processes for regional applications I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling*, 42, 2, 125-154. [http://dx.doi.org/10.1016/0304-3800\(88\)90112-3](http://dx.doi.org/10.1016/0304-3800(88)90112-3).

Running, S. W., Hunt, E. R., 1993. Generalization of a Forest Ecosystem Process Model for Other Biomes, BIOME-BGC, and an Application for Global-Scale Models. *Scaling Physiological Processes*, 141-158. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-233440-5.50014-2>.

Rutter, A. J., 1975. The hydrological cycle in vegetation. *Vegetation and the Atmosphere*, 1, 111-154.

Sampson, D. A., Janssens, I. A., Ceulemans, R., 2001. Simulated soil CO₂ efflux and net ecosystem exchange in a 70-year-old Belgian Scots pine stand using the process model SECRETS. *Annals Of Forest Science*, 58, 1, 31-46. <http://dx.doi.org/10.1051/forest:2001105>.

Schwaiger, F., Poschenrieder, W., Rötzer, T., Biber, P., Pretzsch, H., 2018. Groundwater recharge algorithm for forest management models. *Ecological Modelling*, 385, 154-164. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.07.006>.

Schwalm, C. R., Ek, A. R., 2004. A process-based model of forest ecosystems driven by meteorology. *Ecological Modelling*, 179, 3, 317-348. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.04.016>.

Scolforo, H. F., Mctague, J. P., Burkhart, H., Roise, J., Alvares, C. A., Stape, J. L., 2020. Site index estimation for clonal eucalypt plantations in Brazil: a modeling approach refined by environmental variables. *Forest Ecology and Management*, 466, 118079. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118079>.

Scolforo, H. F., Scolforo, J. R. S., Stape, J. L., Mctague, J. P., Burkhart, H., Mccarter, J., Castro Neto, F. de, Loos, R. A., Sartorio, R. C., 2017. Incorporating rainfall data to better plan *Eucalyptus* clones deployment in eastern Brazil. *Forest Ecology and Management*, 391, 145-153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2017.02.025>.

Scolforo, J. R. S., 2006. *Biometria florestal: modelos de crescimento e produção florestal*. Lavras: FAEPE– UFLA, 393 pp.

Silva, W. C. M., Ribeiro, A., Neves, J. C. L., Barros, N. F. de, Leite, F. P., 2013. Water balance model and *Eucalyptus* growth simulation in the Rio Doce basin, Brazil. *Acta Scientiarum*. 35, 4, 403-412. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v35i4.16955>.

Stape, J. L., Ryan, M. G., Binkley, D., 2004. Testing the utility of the 3-PG model for growth of with natural and manipulated supplies of water and nutrients. *Forest Ecology and Management*, 193, 1-2, 219-234. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.031>.

Stinziano, J. R., Bauerle, W. L., Way, D., 2018. A Modelled net carbon gain responses to climate change in boreal trees: Impacts of photosynthetic parameter selection and acclimation. *Global Change Biology*, 25, 4, 1445-1465. <https://doi.org/10.1111/gcb.14530>.

Taylor, H. M., Keppler, B., 1975. Water uptake by cotton root system: an examination of assumption in the single root model. *Soil Science*, 120, 57–67. <https://doi.org/10.2172/4241814>.

Tuzet, A., Perrier, A., Leuning, R., 2003. A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration. *Plant, Cell & Environment*, 26, 7, 1097-1116. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-3040.2003.01035.x>.

Unsworth, M, Wilshaw, J., 1989. Wet, occult and dry deposition of pollutants on forests. *Agricultural And Forest Meteorology*, 47, 2-4, 221-238. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(89\)90097-X](https://doi.org/10.1016/0168-1923(89)90097-X).

Van Eck, N. J., Waltman, L., 2020. *VOSviewer Manual: Manual for VOSviewer version 1.6.15*. Leiden: Centre for Science and Technology Studies (CWTS) of Leiden University. Available in: https://www.vosviewer.com/documentation/Manual_VOSviewer_1.6.15.pdf

Van Eck, N. J., Waltman, L., 2009. Software survey: vosviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84, 2, 523-538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>.

- Van Wijk, M. T., Dekker, S. C., Bouten, W., Bosveld, F. C., Kohsiek, W., Kramer, K., Mohren, G. M. J., 2000. Modeling daily gas exchange of a Douglas-fir forest: comparison of three stomatal conductance models with and without a soil water stress function. *Tree Physiology*, 20, 2, 115-122. <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/20.2.115>.
- Verbeeck, H., Samson, R., Verdonck, F., Lemeur, R., 2006. Parameter sensitivity and uncertainty of the forest carbon flux model FORUG: a monte carlo analysis. *Tree Physiology*, 26, 6, 807-817. <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/26.6.807>.
- Vezy, R., Maire, G. Le, Christina, M., Georgiou, S., Imbach, P., Hidalgo, H. G., Alfaro, E. J., Blitz-Frayret, C., Charbonnier, F., Lehner, P., 2020. DynACof: a process-based model to study growth, yield and ecosystem services of coffee agroforestry systems. *Environmental Modelling & Software*, 124, 104609. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104609>.
- Voet, H. V. D., Mohren, G.M.J., 1994. An uncertainty analysis of the process-based growth model FORGRO. *Forest Ecology and Management*, 69, 1-3, 157-166. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-1127\(94\)90226-7](http://dx.doi.org/10.1016/0378-1127(94)90226-7).
- Wang, Y.P., Jarvis, P. G., 1990a. Description and validation of an array model - MAESTRO. *Agricultural And Forest Meteorology*, 51, 3-4, 257-280. [http://dx.doi.org/10.1016/0168-1923\(90\)90112-j](http://dx.doi.org/10.1016/0168-1923(90)90112-j).
- Wang, Y. P., Jarvis, P. G., 1990b. Influence of crown structural properties on PAR absorption, photosynthesis, and transpiration in Sitka spruce: application of a model (MAESTRO). *Tree Physiology*, 7, 297-316. <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/7.1-2-3-4.297>.
- Wang, Y. P., 1988. Crown Structure, Radiation Absorption, Photosynthesis and Transpiration. PhD thesis, University of Edinburgh. 114 pp.
- Weiskittel, A. R., Maguire, D. A., Monserud, R. A., Johnson, G. P., 2009. A hybrid model for intensively managed Douglas-fir plantations in the Pacific Northwest, USA. *European Journal Of Forest Research*, 129, 3, 325-338. <https://doi.org/10.1007/s10342-009-0339-6>.
- Weiss, A., Norman, J.M., 1985. Partitioning solar radiation into direct and diffuse, visible and near-infrared components. *Agricultural And Forest Meteorology*, 34, 2-3, 205-213. [http://dx.doi.org/10.1016/0168-1923\(85\)90020-6](http://dx.doi.org/10.1016/0168-1923(85)90020-6).
- Werf, W. V. D., Keesman, K., Burgess, P., Graves, A., Pilbeam, D., Incoll, L.D., Metselaar, K., Mayus, M., Stappers, R., Van Keulen, H., 2007. Yield-SAFE: a parameter-sparse, process-based dynamic model for predicting resource capture, growth, and production in agroforestry systems. *Ecological Engineering*, 29, 4, 419-433. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.09.017>.
- Williams, M., Bond, B. J., Ryan, M. G., 2001. Evaluating different soil and plant hydraulic constraints on tree function using a model and sap flow data from ponderosa pine. *Plant, Cell And Environment*, 24, 7, 679-690. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00715.x>.

Williams, M., Law, B. E., Anthoni, P. M., Unsworth, M. H., 2001. Use of a simulation model and ecosystem flux data to examine carbon-water interactions in ponderosa pine. *Tree Physiology*, 21, 5, 287-298. <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/21.5.287>.

Williams, M., Rastetter, E. B., Fernandes, D. N., Goulden, M. L., Wofsy, S. C., Shaver, G. R., Melillo, J. M., Munger, J. W., Fan, S.-M., Nadelhoffer, K. J., 1996. Modelling the soil-plant-atmosphere continuum in a *Quercus-Acer* stand at Harvard Forest: the regulation of stomatal conductance by light, nitrogen and soil/plant hydraulic properties. *Plant, Cell And Environment*, 19, 8, 911-927. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3040.1996.tb00456.x>.

Xi, W.; Coulson, R. N.; Birt, A. G.; Shang, Z.-B.; Waldron, J. D.; Lafon, C. W.; Cairns, D. M.; Tchakerian, M. D.; Klepzig, K. D., 2009. Review of forest landscape models: types, methods, development and applications. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 1, 69-78. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chnaes.2009.01.001>.

Sharma, M., Subedi, N., Ter-Mikaelian, M., Parton, J. Modeling Climatic Effects on Stand Height/Site Index of Plantation-Grown Jack Pine and Black Spruce Trees. *Forest Science*, v. 61, n. 1, p. 25-34, 2015. <http://dx.doi.org/10.5849/forsci.13-190>.

Yang, J., Medlyn, B. E., de Kauwe, M. G., Duursma, R. A., Jiang, M., Kumarathunge, D., Crous, K. Y., Gimeno, T. E., Wujeska-Klaue, A., Ellsworth, D. S., 2020. Low sensitivity of gross primary production to elevated CO₂ in a mature eucalypt woodland. *Biogeosciences*, 17, 265–279. <https://doi.org/10.5194/bg-17-265-2020>.

Zhang, X., Estoque, R. C., Xie, H., Murayama, Y., Ranagalage, M., 2019. Bibliometric analysis of highly cited articles on ecosystem services. *PloS one*, 14, 2, e0210707. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210707>.

Zhong, S., Geng, Y., Liu, W., Gao, C., Chen, W., 2016. A bibliometric review on natural resource accounting during 1995–2014. *Journal of cleaner production*, 139, 122-132. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.039>.

Artigo 2: Efeito do espaçamento na eficiência do uso da luz em plantios de eucalipto em um gradiente climático no Brasil.

RESUMO

O crescimento das árvores ocorre pela combinação entre a disponibilidade de recursos e o quanto as árvores são eficientes em utilizá-los na produtividade dos troncos. Entender sobre a eficiência do uso da luz (LUE) que é uma medida de relação entre o crescimento e a quantidade de luz absorvida pelas árvores (APAR) em plantações comerciais de eucalipto no Brasil torna-se necessário. Objetivou-se analisar a eficiência do uso da luz na produção de biomassa do fuste em plantios de *Eucalyptus* avaliando o efeito da área útil, material genético e clima. Foi analisada a biomassa do fuste de dois materiais genéticos (A1 e C3) em dois períodos, aos 3 anos e aos 6 anos, localizados em 4 sítios contrastantes no Brasil e submetidos a gradientes de espaçamento de plantio (entre 0,55 x 3 m e 6,85 x 3 m). A APAR foi estimada usando o modelo tridimensional MAESTRA parametrizado para cada árvore em cada parcela (110 árvores por parcela). E, para a quantificar a biomassa dos fustes das árvores individuais e o seu crescimento (WNPP) foi utilizado relações alométricas provenientes de amostragem destrutiva de biomassa nos locais de estudo. Os resultados em escala de parcelas mostraram que (1) a mortalidade variou entre os sítios estudados, e o sítio mais produtivo (sítio 22) apresentou os maiores percentuais de morte para ambos os materiais genéticos (o clone A1 com 8,18%; e clone C3 com 7,27% ambos aos 6 anos); (2) a competição entre as árvores foi intensificada com o tempo; (3) o sítio mais produtivo foi o mais eficiente em termos de LUE aos 3 anos, no entanto, aos 6 anos houve mudança na escolha do sítio (sítio 23) com maior média de LUE; (4) a média da LUE aumentou com a idade para ambos os genótipos (entre 0,41 e 1,03 na idade de 3 anos e 0,62 e 1,91 g MJ⁻¹ aos 6 anos para o clone A1; entre 0,27 e 1,41 na idade de 3 anos e 0,25 e 1,64 g MJ⁻¹ aos 6 anos para o clone C3). Portanto, a LUE no processo de conversão da APAR em biomassa do fuste é o tópico principal para diferenciar a produtividade de diferentes clones e a sua interação com ambientes que apresentam características climáticas distintas.

PALAVRAS-CHAVE: MAESTRA; Modelo baseado em processo; Gradiente de espaçamento; Intercepção de luz; Produtividade.

Spacing effect on light use efficiency of Eucalyptus plantations across a climatic gradient in Brazil

ABSTRACT

The growth of trees results from a combination of factors, which is the availability of resources and how efficient the trees are in using them in the productivity of the stems. Understanding light use efficiency (LUE), which is a measure of the relationship between growth and the amount of light absorbed by trees (APAR) in commercial eucalyptus plantations in Brazil becomes necessary. This study aimed to analyze the efficiency of light use in the production of stem biomass in Eucalyptus plantations, considering the effect of usable area, genetic material, and climate. We analyzed the stem biomass of two genetic materials (A1 and C3) at two time periods, at three and six years, located at four contrasting sites in Brazil, and subjected to planting spacing gradients (between 0.55 x 3 m and 6.85 x 3 m). The APAR was estimated using the three-dimensional MAESTRA model parameterized for each tree in each plot (110 trees per plot). And allometric relationships from destructive biomass sampling at the study sites were used to quantify individual tree stem biomass and growth (WNPP). The plot-scale results showed that (1) mortality varied among the sites studied, and the most productive site (site 22) showed the highest percentages of death for both genetic materials (clone A1 with 8.18%; and clone C3 with 7.27% both at six years); (2) competition among trees was intensified with time; (3) the most productive site was the most efficient in terms of LUE at three years, however, at six years, there was a change in the choice of site (site 23) with higher average LUE; (4) the mean LUE increased with age for both genotypes (between 0.41 and 1.03 at age three years and 0.62 and 1.91 g MJ⁻¹ at age six years for clone A1; between 0.27 and 1.41 at age three years and 0.25 and 1.64 g MJ⁻¹ at age six years for clone C3). Therefore, the LUE in the process of conversion of APAR into stem biomass is the main area to differentiate the productivity of different clones and their interaction with environments that present distinct edaphoclimatic characteristics.

KEYWORDS: MAESTRA; Process-based model; Spacing gradient; Light interception; Productivity.

1 INTRODUÇÃO

A escolha do espaçamento inicial de plantio das árvores reflete na quantidade de recursos disponíveis para que as árvores cresçam e sobrevivam. O aumento do espaço entre as linhas de plantios pode diminuir custos na hora do preparo do solo, porém, para compensar, há a redução do espaçamento dentro das linhas de plantios. Essa prática pode reduzir a interceptação da luz pelas árvores, ocasionando assim rápida estratificação do povoamento, em árvores dominantes e suprimidas, aumentando a matocompetição e a intensificação dos danos nas árvores causadas pela ação do vento (STAPE; SILVA; BINKLEY, 2022).

É crescente o interesse em entender os processos do crescimento das árvores submetidas a diferentes espaçamentos de plantios, assim como as suas respostas em termos de produtividade (SCHWERZ et al., 2019). Pois, o espaçamento de plantio das árvores é um fator preponderante do ponto de vista silvicultural, tecnológico e econômico, capaz de influenciar diretamente as taxas de crescimento, idade de corte, qualidade da madeira, condução das práticas silviculturais e os custos de produção (CARON et al., 2015).

A escolha adequada do espaçamento de plantio das árvores varia de acordo com as características e limitações que o ambiente apresenta. No Brasil é comum utilizar espaçamento de 3,0 x 2,0 - 1,5 m (totalizando entre 1600–2200 árvores ha⁻¹) em locais de baixo déficit hídrico, e 3,0 x 4,0 - 3,0 m em ambientes mais secos (800-1100 árvores ha⁻¹) (GONÇALVES et al., 2013). Espaçamentos mais amplos é, portanto, mais comum em locais que apresentam limitação de fatores essenciais ao crescimento das árvores, que podem ocasionar a competição por esses recursos (CRAINE; DYBZINSKI, 2013; GONÇALVES et al., 2004).

Em espaçamentos mais adensados, as árvores apresentam o desenvolvimento em área foliar e fechamento do dossel de forma mais eficiente, com maior captação de luz e produção de fotossíntese, reduzindo, assim, a matocompetição e problemas com erosão dos solos (HAKAMADA et al., 2020a, 2020b; RODRIGUES; SILVA; NOUVELLON, 2021). O maior número de árvores por área ocasiona a diminuição do diâmetro das árvores, no entanto, possibilita obter maior biomassa por hectare de plantio (RIBEIRO et al., 2017; ELOY et al., 2018; SCHWERZ et al., 2019).

Aliado a escolha do espaçamento de plantio, a seleção de materiais genéticos adaptados ao local que serão inseridos também é importante. Materiais genéticos

diferentes podem apresentar respostas distintas ao espaçamento, devido a variação da estrutura de copa, fisiologia, na forma que as árvores obtêm os recursos no solo e os padrões de alocação de carbono (CAMPOE et al., 2020; LITTON; RAICH; RYAN, 2007).

O crescimento e produtividade das árvores podem ser maximizados com uso de técnicas que favoreçam a incidência da radiação solar no dossel florestal e a eficiência das árvores ao utilizar a luz (LUE) através do uso adequado do espaçamento entre árvores (SCHWERZ et al., 2019). A radiação solar é um dos principais recursos envolvidos no processo fotossintético das árvores, e o espaçamento é um modificador da dinâmica de absorção da radiação solar dentro dos povoamentos florestais. No entanto, a atenção dada a eficiência do uso da luz, crescimento e a produtividade das árvores ainda é pequena, necessitando assim de pesquisas voltadas ao entendimento dessa dinâmica (PRETZSCH e BIBER, 2016).

A LUE é uma medida de produtividade das árvores por unidade de radiação (luz) interceptada (LANDSBERG; SANDS, 2011). E pode ser calculada por meio da combinação entre duas variáveis que é a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) e, a biomassa produzida (e.g. biomassa aérea de madeira ou total) (CHARBONNIER et al., 2017). Neste caso, a biomassa aérea de madeira ou total pode ser obtida por meio da cubagem rigorosa das árvores e/ou com o uso de modelos, que são atividades já consolidadas e desenvolvidas dentro dos inventários dos plantios florestais (GONZALEZ-BENECKE et al., 2021; OUNBAN; PUANGCHIT; DILOKSUMPUN, 2016; PEZZOPANE et al., 2021; SCOLFORO et al., 2018). Estudos que correlacionam a LUE e o crescimento das árvores já têm sido realizados para entender como as árvores respondem a diferentes tratamentos silviculturais, mudanças no clima e de localização (ALBAUGH et al., 2016; SILVA et al., 2016; MATTOS et al., 2020; HAKAMADA et al., 2022).

Já a APAR é uma variável de difícil aquisição em campo, por isso, busca-se simplificar a forma de obter essa informação, por meio do uso de modelos baseados em processos (MBP), como o MAESTRA (MEDLYN, 2004), que se destaca entre os demais MBP por considerar a árvore na sua forma individual e tridimensionalmente. O uso do modelo MAESTRA permite que os pesquisadores tenham acesso a uma ferramenta valiosa para analisar como as árvores podem responder a diferentes tratamentos, mudanças climáticas e de localização (ALBAUGH et al., 2016).

De posse dessa informação, é possível então correlacionar o crescimento das árvores com a LUE. Pois, a maior eficiência poderá estar relacionada com a maior produção de biomassa total ou com a maior partição de biomassa para os fustes das árvores (CAMPOE et al., 2013b, 2013a).

Pesquisas publicadas sobre povoamentos de *Eucalyptus* têm abordado a relação entre o crescimento das árvores e a LUE, com o uso do modelo MAESTRA. A exemplo, Campoe et al., (2013b) que caracterizaram os padrões de uso individual de luz e da LUE em um povoamento de *Eucalyptus grandis* localizados ao longo de um gradiente de produtividade no estado de São Paulo, e observaram que o crescimento das árvores e a LUE diferiu entre as duas classes de tamanho (20% maiores e dominantes e 20% menores e não dominantes) das árvores analisadas.

Ainda existem lacunas a serem pesquisadas dentro dessa temática, como investigar quais são as possíveis interações entre o crescimento de diferentes genótipos de *Eucalyptus* com a absorção de luz e LUE, levando em consideração fatores como o gradiente climático que o Brasil apresenta, e diferentes áreas úteis disponíveis por árvores. Assim, foi objetivo dessa pesquisa analisar a eficiência do uso da luz na produção de biomassa do fuste em plantios de *Eucalyptus* avaliando o efeito da área útil, material genético e clima.

2 MATERIAL E MÉTODOS

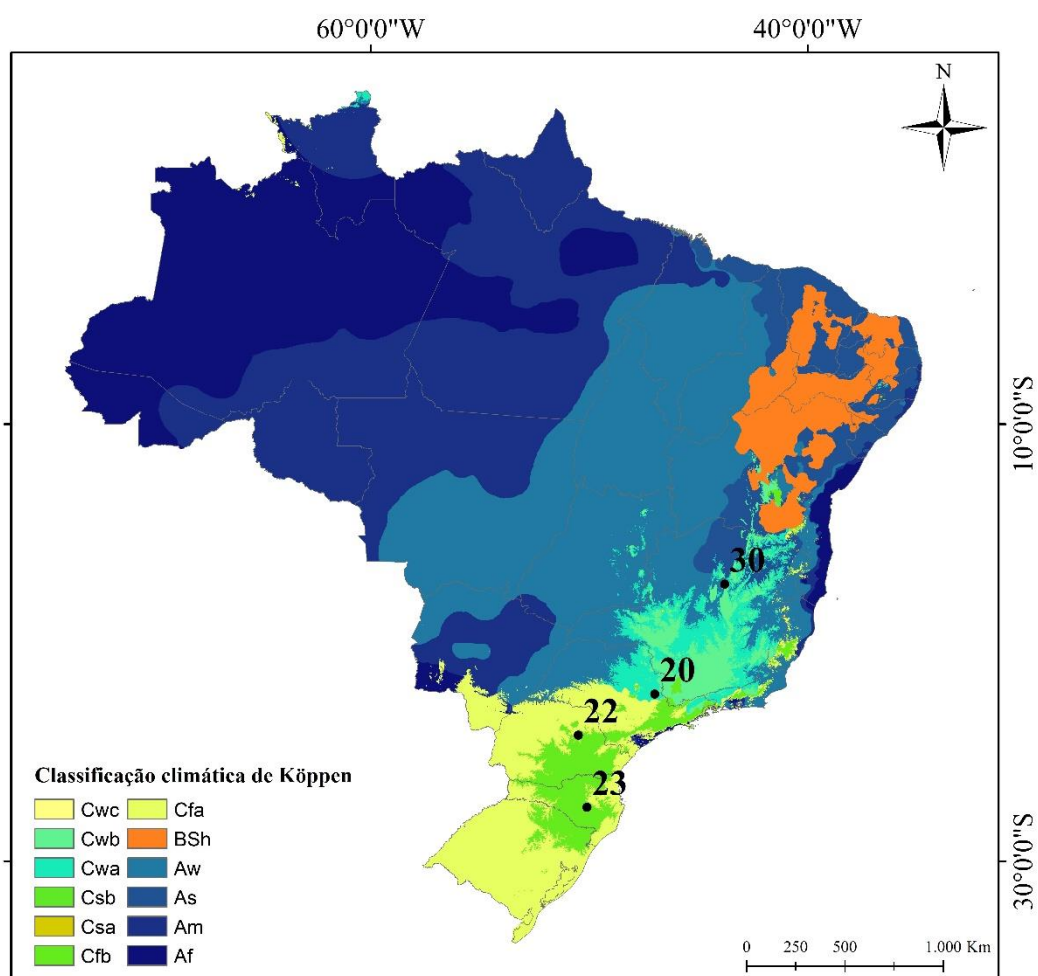
2.1 Locais de estudo

Os dados utilizados para desenvolver essa pesquisa são provenientes do Programa Cooperativo TECHS (Tolerância de *Eucalyptus* Clonais ao Estresse Hídrico, Térmico e Bióticos, <https://www.ipef.br/techs/>). Este projeto buscou avaliar como fatores relacionados aos estresses hídrico, térmico e biótico em conjunto com o espaçamento e genética poderiam influenciar os processos de crescimento e a sobrevivência de árvores individuais e/ou de povoamentos de eucalipto (BINKLEY et al., 2017).

Foram selecionados 4 sítios, os sítios 20, 22, 23 e 30 (Figura 1), e duas parcelas em cada um dos sítios, nos quais, foram plantados dois genótipos diferentes de *Eucalyptus* (A1 e C3). A escolha desses sítios coincide com as regiões do Brasil que apresentam grandes extensões de plantios florestais com o gênero *Eucalyptus*. Os dois genótipos clonais analisados, o clone A1 (*E. urophylla*, clima de origem Cwa) e C3 (*E.*

grandis × *E. camaldulensis*, clima de origem As), são amplamente plantados no Brasil, pois, são adaptáveis em ambientes secos (GONÇALVES et al., 2013), e devido a tal característica são intitulados como clones plásticos.

Figura 1 - Localização e classificação climática dos 4 sítios do experimento de espaçamento do TECHS.



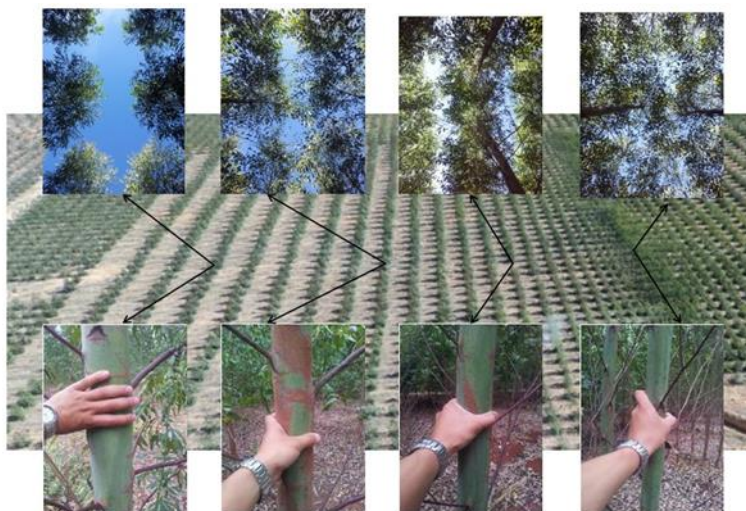
Fonte: Adaptado de Alvares et al., (2013). C - Zona subtropical húmida: Cwc: com o inverno seco, verão curto e fresco; Cwb: com o inverno seco e verão temperado; Cwa: com o inverno seco e verão quente; Csb: com o verão seco e temperado; Csa: com o verão seco e quente; Cfb: com o verão temperado; Cfa: com o verão quente. BSh: Zona seca, semiárida, com baixa latitude e altitude. A - Zona tropical: Aw: com inverno seco; As: com o verão seco; Am: de monção; Af: úmida.

2.2 Design experimental

O delineamento do experimento de espaçamento do TECHS é do tipo sistemático, similar ao proposto por Nelder (1962), com valor fixo entre as linhas (3 metros) e variável dentro das linhas (entre 0,25 m e 7,15 m, ou ~13.000 árvores ha⁻¹ a

~ 450 árvores ha⁻¹) (HAKAMADA et al., 2020b). Cada parcela foi formada por 7 linhas com 27 árvores plantadas (total de 189 árvores por parcela) (Figura 2).

Figura 2 - Plantio de *Eucalyptus* para o teste de espaçamento do TECHS.



As parcelas experimentais foram implantadas entre dezembro de 2011 e maio de 2012 nos diferentes sítios do TECHS. Em relação as práticas silviculturais executadas dentro dos sítios, foi realizada a padronização dos tratamentos silviculturais, do preparo do solo e do controle de matocompetição. Com a homogeneização entre os locais e o isolamento dos fatores climáticos foi possível captar a influência dos mesmos sobre o crescimento e absorção de luz pelas árvores. Mais detalhes sobre a caracterização dos sítios florestais que compõem a rede experimental do programa TECHS podem ser encontradas em Binkley et al. (2017).

2.3 Absorção da radiação e eficiência do uso da luz na escala da árvore

A análise dos dados de espaçamento foi realizada durante dois períodos: aos 3 anos e aos 6 anos. O período de 6 anos foi escolhido por ser o padrão de rotação utilizado pelas empresas em seus plantios comerciais com eucalipto no Brasil.

O incremento corrente anual (WNPP) em biomassa do fuste para as idades de 3 e 6 anos foi calculado por meio do uso das equações ajustadas por Mattos et al. (2020) específicas por material genético (Tabela 1). O valor do WNPP em biomassa do fuste fornece a informação de quanto à floresta cresceu em um ano (nesse caso, entre 2 e 3 anos e entre 5 e 6 anos).

Para a parametrização do modelo MAESTRA, o primeiro passo foi escolher quais árvores seriam utilizadas durante esse processo. Definiu-se que as 110 árvores centrais de cada uma das parcelas seriam utilizadas, excluindo 79 árvores de borda para evitar os problemas do sombreamento entre as árvores na absorção da radiação ao longo do período de estudo.

As árvores dentro de cada uma das parcelas foram inventariadas semestralmente quanto ao diâmetro a 1,30 m do solo (dap, diâmetro a altura do peito), altura total da árvore (ht) e comprimento de copa (cc). Entretanto, a estimativa de área foliar ($\text{m}^2 \text{árvore}^{-1}$) e os raios das copas das árvores nas posições x e y (m) foram feitas a partir de equações alométricas (Tabela 1).

Os dados utilizados para o ajuste das equações de área foliar, raios de copa na posição x e y e da biomassa do fuste das árvores (com medições aos 3 e 6 anos) foram provenientes de amostragem destrutiva realizadas dentro do experimento clonal do TECHS, sendo este conduzido em paralelo ao teste de espaçamento, contemplando os mesmos sítios e materiais genéticos. Mattos et al. (2020) apresentam todos os detalhes metodológicos da amostragem destrutiva para a obtenção desses dados.

Tabela 1 - Modelos utilizados para obtenção das variáveis estruturais das copas. Todos os modelos apresentaram significância $<0,05$.

Variável	Clone	Modelo	R ²	Erro
Área foliar (m ² árvore ⁻¹)	A1 e	$AF = -16,97 + 5,17 \text{dap} - 0,63I$	0,75	5,35
	C3			
Raio da copa paralelo à linha (m)	A1	$Rpa = 1,81 + 0,0001 \text{dap}^2 \text{ht} - 0,02I$	0,54	0,28
	C3			
Raio da copa paralelo à linha (m)	A1	$Rpa = 0,67 + 0,08 \text{dap} - 0,01I$	0,50	0,22
	C3			
Raio da copa perpendicular à linha (m)	A1	$Rpe = 1,80 + 0,0001 \text{dap}^2 \text{ht} - 0,017I$	0,41	0,29
	C3			
Raio da copa perpendicular à linha (m)	A1	$Rpe = 0,77 + 0,08 \text{dap} - 0,01I$	0,55	0,20
	C3			
Biomassa (kg)	A1	$\text{Ln}(B) = -5,12 + 2,11 \text{ln}(\text{dap}) - 1,650 \text{ht}$	0,96	14,26
Biomassa (kg)	C3	$\text{Ln}(B) = -4,35 + 1,90 \text{ln}(\text{dap}) - 1,11 \text{ht}$	0,97	14,18

Em que dap é o diâmetro localizado a 1,30 m do solo; I refere-se à idade das árvores (em meses); ht é a altura total da árvore (m); AF é a área foliar das árvores (m²); Rpa é o raio da copa paralelo à linha (m); Rpe é o raio da copa perpendicular à linha (m); B equivale a biomassa do fuste (kg) das árvores e Ln é o logaritmo natural.

A Tabela 2 apresenta o resumo das características biométricas dos dados em relação a cada um dos sítios e clones das parcelas experimentais.

Tabela 2 - Resumo descritivo dos dados em relação a cada um dos sítios e clones.

Sitio	Clone	Idade (anos)				AF	Biomassa		
			dap méd	ht méd	cc méd	méd	méd	Rpa	Rpe
20	A1	3	14,18	18,81	6,74	32,57	58,60	1,58	1,17
		6	18,04	27,83	4,58	25,63	138,16	1,54	0,64
	C3	3	12,18	17,75	6,64	25,80	40,89	1,30	1,33

		6	14,56	24,32	3,81	20,31	84,42	1,15	1,14
22	A1	3	15,09	19,52	6,25	33,86	66,89	1,63	1,17
		6	18,15	29,62	5,54	27,69	145,99	1,63	1,65
	C3	3	16,31	19,15	6,83	39,09	74,07	1,63	1,65
		6	20,72	27,76	4,37	35,18	161,44	1,65	1,62
23	A1	3	12,77	13,28	5,27	24,95	30,45	1,35	1,14
		6	16,39	22,01	1,09	20,99	89,14	1,19	0,64
	C3	3	11,86	11,19	3,67	23,28	21,84	1,25	1,28
		6	14,33	18,33	1,46	19,47	57,75	1,13	1,13
30	A1	3	12,64	18,27	10,10	23,60	44,83	1,36	1,07
		6	14,66	21,77	7,40	19,47	72,88	1,12	0,70
	C3	3	11,51	16,64	7,19	20,03	32,85	1,18	1,21
		6	12,42	19,97	5,07	12,95	47,16	1,01	1,01

Em que $cc_{méd}$ é o comprimento de copa (m) médio das árvores e as demais siglas já foram definidas anteriormente.

Para a caracterização do formato da copa das árvores de *Eucalyptus* foi considerado o tipo elipsoidal (CAMPBELL; NORMAN, 1998) e os ângulos de inclinação das folhas utilizados foram de 40° para o clone A1 e 65° para o clone C3 (MATTOS et al., 2020).

Os dados de reflectância das folhas e da superfície do solo, e transmitância das folhas do dossel no comprimento de onda da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), foram obtidos via imagens de satélite MODIS e de sensores espalhados em campo em plantações de eucalipto. Para a refletância e transmitância das folhas utilizou-se 0,048 e 0,034, respectivamente, e para a refletância do solo utilizou-se 0,067 no comprimento de ondas PAR (CAMPOE et al., 2013b).

A base de informações climáticas foi obtida de estações meteorológicas localizadas in situ, e na ausência dessas, foram utilizadas as informações coletadas em estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET (www.inmet.gov.br) localizadas próximas aos municípios onde os sítios do TECHS foram instalados, durante todo o período de rotação silvicultural dos sítios. Caso houvesse falhas, foram utilizadas outras bases meteorológicas de acordo com a metodologia de preenchimento de falhas descritas por Elli et al. (2019).

Para a caracterização climática das condições ambientais dos sítios (Tabela 3), foi feito o cálculo do déficit hídrico do solo (DEF, mm ano^{-1}), por meio do balanço hídrico climatológico sequencial, em escala mensal, com base no método de Thornthwaite e Mather (CAMARGO, 1962), e depois, o somatório para obtenção do valor anual. A T_m (temperatura média) para os períodos de análise (entre o 2º e 3º ano, e entre o 5º e 6º ano) foi obtida por meio de média aritmética das temperaturas médias mensais. Já a precipitação média, foi feita a soma da precipitação acumulada em cada mês, divididas pelo período de tempo de análise de cada sítio do TECHS.

A parametrização do modelo MAESTRA foi realizada com base em seis variáveis meteorológicas, em escala diária, obtidas também do INMET sendo elas a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa (%), precipitação (PPT, mm), radiação fotossinteticamente ativa incidente diária (PAR, $\text{MJ m}^2 \text{ d}^{-1}$), temperatura mínima e máxima ($^{\circ}\text{C}$). Os dados da PAR foram calculados para cada sítio aos 3 e 6 anos, mediante a conversão da radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) multiplicando por um fator de conversão. Gonzáles e Calbó (2002) citam que o fator de conversão depende da proporção de radiação global incidente na PAR e da eficiência quântica desta banda. O valor adotado foi 0,5 de acordo com Landsberg e Sands (2011).

A definição do posicionamento das árvores dentro das parcelas foi baseada no espaçamento de plantio das árvores (entre 0,25 m e 7,15 m dentro das linhas e 3 m entre linhas, conforme exemplificado na Figura 2).

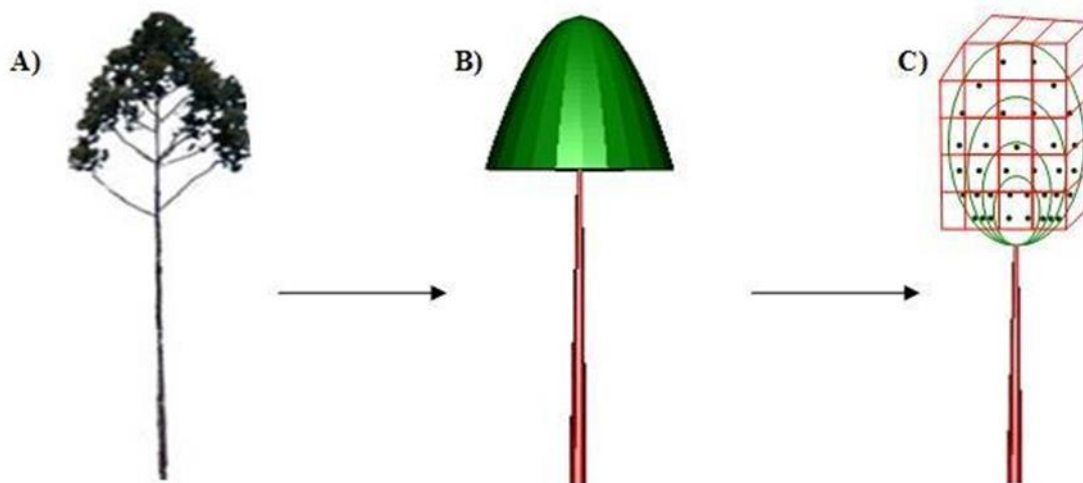
Tabela 3 - Caracterização dos sítios florestais do TECHS.

Sítio	Idade (anos)	Lat (°)	Long (°)	Altitude (m)	Cidade/Estado	Clima	Tm (°C)	DEF (mm ano⁻¹)	PPT (mm ano⁻¹)
20	3	-22,35	-47	633	Mogi Guaçu-SP	Cwa	22,54	-422,16	1460,8
	6						21,97	-419,80	1204,6
22	3	-24,23	-50,5	888	Telêmaco Borba- PR	Cfb	19,45	-156,88	1623,6
	6						19,38	-161,81	1739,6
23	3	-27,53	-50,1	870	Otacílio Costa-SC	Cfb	16,61	-4,95	2121,8
	6						16,86	-101,88	1609,8
30	3	-17,32	-43,8	848	Bocaiúva-MG	Cwa	23,01	-1515,11	586,6
	6						21,45	-1568,34	797,2

Em que Lat representa a latitude, long a longitude, Tm a temperatura média, DEF é o déficit hídrico do solo e PPT é a precipitação. Os valores de Tm, DEF e PPT variam em função do tempo de referência de análise dos dados, para o período de um ano.

Finalizado os inputs necessários para a parametrização do modelo MAESTRA, com a caracterização completa dos dosséis das parcelas, o modelo calculou, em escala diária, a absorção da radiação para cada metro quadrado de folhas, por copa das árvores de forma individual (Figura 3), no comprimento de onda PAR ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), por meio da aplicação do submodelo com princípios metodológicos de Norman e Welles (1983).

Figura 3 - Representação de uma árvore de eucalipto via MAESTRA.



Em “A” é possível observar a forma como uma árvore de eucalipto é observada em campo; em “B” tem-se a representação da forma como a árvore é entendida pelo modelo MAESTRA, e representada pelo pacote Maeswrap do *software* R versão 4.2.1 (R Core Team 2022), já em “C” são representados os pontos de grade distribuídos pela copa das árvores.

A eficiência do uso da luz (LUE, g MJ^{-1}) foi calculada através da divisão do incremento de biomassa do caule de cada árvore alvo de cada parcela por um período de um ano (WNPP, $\text{kg árvore}^{-1} \text{ano}^{-1}$), pela radiação fotossinteticamente absorvida (APAR, $\text{GJ árvore}^{-1} \text{ano}^{-1}$), conforme a equação 1. O incremento de madeira é proveniente da diferença de biomassa nas idades de 2 e 3 anos, e entre as idades de 5 e 6 anos, para cada uma das i árvores.

$$\text{LUE}_{\text{Idade3,6}} = \frac{\text{WNPP}_i}{\text{APAR}_i} \quad (1)$$

A influência do tamanho do espaçamento de plantio das árvores foi avaliada agrupando três classes de espaçamentos, a categoria maior que apresentou a melhor resposta em relação a variável analisada (Biomassa, WNPP, APAR e LUE), categoria média que representa o valor médio em função da variável analisada (Biomassa, WNPP, APAR e LUE) e a categoria padrão que é o resultado para o espaçamento 2,95 x 3 m, que é o de uso comum nos plantios florestais do Brasil.

Os efeitos da época de análise (3 e 6 anos) sobre os padrões de produção de biomassa do fuste de acordo com a absorção da APAR e da LUE foi analisado graficamente ao longo do gradiente de espaçamento, por materiais genéticos, e para os diferentes sítios.

O processamento foi realizado utilizando o *software* R (R Core Team 2022). Os gráficos foram gerados usando o pacote *ggplot2* (WICKHAM, 2016). O pacote *metan* e a função *ge_plot* (OLIVOTO; LÚCIO, 2020) foram utilizados para realizar uma análise visual da relação dos clones em diferentes idades e localizados em ambientes contrastantes em relação à biomassa, WNPP, APAR e a LUE.

2.4 Índice de Gini

A abordagem de dominância do crescimento das árvores por parcela foi calculada por meio do uso de um único coeficiente, o coeficiente GINI (CERIANI; VERME, 2011). O pacote *Reat* e função *gini* do *software* R (R Core Team 2022) foram utilizados para calcular o índice de Gini e gerar as curvas de Lorenz (LORENZ, 1905), que expressam a relação entre a proporção de árvores em função da biomassa acumulada por elas.

Para calcular o índice de Gini é preciso que as árvores sejam classificadas em ordem crescente no valor da variável em análise, nesse caso, a biomassa do fuste. O Gini tem valor mínimo igual a zero, e isso quer dizer que não existe diferença entre a biomassa do caule das árvores (igualdade absoluta), e um máximo teórico próximo de 1 (LEXERØD; EID, 2006), se todas as árvores, com exceção de uma, apresentassem biomassa do fuste igual a zero (BINKLEY et al., 2006).

3 RESULTADOS

3.1 Padrão de resposta dos sítios e clones em função da interação entre a biomassa do fuste das árvores, WNPP, APAR e LUE aos 3 e 6 anos de idade

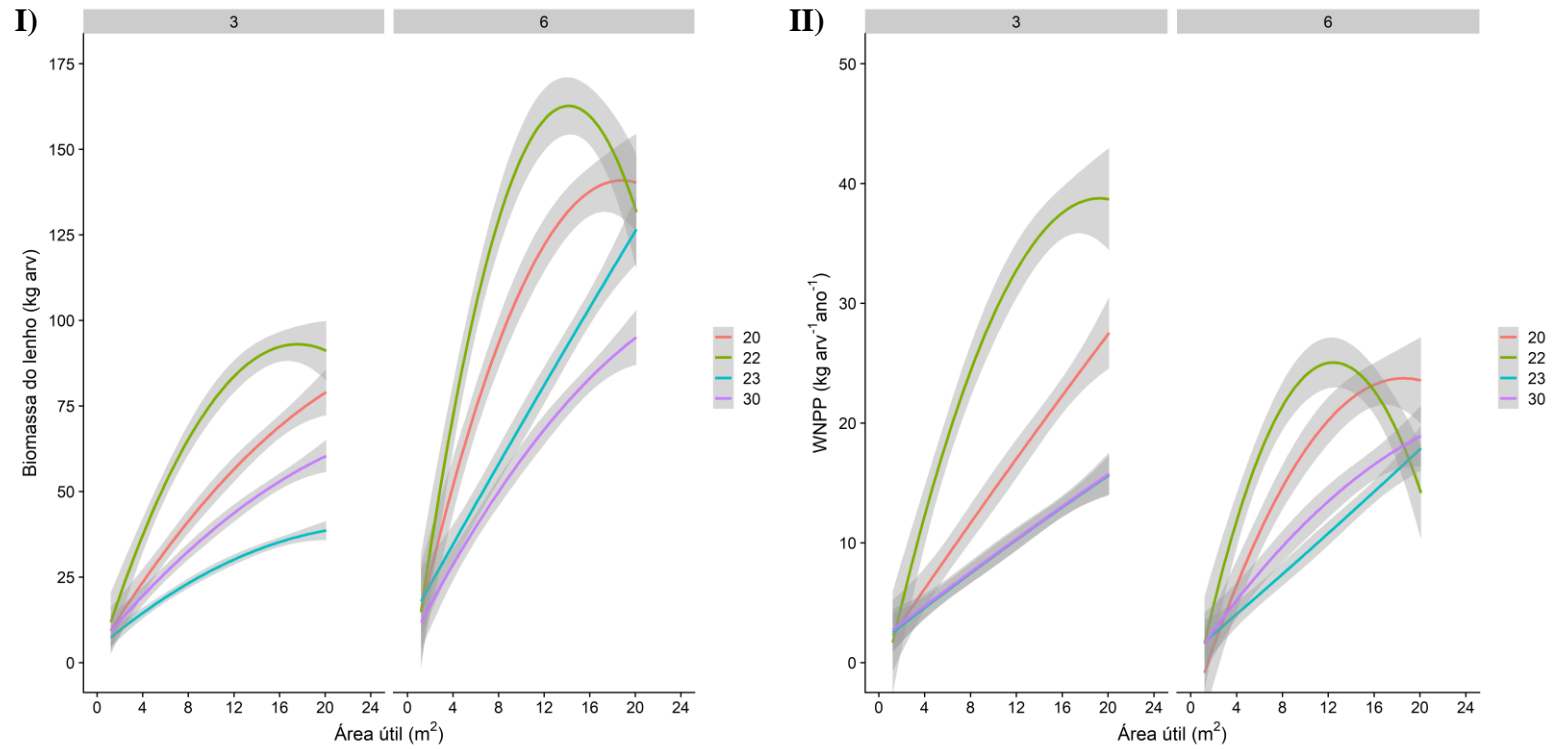
A análise de tendência dos padrões de distribuição dos dados foi realizada para observar se existe diferença na resposta entre sítios e clones em relação à área útil das árvores no acúmulo de biomassa do fuste, WNPP, APAR e LUE nas idades de 3 e 6 anos (Figuras 4 e 5).

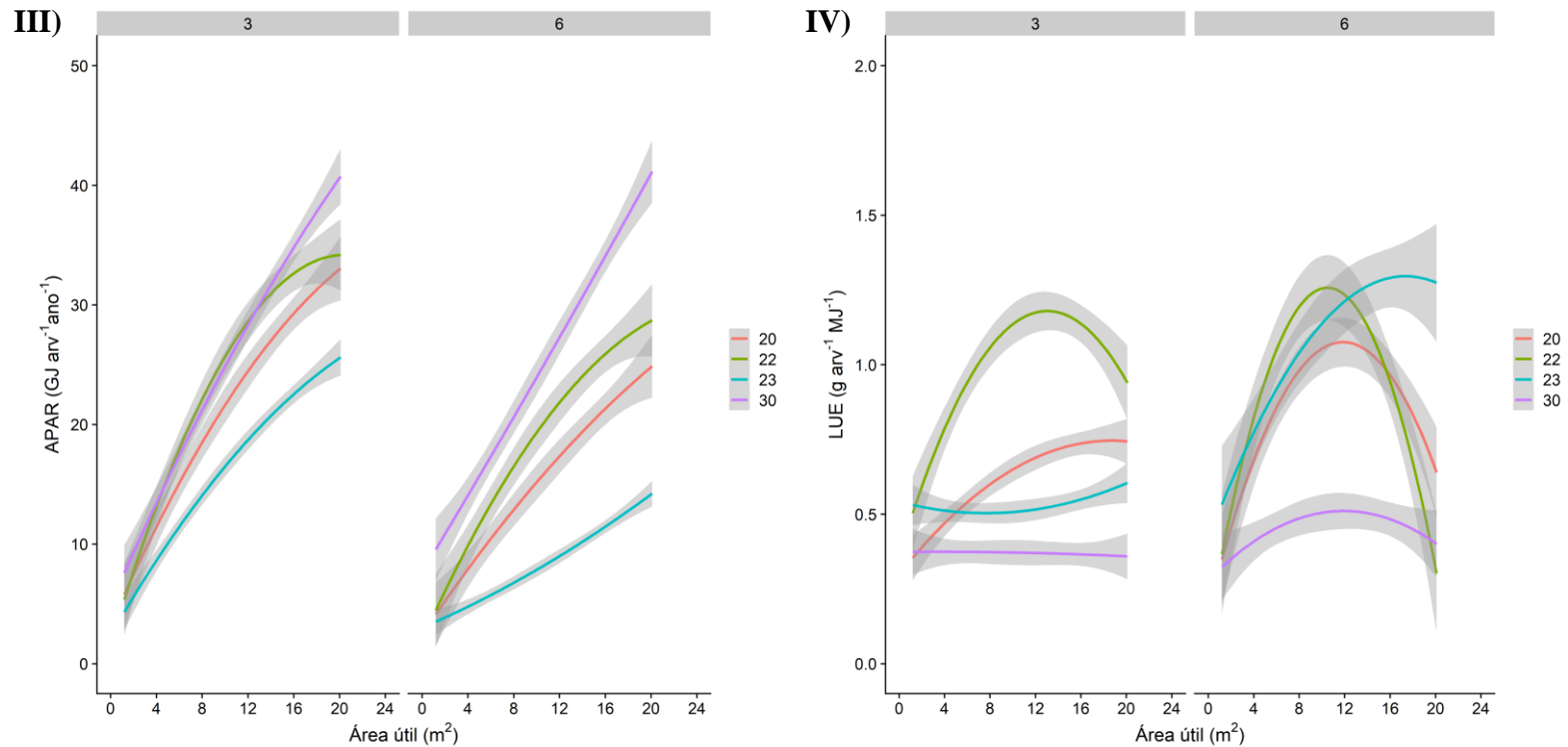
O sítio 22 e sítio 20 foram os locais com maior acúmulo de biomassa no fuste das árvores e de maior WNPP em função do aumento do gradiente de área útil, para ambos os períodos analisados. No entanto, para a área útil próxima aos 20 m² (em relação a biomassa) e 16 m² (WNPP) o comportamento dessas curvas mudam para o sítio 22, demonstrando um decréscimo no valor das variáveis nessas áreas. Além disso, a limitação pelo frio (sítio 23, clima Cfb) foi tão forte quanto a limitação pela seca (sítio 30, clima Cwa) em relação ao acúmulo da biomassa do lenho e o WNPP de ambos os materiais genéticos em estudo (Figura 4 em I e II).

O sítio 30 foi o que apresentou a melhor tendência para a APAR aos 3 e 6 anos, sendo este seguido pelos sítios 22, 20 e 23. A localização geográfica do sítio 30 provavelmente favoreceu a maior APAR, pois está localizado mais próximo ao equador comparativamente aos outros sítios. Assim como o sítio 23, mais ao Sul, com os menores valores de APAR (Figura 4 em III).

Os maiores valores da LUE aos 3 anos de idade em função da área útil disponível para o crescimento das árvores foram encontrados nos sítios 22 e 20. Entretanto, aos 6 anos, o padrão da LUE médio para os sítios 23, 22 e 20 em função das menores áreas úteis não apresentou grandes variações. Além disso, o padrão de eficiência que ocorreu aos 3 anos não foi mantido pelos sítios 22 e 20, pois, próximos da área útil de 12 m² os valores começaram a reduzir. A redução da tendência da LUE no sítio 22 iniciou na idade de 3 anos, e aos 6 essa tendência ficou mais acentuada. O sítio 30 foi o que apresentou a maior estabilidade quando analisada a variável LUE, com pouca diferença entre os períodos analisados (Figura 4 em IV). Com isso, a melhor tendência de crescimento da LUE em função do gradiente de área útil das árvores ocorreu para o sítio 23.

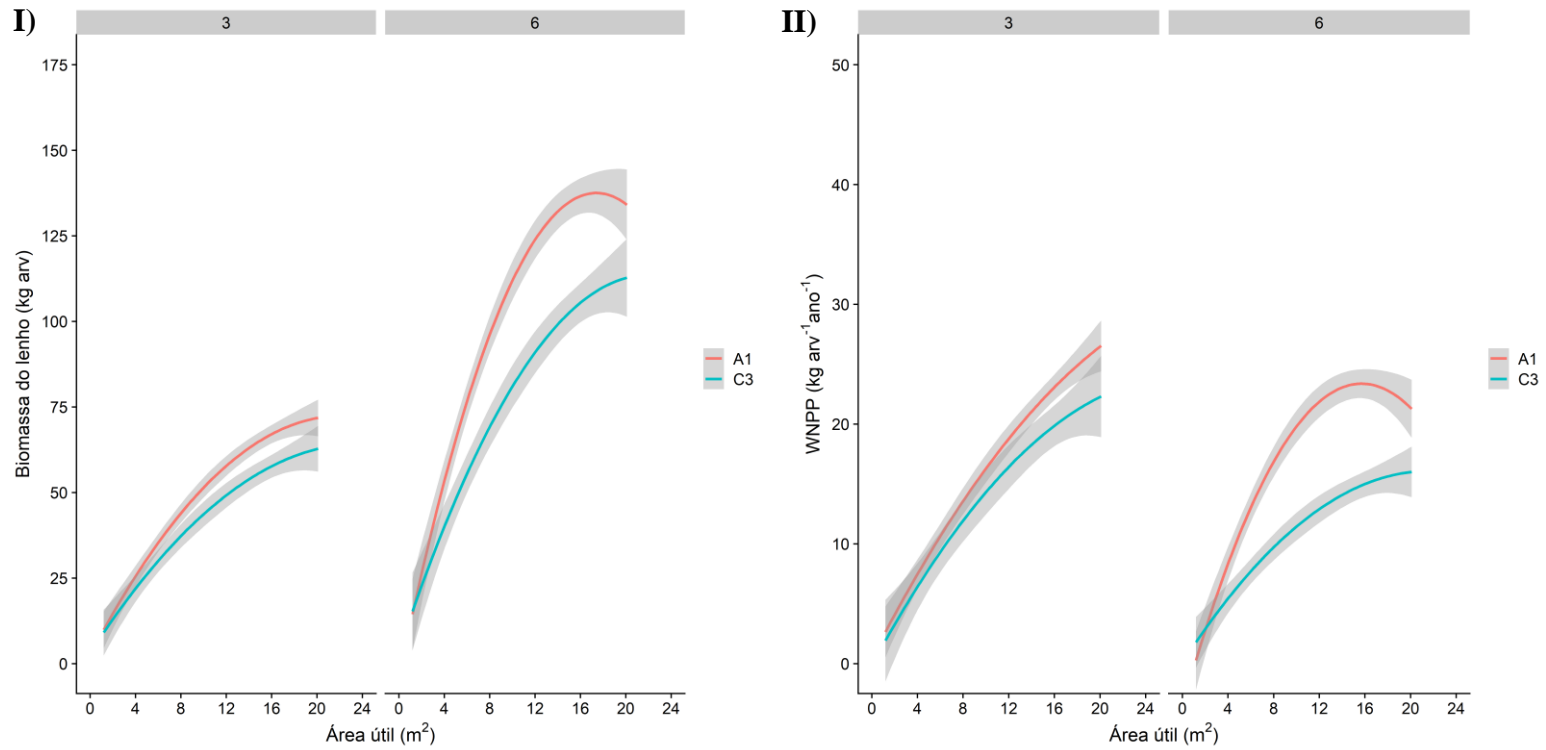
Figura 4 – Padrão médio de resposta dos sítios 20,22, 23 e 30 em função do gradiente de área útil das árvores e a biomassa do lenho, WNPP, APAR e LUE aos 3 e 6 anos.

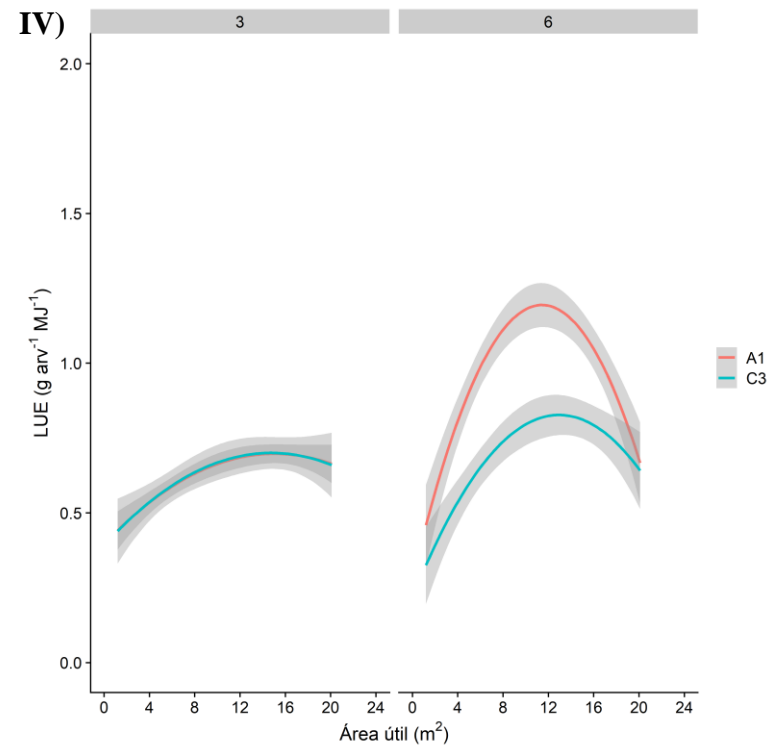
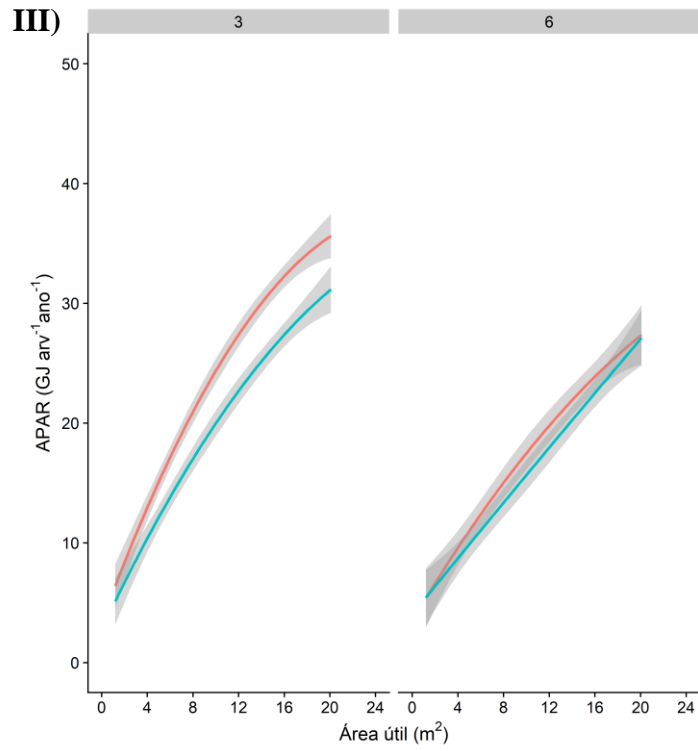




A resposta dos clones em função do gradiente de área útil das árvores e das variáveis biomassa do lenho, WNPP, APAR e LUE aos 3 e 6 anos foi distinta (Figura 5). De forma geral, o clone A1 apresentou as melhores tendências em relação ao clone C3 ao avaliar a biomassa do lenho, WNPP e APAR em ambos os períodos de análise (Figura 5 em I, II e III) e aos 6 anos em relação a LUE (Figura 5 em IV), em função da área útil. Aos 3 anos, não houve diferença entre as tendências dos clones A1 e C3 em função da LUE, no entanto, aos 6 anos o clone A1 foi o que apresentou as melhores respostas da LUE (Figura 5 em IV). Para o clone A1, a partir dos 12 m² na idade de 6 anos, a redução das linhas de tendências foi mais acentuada para a biomassa do lenho, WNPP e LUE (Figura 5 em I, II e IV).

Figura 5 - Padrão médio de resposta dos clones A1 e C3 em função do gradiente de área útil das árvores e a biomassa do lenho, WNPP, APAR e LUE aos 3 e 6 anos.

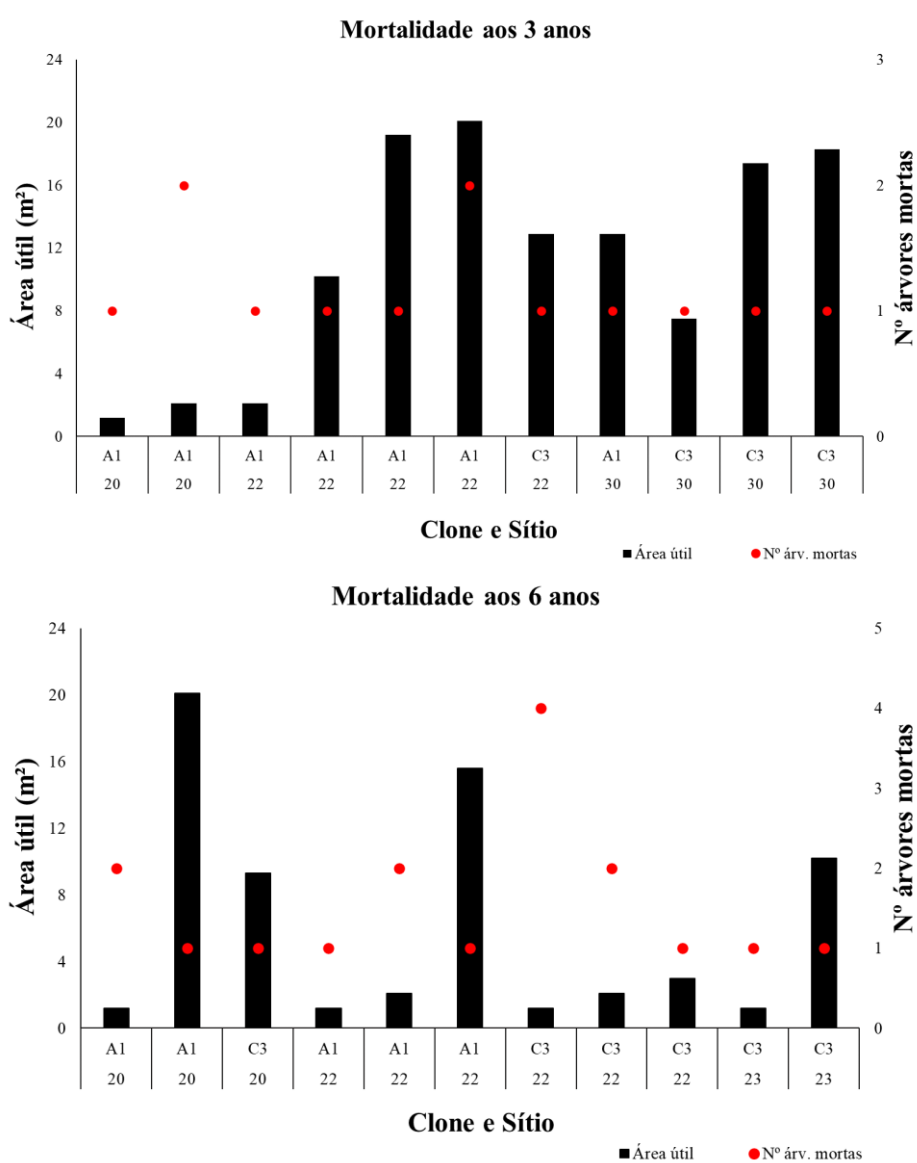




3.2 Sobrevivência das árvores

A mortalidade das árvores entre os sítios, clones e períodos de análise variaram em função do gradiente de espaçamento de plantio das árvores. De forma geral, a sobrevivência foi alta para ambos os materiais genéticos aos 3 e 6 anos, fornecendo parcelas aptas (Figura 6) para avaliar o efeito do gradiente de espaçamento, idade, sítio e material genético sobre a produtividade de biomassa do fuste das árvores e da LUE.

Figura 6 – Número de árvores mortas aos 3 e 6 anos nos sítios, áreas úteis e materiais genéticos em estudo, somente nos casos em que houve mortalidade.



A mortalidade das árvores não apresentou um padrão ou sequência fixa, sendo diferente para os genótipos, idade e locais, todavia alguns sítios foram mais afetados do que outros. O

maior número de árvores mortas na idade de 6 anos ocorreu no sítio 22 na parcela do clone C3, com 7 árvores mortas (4 árvores mortas no espaçamento 0,55 x 3m; 2 mortes no espaçamento 0,85 x 3 m; e 1 morte no espaçamento 1,15 x 3 m). Já o clone A1 aos 3 anos no sítio 22, apresentou um total de 5 árvores mortas (1 morte em cada um dos seguintes espaçamentos: 0,85 x 3 m; 3,55 x 3 m; 6,55 x 3 m; e 2 mortes no espaçamento 6,85 x 3 m). Com exceção do sítio 23, foi contabilizado a mortalidade das árvores nos demais sítios desde a primeira análise, aos 3 anos.

3.3 Competição dentro das parcelas

A competição entre as árvores é resultado da combinação de fatores como as características intrínsecas de crescimento, o espaçamento disponível para o desenvolvimento individual das árvores e a mortalidade das árvores dentro das parcelas. Para quantificar a competição dentro de cada uma das parcelas utilizadas nessa pesquisa foi realizado o cálculo do índice de Gini (Figura 7).

É possível observar que a intensidade de competição quantificada pelo índice de Gini variou entre os materiais genéticos, em relação ao tempo e ao sítio. O padrão esperado é que o índice Gini aumente de forma constante ao longo do tempo para todos os genótipos, porém, no sítio 20 (clone A1) e no sítio 22 (clone C3) houve maior intensidade de competição entre as árvores aos 3 anos. Nos demais sítios o padrão esperado de aumento do Gini em função do aumento da idade foi observado (Figura 7).

Avaliando a intensidade de competição entre clones, nos diferentes períodos e localidades, observou que o índice de Gini foi maior para o clone C3 ao longo de todo o período de análise, ou seja, árvores desse clone competem com maior intensidade entre si do que as árvores do clone A1. Esse comportamento não foi verificado no sítio 22 aos 6 anos, pois o clone A1 apresentou a maior competição (Figura 7).

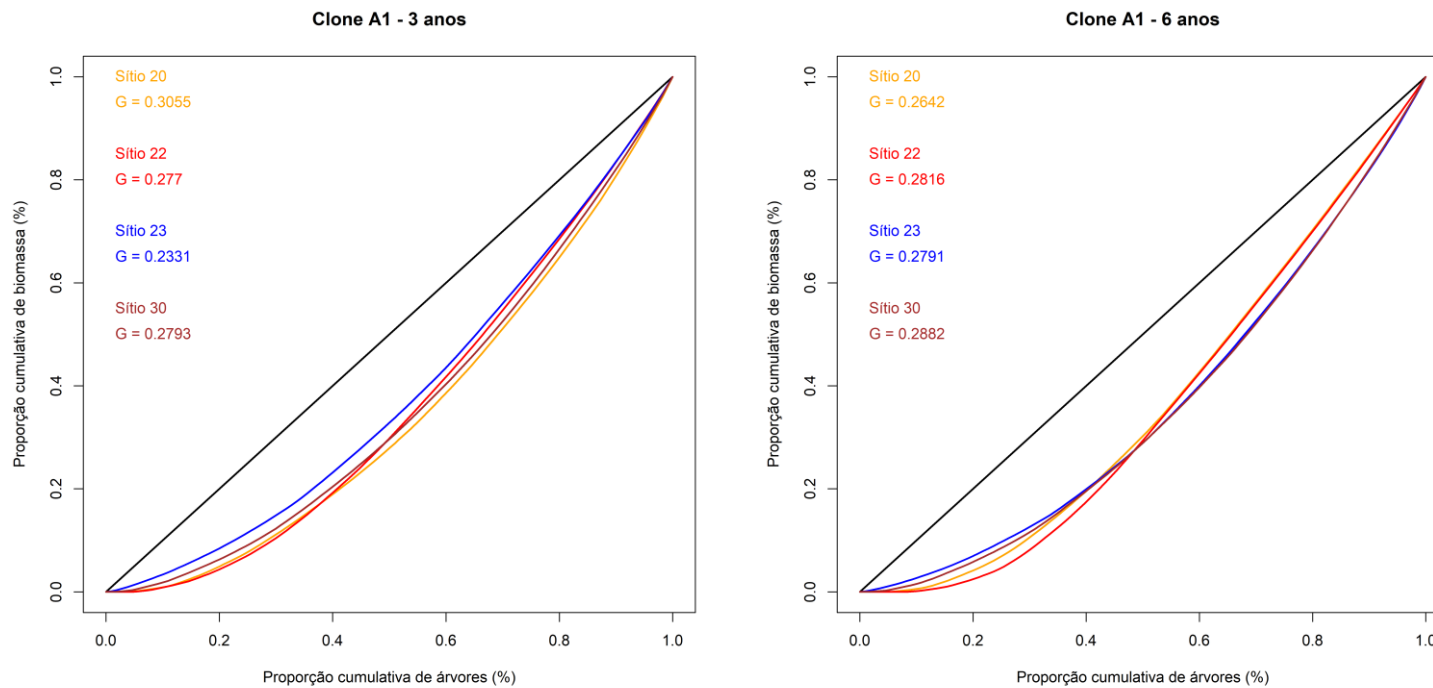
As curvas de Lorenz para os clones A1 e C3 localizados nos sítios 20, 22, 23 e 30 na idade de 3 e 6 anos são apresentadas na Figura 7. Quanto mais próxima da linha de perfeita igualdade (preta), mais igualitária é a distribuição de biomassa pelas árvores dentro das parcelas de plantio.

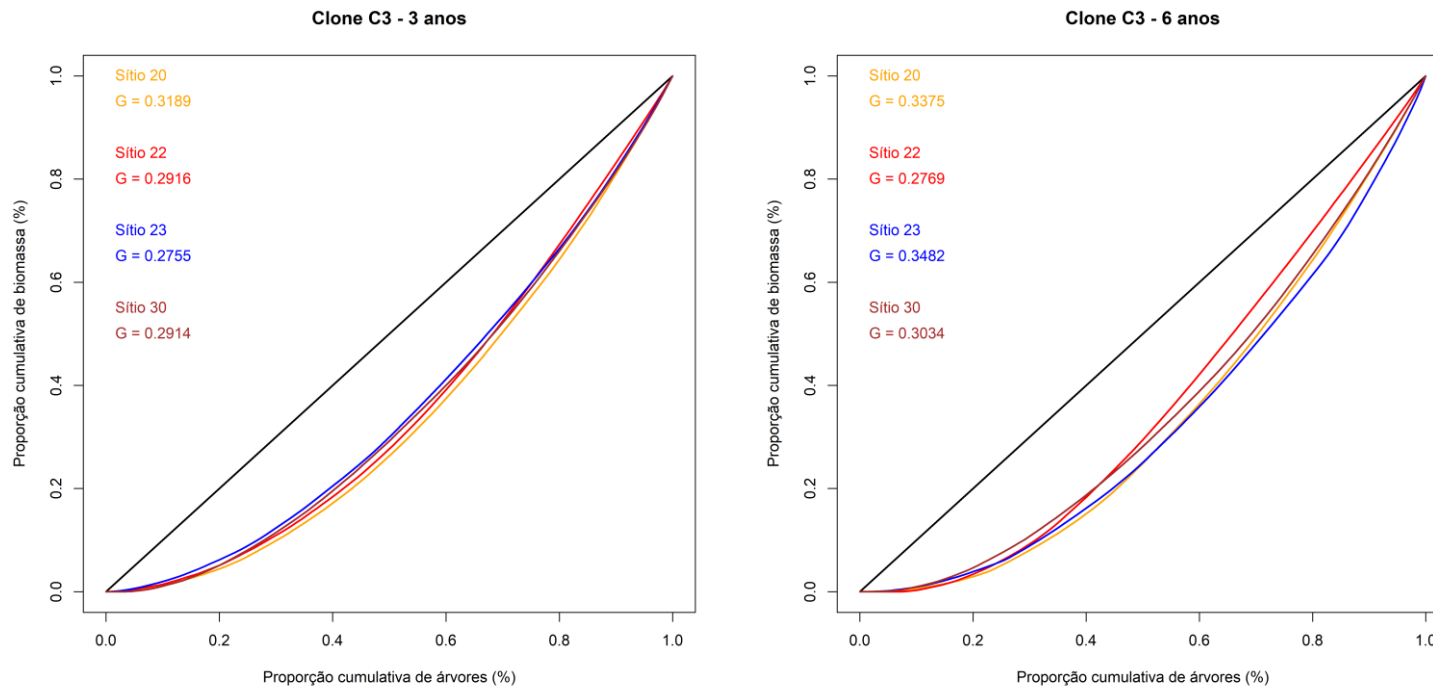
Para o clone A1, aos 3 anos, observou que o sítio 23 apresentou a melhor distribuição de biomassa entre as árvores, já que a curva de Lorenz (em azul) que representa esse sítio foi superior as demais durante toda a representação. Aos 6 anos de idade, para o mesmo clone, observou-se que as áreas entre as linhas de perfeita igualdade e as curvas geradas para os sítios

foram maiores do que no período de 3 anos de idade, ou seja, com o aumento da idade das árvores, ocorreu também maior desigualdade na distribuição de biomassa do fuste entre as árvores, fato que pode estar ligado a intensificação da competição entre árvores.

O clone C3, para ambos os sítios e períodos de análises, não apresentou superioridade na distribuição da biomassa do fuste das árvores entre os 4 sítios florestais, com isso, não houve nenhuma superioridade completa nas curvas de Lorenz plotadas, apenas em algumas seções de forma mais pontuais. Na idade de 3 anos a curva do sítio 23 foi levemente superior as demais, no entanto, aos 6 anos esse padrão mudou, no qual a curva referente ao sítio 22 apresentou destaque entre as demais.

Figura 7 - Curvas de Lorenz, representando a distribuição de crescimento cumulativo da biomassa do fuste em função do número de árvores cumulativo para os clones A1 e C3 localizados nos sítios 20, 22, 23 e 30, aos 3 e 6 anos.





Em que G significa índice de Gini.

3.4 Biomassa do caule das árvores por sítio e período de análise

Os valores médios por árvore da biomassa, WNPP e APAR e, o número de árvores (n) que compõem as parcelas estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Biomassa, WNPP e APAR média por árvore e o n de árvores das parcelas estudadas.

Sítio	Clone	Idade	BIO (kg árv.)	WNPP (kg árv. ano ⁻¹)	APAR (GJ árv. ano ⁻¹)	n
20	A1	3	58,6	19	26,0	107
20	A1	6	124,5	21,6	19,2	104
20	C3	3	40,9	11,7	17,6	110
20	C3	6	84,1	11,6	12,7	109
22	A1	3	66,9	23,4	25,8	105
22	A1	6	135,5	21,7	20,4	101
22	C3	3	74,1	31,1	24,0	109
22	C3	6	131,4	18,2	20,5	102
23	A1	3	30,4	12,3	18,9	110
23	A1	6	89,1	11	7,5	110
23	C3	3	21,8	6,1	13,9	110
23	C3	6	57,7	8,6	9,6	108
30	A1	3	44,8	11,6	26,6	109
30	A1	6	72,9	16,7	26,1	109
30	C3	3	32,9	7,3	25,0	107
30	C3	6	47,2	6,7	25,1	107

Em que n se refere ao número de árvores vivas na parcela.

Em relação ao sítio 22, observou-se a maior biomassa média por árvore e WNPP médio para os clones A1 e C3 para ambos os períodos de análise. Aos 3 anos, os clones A1 e C3 localizados no sítio 23 e aos 6 anos quando localizados no sítio 30 apresentaram o menor valor de biomassa. O menor WNPP médio para o clone A1 com 3 anos ocorreu no sítio 30 e aos 6 anos, no sítio 23. Já o clone C3 apresentou os menores valores de WNPP médio aos 3 anos quando plantadas no sítio 23 e aos 6 anos quando plantadas no sítio 30. Os menores valores de APAR aos 3 e 6 anos para os clones A1 e C3 ocorreram no sítio 23, e os maiores valores de APAR aconteceram no sítio 30.

O clone A1 foi o mais produtivo em relação à biomassa média do fuste em praticamente todos os sítios e idades (Tabela 4), exceto no sítio 22, em que aos 3 anos apresentou produtividade média levemente inferior ao clone C3. Em relação ao sítio 22, em ambos os momentos avaliados, a produtividade média de biomassa do caule e WNPP médio das árvores foram superiores aos dos demais sítios, caracterizando-o como o sítio mais produtivo.

3.5 Comportamento da biomassa do fuste, do incremento em biomassa, e da APAR em função do gradiente de área útil

Na Tabela 5 é apresentado um resumo das áreas úteis de plantio que apresentaram a maior representação percentual (categoria maior) e a representação percentual média (categoria média) da biomassa do fuste das árvores acumulada nas parcelas dos clones A1 e C3. E, como comparativo, foi adicionado a categoria padrão, que se refere ao percentual de biomassa do fuste proveniente do gradiente de área útil padrão que é amplamente utilizado nas florestas de eucalipto no Brasil. Esse tipo de análise possibilita entender como a área útil de plantio das árvores pode influenciar na produtividade de biomassa do fuste das árvores.

Tabela 5 - Representação da biomassa do fuste produzida em função do gradiente de área útil de plantio dos clones A1 e C3.

Sítio, Clone e Idade	Categoria	Área útil (m²)	% de Biomassa	n
20, A1 e 3	Padrão	8,4	3,81	5
	Média	10,2	4,38	5
	Maior	18,3	7,66	5
20, A1 e 6	Padrão	8,4	4,58	5
	Média	10,2	5,11	5
	Maior	17,4	6,61	5
20, C3 e 3	Padrão	8,4	3,66	5
	Média	10,2	4,72	5
	Maior	18,3	7,18	5
20, C3 e 6	Padrão	8,4	3,92	5
	Média	10,2	5,04	5
	Maior	15,6	7,09	5
22, A1 e 3	Padrão	8,4	4,79	5
	Média	9,3	4,74	5
	Maior	17,4	6,86	5
22, A1 e 6	Padrão	8,4	5,22	5
	Média	9,3	5,1	5
	Maior	18,3	6,69	5
22, C3 e 3	Padrão e Média	8,4	4,43	5
	Maior	17,4	6,86	5
22, C3 e 6	Padrão	8,4	5,75	5
	Média	16,5	5,12	5
	Maior	18,3	6,69	5
23, A1 e 3	Padrão	8,4	4,25	5
	Média	17,4	4,78	5
	Maior	20,1	6,66	5
23, A1 e 6	Padrão	8,4	3,85	5

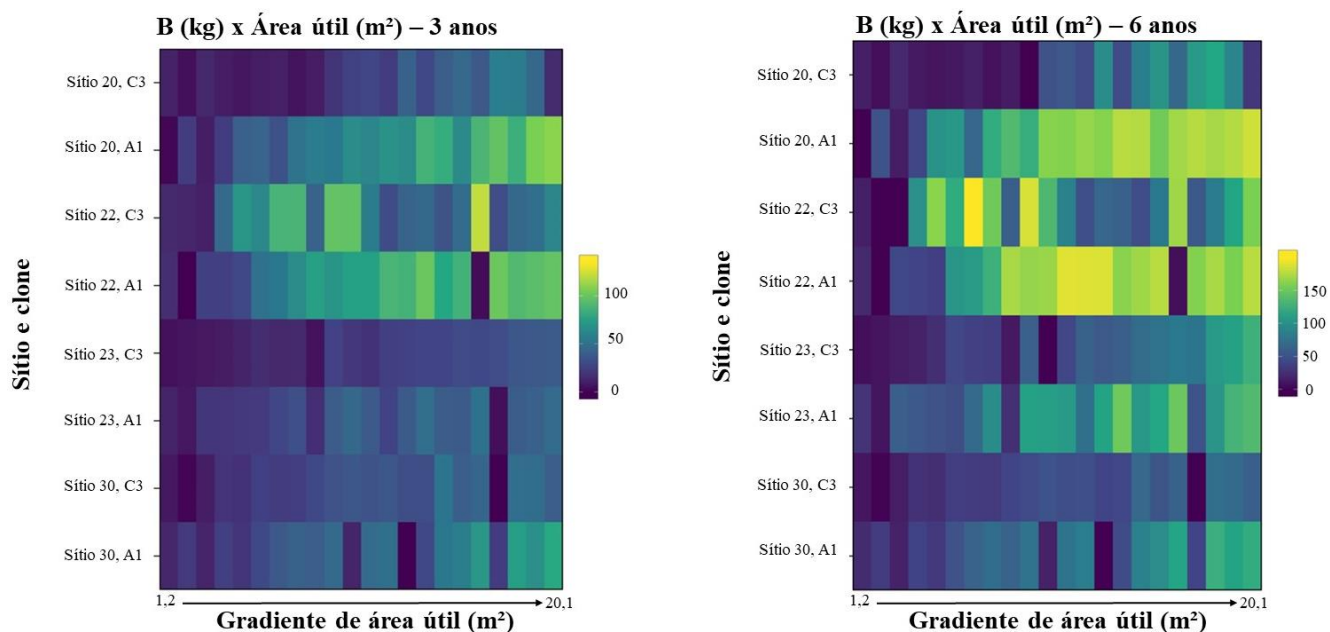
	Média	15,6	4,91	5
	Maior	19,2	7,59	5
23, C3 e 3	Padrão	8,4	3,65	5
	Média	11,1	4,99	5
	Maior	20,1	8,14	5
23, C3 e 6	Padrão	8,4	3,23	5
	Média	12	4,66	5
	Maior	20,1	10,26	5
30, A1 e 3	Padrão	8,4	4,08	5
	Média	9,3	4,47	5
	Maior	19,2	7,88	5
30, A1 e 6	Padrão	8,4	4,05	5
	Média	9,3	4,56	5
	Maior	19,2	7,69	5
30, C3 e 3	Padrão	8,4	4,52	5
	Média	12	5,1	5
	Maior	20,1	7,16	5
30, C3 e 6	Padrão	8,4	4,42	5
	Média	10,2	5,19	5
	Maior	19,2	7,32	5

Em que % de biomassa representa o quanto em porcentagem que as árvores desse gradiente de área útil representam no valor total de biomassa dessa parcela; n é o número de árvores por classe de área útil.

A produção de biomassa do fuste dos clones A1 e C3 é influenciada pelo gradiente de área útil de plantio e pela a idade em que foram analisadas e, quanto maior a idade e área útil, maiores tendem a ser os valores de biomassa do fuste das árvores. É observado que para otimizar a produção de biomassa do fuste dos clones A1 e C3, os gradientes de área útil selecionados para compor a categoria Maior ficaram entre 15,6 m² a 20,1 m² (Tabela 5), contemplando valores acima dos que já são amplamente utilizados em plantios florestais com *Eucalyptus* no Brasil (categoria padrão).

Na Figura 8 é apresentado o padrão de distribuição da biomassa por área útil em função dos fatores idade, sítio e material genético.

Figura 8 - Biomassa do fuste (kg por área útil) aos 3 e aos 6 anos para os genótipos A1 e C3 nos 4 sítios florestais.



As árvores do clone A1 foram as que mais acumularam biomassa no fuste ao longo da rotação, para os diferentes sítios florestais analisados. E que, quanto maior a área útil disponível para as árvores, maiores tendem a serem os valores de biomassa (Figura 8).

Outro questionamento passível de ser analisado é se o incremento em biomassa do fuste das árvores ($WNPP, Kg\ arv^{-1}\ ano^{-1}$) é influenciado pelo espaçamento de plantio das árvores, assim como ocorre com a biomassa do fuste das árvores. Na Tabela 6 está apresentado por clone, sítio e idade quais foram as áreas úteis que forneceram o maior, o valor médio e o valor padrão de $WNPP$ das árvores.

É possível observar que houve diferença entre a escolha das áreas úteis de maior representação percentual (categoria maior) e representação percentual média (categoria média) de $WNPP$ daqueles apresentados para a biomassa do fuste. Ou seja, o espaçamento que apresentou maior biomassa acumulada (Tabela 5) não é necessariamente o que apresenta melhor $WNPP$ durante o período analisado.

Tabela 6 - Representação das áreas úteis que fornecem o maior e o valor médio de WNPP das árvores, e a área útil padrão de plantio de eucalipto no Brasil, para os dois períodos em análise.

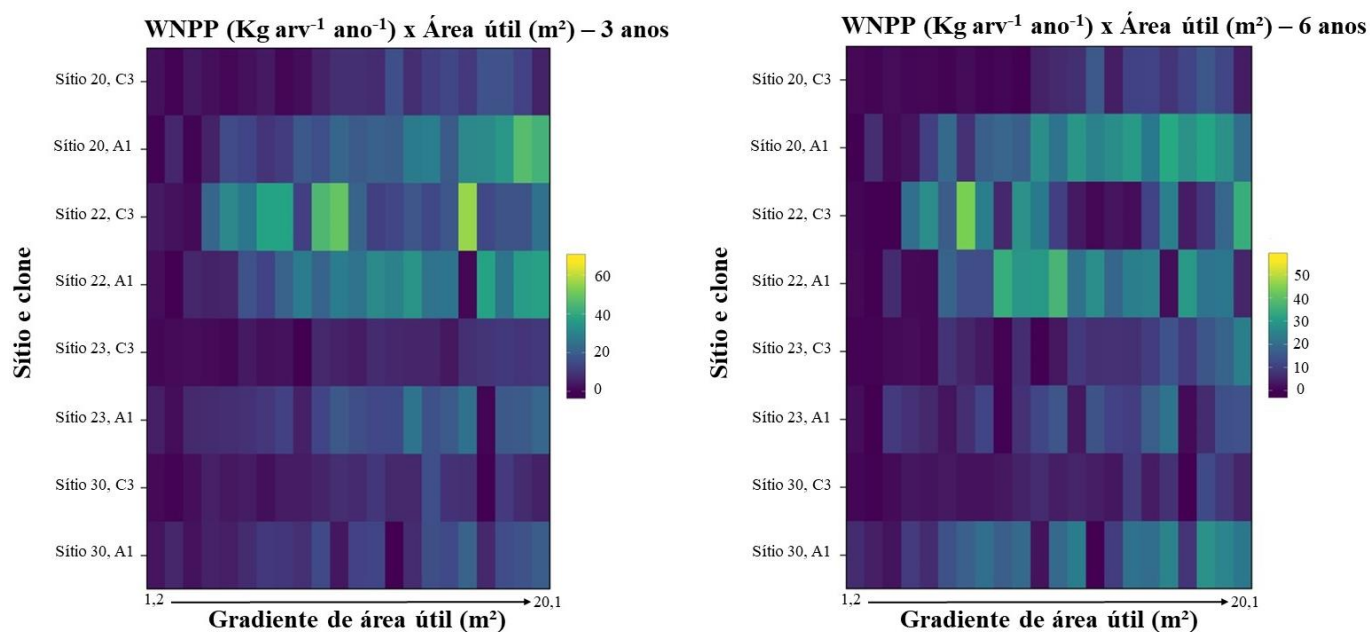
Sítio	Clone	Idade	Categoria	Área útil (m ²)	% de WNPP	n
20, A1 e 3			Padrão	8,4	3,21	5
			Média	10,2	3,74	5
			Maior	19,2	8,77	5
20, A1 e 6			Padrão	8,4	3,86	5
			Média	10,2	3,55	5
			Maior	15,6	8,64	5
20, C3 e 3			Padrão	8,4	3,43	5
			Média	10,2	4,73	5
			Maior	15,6	7,73	5
20, C3 e 6			Padrão	8,4	3,94	5
			Média	11,1	4,65	5
			Maior	13,8	7,9	5
22, A1 e 3			Padrão	8,4	4,68	5
			Média	7,5	4,73	5
			Maior	17,4	7,39	5
22, A1 e 6			Padrão	8,4	6,14	5
			Média	16,5	5,4	5
			Maior	11,1	7,32	5
22, C3 e 3			Padrão	8,4	3,79	5
			Média	10,2	5,11	5
			Maior	17,4	7,39	5
22, C3 e 6			Padrão	8,4	7,24	5
			Média	20,1	4,82	5
			Maior	9,3	7,47	5
23, A1 e 3			Padrão	8,4	3,92	5
			Média	10,2	5,13	5
			Maior	20,1	7,35	5
23, A1 e 6			Padrão	8,4	4,11	5
			Média	9,3	4,82	5
			Maior	12,9	7,55	5
23, C3 e 3			Padrão	8,4	2,83	5
			Média	11,1	4,62	5
			Maior	20,1	10,33	5
23, C3 e 6			Padrão	8,4	1,64	5
			Média	12	3,98	5
			Maior	20,1	12,75	5
30, A1 e 3			Padrão	8,4	3,84	5
			Média	9,3	4,3	5
			Maior	19,2	9,07	5
30, A1 e 6			Padrão	8,4	4,28	5
			Média	12	4,7	5
			Maior	18,3	8,28	5

30, C3 e 3	Padrão	8,4	4,19	5
	Média	12	5,1	5
	Maior	19,2	7,4	5
30, C3 e 6	Padrão	8,4	3,92	5
	Média	12	4,99	5
	Maior	19,2	7,94	5

Em que % de WNPP representa o quanto em porcentagem que as árvores desse gradiente de área útil representam no valor total de WNPP dessa parcela; n é o número de árvores por classe de área útil.

Diferentemente do que foi observado para o percentual médio de biomassa (Tabela 5), os espaçamentos que apresentam área útil entre 9,3 e 20,1m² se destacaram entre os percentuais médios de WNPP aos 3 e 6 anos. A Figura 9 mostra o comportamento do WNPP das árvores em função do gradiente de área útil, período de análise, sítios, e material genético.

Figura 9 - WNPP entre o 2º e 3º e 5º e 6º ano para os genótipos A1 e C3 nos sítios 20, 22, 23 e 30.



De acordo com a Figura 9 é possível observar que os dois materiais genéticos apresentaram respostas distintas em relação ao WNPP das árvores, em ambos os períodos de análise. No geral, o WNPP do material genético A1 ao longo de todo o gradiente de área útil foi superior aos do clone C3, principalmente nos sítios 20 e 22. Esse resultado pode estar relacionado a interação do clone com as características climáticas desses sítios, e a melhor adaptação do clone A1 nesses ambientes. Já em relação aos sítios 23 e 30, estes apresentaram

valores uniformes e mais baixos que os demais sítios, tendo uma pequena variação entre os clones nos diferentes períodos avaliados.

O WNPP entre o 2º e 3º ano (23,4 kg árv.) e 5º e 6º ano (21,7 kg árv.) para o para o clone A1 e entre o 2º e 3º ano (31,1 kg árv.) e 5º e 6º ano (18,2 kg árv.) para o para o clone C3 foram maiores no sítio 22 (Tabela 4).

O comportamento da APAR pelas árvores dos clones A1 e C3 dispostas em diferentes gradientes de área útil, sítios e idades também foi quantificado. A Tabela 7 apresenta as áreas úteis que apresentaram os melhores e os percentuais médios de absorção da radiação fotossinteticamente ativa.

Tabela 7 - Representação das áreas úteis em função da APAR absorvida pelos clones A1 e C3, em dois períodos de análise e localizados em sítios diferentes.

Sítio, Clone e Idade	Categoria	Área útil (m²)	% de APAR	n
20, A1 e 3	Padrão	8,4	4,04	5
	Média	10,2	4,47	5
	Maior	18,3	6,98	5
20, A1 e 6	Padrão	8,4	4,09	5
	Média	10,2	4,21	5
	Maior	18,3	7,84	5
20, C3 e 3	Padrão	8,4	3,64	5
	Média	10,2	4,69	5
	Maior	18,3	7,17	5
20, C3 e 6	Padrão	8,4	3,71	5
	Média	11,1	4,48	5
	Maior	18,3	7	5
22, A1 e 3	Padrão	8,4	4,53	5
	Média	10,2	4,63	4
	Maior	17,4	7,09	5
22, A1 e 6	Padrão	8,4	4,22	5
	Média	10,2	4,5	4
	Maior	17,4	7,4	5
22, C3 e 3	Padrão	8,4	4,27	5
	Média	20,1	4,68	5
	Maior	17,4	7,09	5
22, C3 e 6	Padrão	8,4	4,17	5
	Média	9,3	4,9	5
	Maior	16,5	7,82	5
23, A1 e 3	Padrão	8,4	4,03	5
	Média	10,2	5,02	5
	Maior	20,1	7,27	5
23, A1 e 6	Padrão e Média	8,4	4,8	5
	Maior	19,2	6,2	5

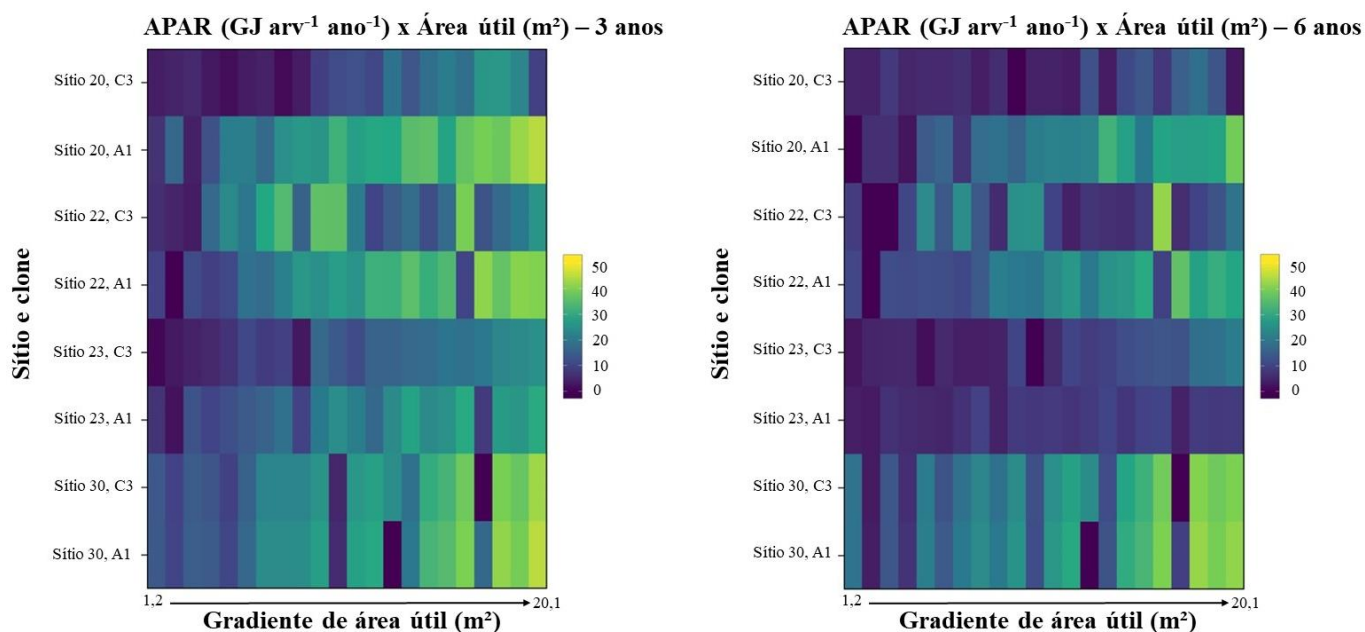
23, C3 e 3	Padrão	8,4	3,62	5
	Média	11,1	4,99	5
	Maior	20,1	8,2	5
23, C3 e 6	Padrão	8,4	3,12	5
	Média	12	4,33	5
	Maior	20,1	10,01	5
30, A1 e 3	Padrão	8,4	3,97	5
	Média	9,3	4,5	5
	Maior	19,2	7,38	5
30, A1 e 6	Padrão	8,4	3,65	5
	Média	12,9	4,57	4
	Maior	18,3	7,36	5
30, C3 e 3	Padrão	8,4	3,99	5
	Média	11,1	5,04	5
	Maior	19,2	7,59	5
30, C3 e 6	Padrão	8,4	3,64	5
	Média	11,1	5,05	5
	Maior	20,1	7,4	5

Em que % de APAR representa o quanto em porcentagem que as árvores desse gradiente de área útil representam no valor total da APAR nessa parcela; n é o número de árvores por classe de área útil.

A relação da área útil com a APAR para os clones A1 e C3 foi direta, ou seja, quanto maior a área útil de plantio das árvores, maior foi a quantidade de radiação que as árvores absorveram em relação aos demais espaçamentos (Tabela 7). A categoria “Maior” contemplou espaçamentos com área útil por árvore superiores a 16 m². Nas parcelas do clone A1 localizadas nos sítios 22 nas idades de 3 e 6 anos, e no sítio 30 para a idade de 6 anos, foi observado mortalidade nos espaçamentos escolhidos, com o número de árvores ao final igual a 4.

A distribuição do comportamento da APAR absorvida pelos clones A1 e C3 ao longo do gradiente de área útil, para os diferentes sítios é mostrado na Figura 10.

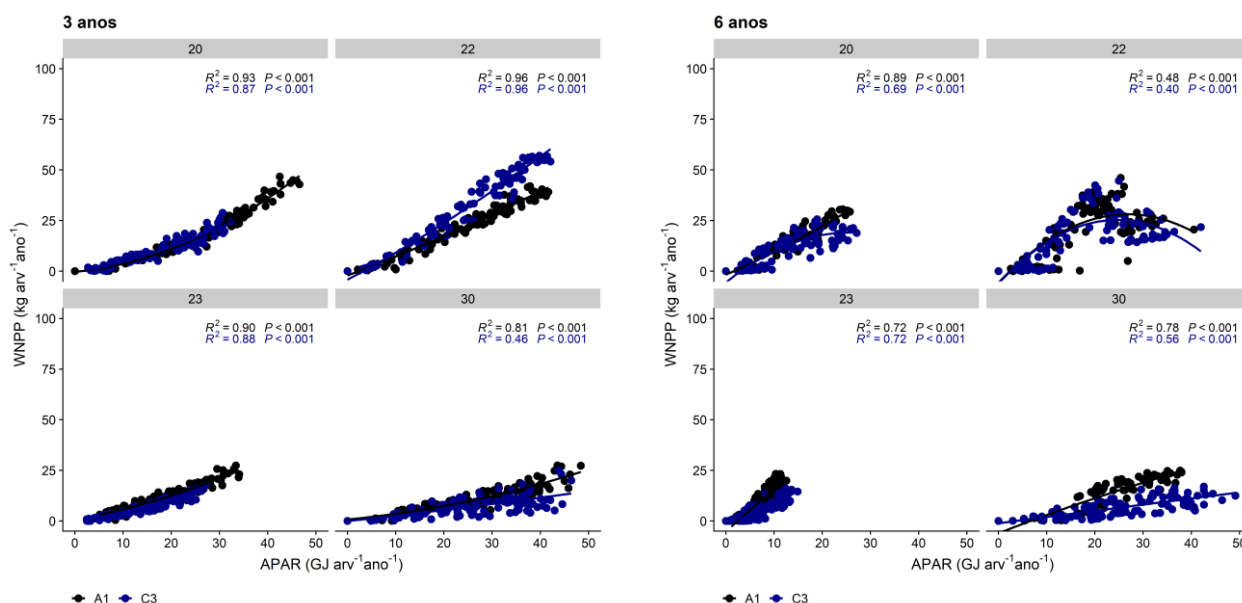
Figura 10 - APAR ($\text{GJ } \text{árv.}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) aos 3 e aos 6 anos para os genótipos A1 e C3 nos 4 sítios florestais.



O comportamento da relação entre o gradiente de área útil e a APAR variou entre os genótipos e entre os dois períodos de análise. É válido dar destaque ao período de 3 anos, pois, a quantidade de radiação absorvida nesse período foi superior a quantidade absorvida aos 6 anos.

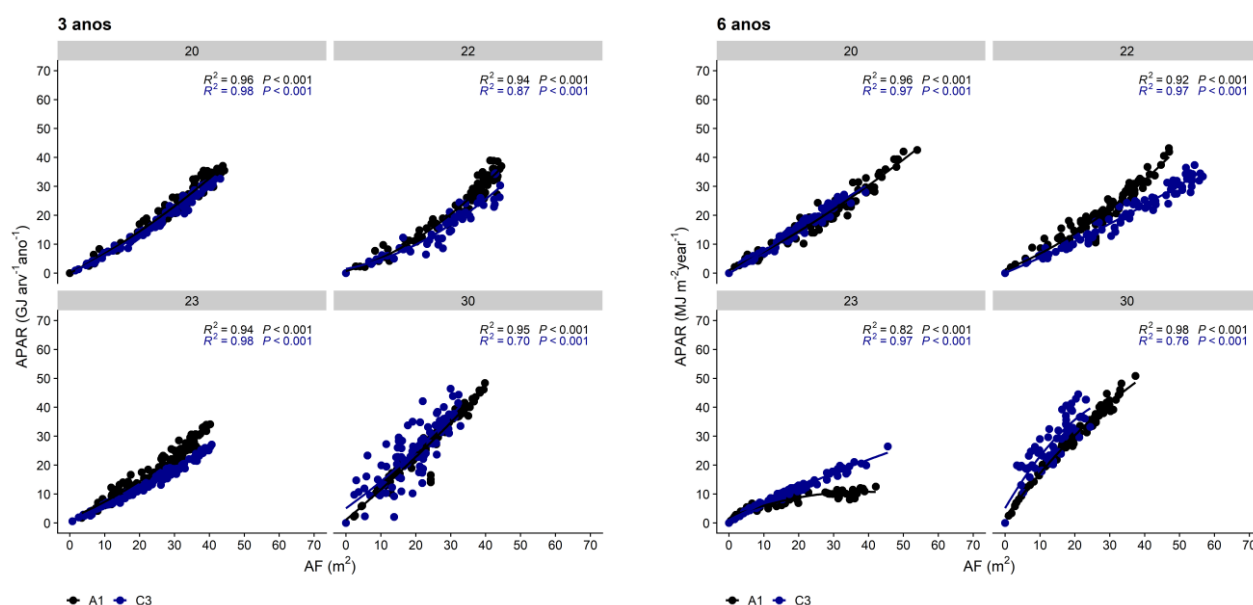
Podemos observar que as tendências de crescimento dos clones A1 e C3 nos diferentes períodos de análise e sítios apresentaram comportamentos variáveis em relação ao WNPP e APAR (Figura 11). E, de forma geral, houve uma leve redução da quantidade de APAR absorvida pelas árvores aos 6 anos. O sítio 23 foi o que apresentou a redução mais drástica de absorção da APAR.

Figura 11 - Comportamento do WNPP em função da APAR, aos 3 e aos 6 anos, para os clones A1 e C3 localizados nos sítios 20, 22, 23 e 30.



Na Figura 12 é apresentada a relação entre a área foliar e a absorção da APAR para os clones A1 e C3. É possível perceber que existem diferenças entre a relação da AF com a APAR pelas árvores, e que o comportamento dos clones nos diferentes sítios e idades é variável. O clone A1 e C3 localizados no sítio 20 apresentaram comportamento da relação AF e absorção de luz semelhantes, para ambos os períodos em análise. Já quando localizados no sítio 22, a área foliar do clone C3 foi superior à do clone A1 em ambos os períodos de análise, porém, mesmo com maior AF a faixa de absorção de luz foi relativamente semelhante à do clone A1. Aos 3 anos, no sítio 23 o clone C3 apresentou AF superior as do clone A1, porém, a quantidade de radiação absorvida foi similar para ambos os clones neste ambiente. Aos 6 anos, foi observado que esse comportamento mudou, e que às árvores do clone A1 apresentaram interceptação de luz inferior as do clone C3 com mesma AF. A maior absorção de luz pelos clones A1 e C3 ocorreram no sítio 30 para ambos os períodos de análise, e por meio da inclinação das retas plotadas é possível inferir que o clone C3 apresentou melhor eficiência na captação de luz por AF do que o clone A1.

Figura 12 – Comportamento da AF em função da APAR, aos 3 e 6 anos, para os clones A1 e C3 localizados nos sítios 20, 22, 23 e 30.



3.6 LUE e WNPP das árvores por sítio e período de análise

A eficiência do uso da luz para os clones A1 e C3 em diferentes idades e sítios apresentou variação. A Tabela 8 resume as áreas úteis que apresentaram as melhores médias de LUE para a categoria “Maior” e “Média” e a LUE média referente a área útil padrão dos plantios de *Eucalyptus* no Brasil.

Tabela 8 - Representação da área útil em função da LUE para os clones A1 e C3, em dois períodos de análise e localizados em sítios diferentes.

Sítio, Clone e Idade	Categoria	Área útil (m²)	LUE (g MJ ⁻¹)	n
20, A1 e 3	Padrão	8,4	0,56	5
	Média	9,3	0,61	5
	Maior	19,2	0,94	5
20, A1 e 6	Padrão	8,4	1,05	5
	Média	11,1	1,12	5
	Maior	19,2	1,46	5
20, C3 e 3	Padrão e Média	8,4	0,60	5
	Maior	20,1	0,68	5
20, C3 e 6	Padrão e Média	8,4	0,87	5
	Maior	14,7	1,09	5
22, A1 e 3	Padrão	8,4	0,94	5
	Média	9,3	0,84	5
	Maior	15,6	1,03	5

22, A1 e 6	Padrão	8,4	1,54	5
	Média	17,4	1,03	5
	Maior	11,1	1,54	5
22, C3 e 3	Padrão	8,4	1,08	5
	Média	19,2	1,29	5
	Maior	16,5	1,41	5
22, C3 e 6	Padrão e Maior	8,4	1,51	5
	Média	12	0,88	5
23, A1 e 3	Padrão	8,4	0,63	5
	Média	4,8	0,63	5
	Maior	19,2	0,70	5
23, A1 e 6	Padrão	8,4	1,08	5
	Média	5,7	1,31	5
	Maior	12,9	1,91	5
23, C3 e 3	Padrão	8,4	0,29	5
	Média	9,3	0,40	5
	Maior	20,1	0,55	5
23, C3 e 6	Padrão	8,4	0,44	5
	Média	12	0,84	5
	Maior	18,3	1,64	5
30, A1 e 3	Padrão e Média	8,4	0,41	5
	Maior	20,1	0,50	5
30, A1 e 6	Padrão	8,4	0,75	5
	Média	13,8	0,62	5
	Maior	9,3	0,76	5
30, C3 e 3	Padrão	8,4	0,27	5
	Média	12	0,27	5
	Maior	10,2	0,34	5
30, C3 e 6	Padrão	8,4	0,30	5
	Média	6,6	0,25	5
	Maior	10,2	0,35	5

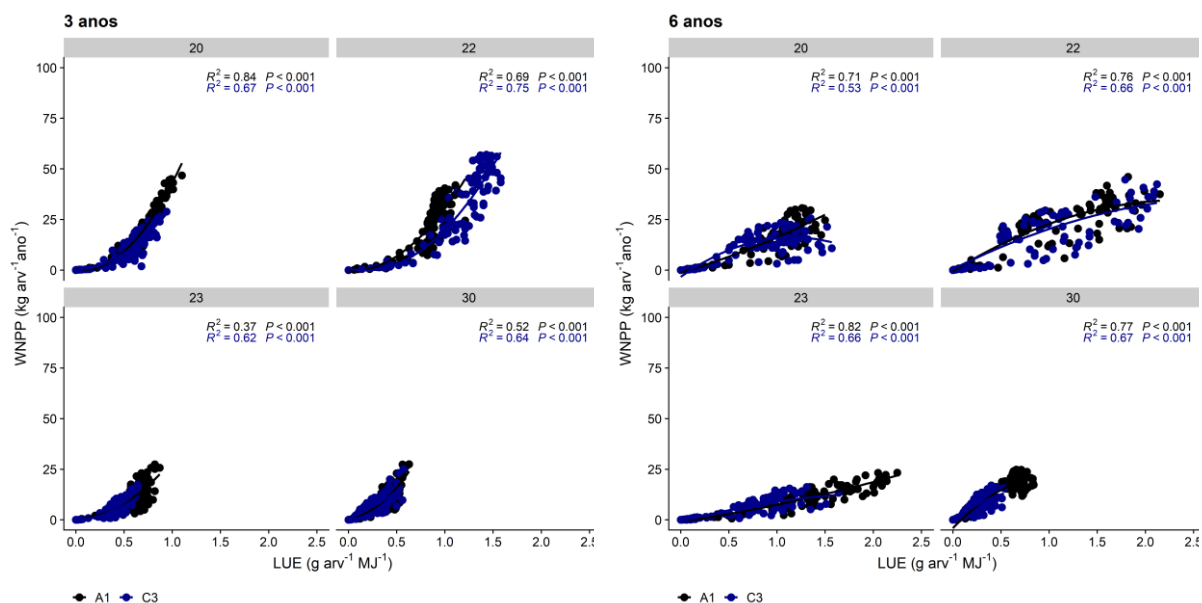
As áreas úteis disponíveis influenciaram o crescimento das árvores de forma consistente, aos 3 e 6 anos. E, os valores médios de LUE para a categoria maior, média e padrão aumentaram durante a rotação em todos os sítios, com exceção para o clone C3 no sítio 22 aos 6 anos que o valor da categoria 2 da LUE reduziu (de 1,29 para 0,88). A categoria maior contemplou espaçamentos com área útil por árvore superiores a 8,4 m² (sítio 22, clone C3 na idade de 6 anos).

Para os clones A1 e C3 aos 3 anos, os maiores valores médios de LUE aconteceram nos sítios 22, 20, 23 e 30, respectivamente. Porém, aos 6 anos, ocorreu variação dessa sequência e os maiores valores médios da LUE para os clones A1 e C3 ocorreram nos sítios 23, 22, 20 e 30. As menores médias de LUE ao longo dos períodos analisados para os clones A1 e C3 ocorreram

no sítio 30. O fator clima pode ter contribuído para esses resultados, já que o sítio 30 é o que apresenta os maiores valores de DEF e menor valor de PPT (Tabela 3).

A tendência observada entre a LUE e WNPP para os sítios nos diferentes períodos de análise é apresentada na Figura 13.

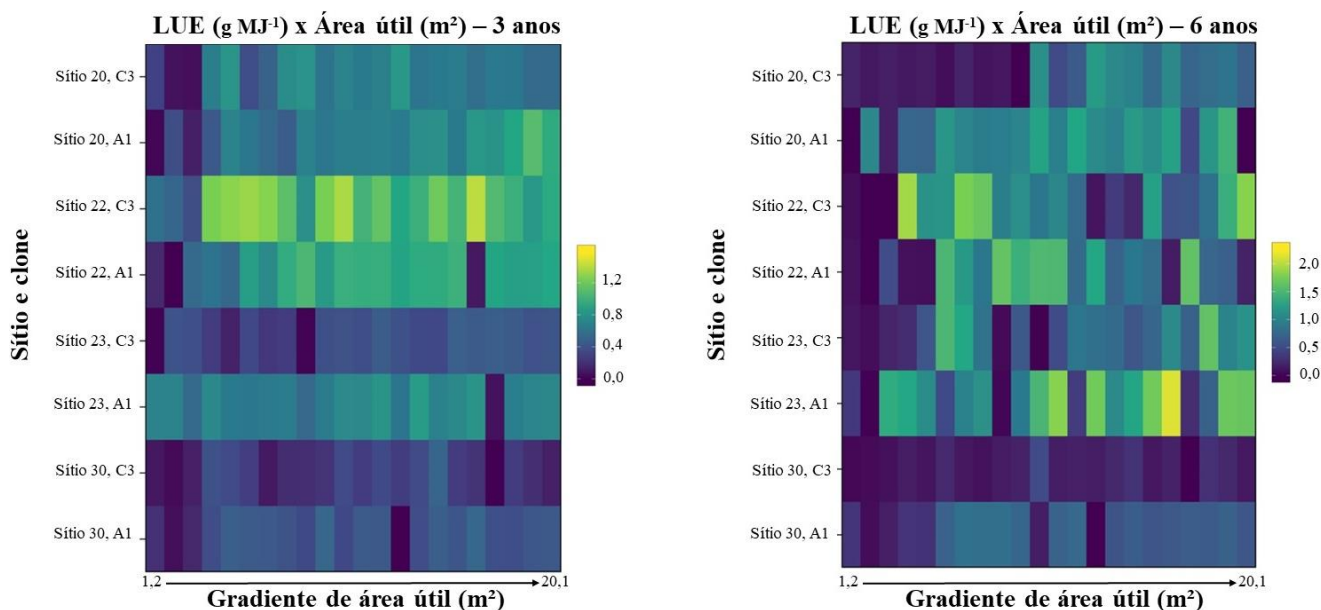
Figura 13 – Relação da LUE com WNPP, aos 3 e 6 anos para os clones A1 e C3 localizados nos sítios 20, 22, 23 e 30.



A correlação entre a LUE e WNPP aos 3 anos demonstra que as árvores tiveram crescimento acelerado nesse período, gerando curvas com maior inclinação e menor eficiência no uso da luz. O comportamento inverso ocorre aos 6 anos, no qual o crescimento é desacelerado e a eficiência das árvores no uso da luz aumentam.

A distribuição da LUE dos clones A1 e C3 ao longo do gradiente de área útil, nos diferentes sítios e períodos de amostragem é apresentada na Figura 14.

Figura 14 - LUE para os genótipos A1 e C3 nos sítios 20, 22, 23 e 30, aos 3 e 6 anos.



É possível perceber que o período de análise e a área útil apresentaram influência direta na LUE das árvores e nas Figuras 13 e 14 mostram que há diferença entre os genótipos A1 e C3, e que o comportamento deles variou de acordo com o local de avaliação. O sítio 30 apresentou menor variabilidade entre os valores calculados da LUE para os clones A1 e C3, mas, foram menos eficientes no processo de conversão de APAR em biomassa do fuste das árvores.

4 DISCUSSÃO

A motivação por trás deste estudo foi a visão de uma nova metodologia de manejo florestal, baseada na escolha da área útil de plantio para clones de eucalipto localizados em ambientes com características climáticas contrastantes. De forma que estes consigam alcançar a melhor eficiência no uso da luz na conversão em biomassa do fuste das árvores.

Vários são os fatores capazes de influenciar a eficiência das árvores no uso do recurso luz, necessário ao seu crescimento. Nesta pesquisa analisamos a influência da área útil que é disponibilizada para o crescimento das árvores e, o processo de interação do genótipo com o ambiente de plantio em duas idades ao longo da rotação. O uso do modelo baseado em processo MAESTRA possibilitou que a análise da absorção da radiação pelas árvores individuais fosse realizada independentemente da forma como os dosséis das árvores se encontravam (aberto ou fechado).

4.1 Competição intra parcela

O crescimento das árvores em função do tempo é influenciado pela ocorrência de competição por recursos entre as árvores (FERNÁNDEZ-TSCHIEDER; BINKLEY, 2018) seja por luz, água ou nutrientes, que podem alterar a estrutura e tamanho das árvores. O uso de índices como o de Gini consegue captar essa variabilidade dentro das parcelas (CORDONNIER; KUNSTLER, 2015).

Foi observado que no sítio 20, para o clone A1 (Gini aos 3 anos igual a 0,3055 e aos 6 anos igual a 0,2642) e no sítio 22, para o clone C3 (Gini aos 3 anos igual a 0,2916 e aos 6 anos igual a 0,2769) os maiores valores de Gini aconteceram aos 3 anos, ao invés do padrão esperado que seria um índice maior após o fechamento dos dósseis, aos 6 anos. Ou seja, a competição nos primeiros anos de crescimento nesses ambientes foram intensificadas.

De acordo com Fernández-Tschieder; Binkley (2018) o índice Gini pode variar para mais ou menos, ou permanecer constante de acordo com o efeito da competição entre as árvores ao longo do tempo. A competição pode ser do tipo assimétrica, quando uma porcentagem pequena de indivíduos utiliza de forma desproporcional a maior parte dos recursos disponíveis e do tipo simétrica, onde cada árvore cresce proporcionalmente ao seu tamanho (PARK; BENJAMIN; WATKINSON, 2003).

As curvas de Lorenz também podem ser usadas para representar graficamente a distribuição hierárquica da biomassa das árvores (FERNÁNDEZ-TSCHIEDER; BINKLEY, 2018). Dessa forma, foi possível perceber que as curvas de Lorenz mostraram que cada material genético apresentou as suas particularidades e que a partição da biomassa do fuste das árvores tendem a favorecer as árvores grandes. O clone A1 apresentou distribuição da biomassa mais simétrica entre árvores, nos diferentes sítios e idades, porém, com a intensificação da competição em função da idade esse comportamento foi alterado. Enquanto que o clone C3 apresentou característica mais assimétrica de distribuição da biomassa entre as árvores ao longo de todo o período de avaliação e sítios.

Pretzsch et al., (2022) pesquisaram 90 povoamentos uniformes e totalmente estocados de *Pinus sylvestris* distribuídos em 21 países da Europa, capturando um gradiente de produtividade, e concluíram que a interação entre a espécie e o ambiente no qual estão inseridos é capaz de modificar os padrões de crescimento das árvores. Em sítios menos produtivos ocorreu maior variação estrutural nas árvores e, em sítios mais produtivos apresentaram a redução dessa heterogeneidade estrutural, com consequente redução do Gini.

4.2 Variações da biomassa, WNPP e APAR com genótipo e idade do povoamento

Observamos que houve interação entre clones, gradiente de espaçamento e época de análise sobre a biomassa, WNPP e APAR, e que essas variáveis aumentaram proporcionalmente com o gradiente de espaçamento. A escolha da melhor área útil variou de acordo com qual variável que se busca otimizar, já que os espaçamentos que forneceram maior acúmulo de biomassa no fuste, WNPP e APAR foi variável ao longo da rotação analisada.

No geral, ao relacionar a área foliar dos clones A1 e C3 e a absorção da APAR percebemos que houve uma tendência linear (Figura 12) e que a AF variou em função do material genético, sítio e época de avaliação. Segundo Tun et al. (2018), é normal que dentro de um único povoamento existam árvores com AF superior à de outras árvores, devido ao espaçamento disponível por árvore.

Quando há essa variação de AF dentro das mesmas unidades de análise, pode-se pensar que isso ocasione maior auto-sombreamento entre as árvores, no entanto, árvores com maior área foliar tendem a ter copas que cobrem maiores áreas, no plano horizontal do solo. E dessa forma, a quantidade de luz disponível é maior para as árvores grandes com copas mais espalhadas. Portanto, a quantidade de luz que uma árvore pode absorver depende tanto do auto-sombreamento das folhas superiores sob as folhas inferiores quanto do crescimento horizontal das copas (BINKLEY et al., 2013).

Waring (1983) e Waring; Thies e Muscato (1980) analisaram a relação entre a área foliar e a eficiência de crescimento do fuste das árvores, correlacionando-os com a absorção de luz. E observaram que o crescimento em área basal por unidade de área foliar para Douglas-fir apresentaram tendências lineares em todas as classes de dominância estudadas, com exceção para as árvores suprimidas (WARING; THIES; MUSCATO, 1980).

Pesquisas que relacionam a absorção de luz e área foliar já foram publicadas para espécies de *Eucalyptus*, à exemplo, a pesquisa de Campoe et al. (2013a) que observaram forte tendência entre absorção de luz e a área foliar, em que a duplicação da área foliar das árvores de 30 m² para 60 m² aumentou em praticamente três vezes a absorção de luz das árvores passando de 64 (MJ m⁻² d⁻¹) para 183 (MJ m⁻² d⁻¹).

Também observamos que os materiais genéticos utilizados, clone A1 e C3, apresentaram diferença no crescimento médio da biomassa (kg) acumulada no caule das árvores (Tabela 4). O clone A1 aos 6 anos, ou seja, idade próxima a de corte apresentou os melhores resultados em biomassa acumulada no fuste das árvores, característica essa que pode estar relacionada a melhor adaptação do clone A1 nos diferentes sítios.

Rodrigues; Silva e Nouvellon (2021) estudaram o comportamento da produção da biomassa aérea para três clones comerciais de *E. urophylla* (AEC 0144, AEC 224 e COP 1404) submetidos a dois espaçamentos (3 m × 2 m; 3 m × 4 m) de plantio, em duas idades, 40 e 52 meses. Esses autores concluíram que a maior produtividade foi obtida no espaçamento 3 m x 2 m e que os houve diferença na resposta entre clones. O clone AEC 0144 foi o que mais produziu biomassa aérea, seguido do AEC 224 e o menos produtivo foi o COP 1404.

Padrão também encontrado por Le Maire et al. (2019), que pesquisaram a produtividade de árvores de dezesseis genótipos de eucalipto plantados em um mesmo ambiente, porém, com textura do solo diferentes (solos arenosos e argilosos). Os autores observaram que a produtividade das árvores foi impulsionada pelas diferenças entre os seus materiais genéticos, e que os genótipos mais produtivos apresentaram o mesmo comportamento em toda a área de experimentação, apesar da variação nas características do solo.

4.3 Variações de LUE com genótipo e idade do povoamento

Como a eficiência do uso da luz diferiu entre os clones ao longo do gradiente de espaçamento de plantio, aos 3 e 6 anos, pode haver oportunidades para selecionar o material clonal e tratamentos silviculturais que maximizem a produtividade bem como a eficiência do uso da luz pelas árvores.

Analisando os resultados encontrados em função dos locais, de forma generalizada, o sítio 22 foi o sítio mais produtivo para a biomassa acumulada e em WNPP. Considerando o período de 3 anos esse sítio foi o que apresentou a maior eficiência do uso da luz média para os clones A1 (LUE igual a 1,03) e C3 (LUE igual a 1,41). No entanto, ao analisar o período de 6 anos, o sítio 23 foi o que apresentou as maiores médias de LUE para os clones A1 (LUE igual a 1,91) e C3 (LUE igual a 1,64) (Tabela 8).

Esses resultados podem ser justificáveis devido ao aumento da mortalidade nas parcelas do sítio 22 após o fechamento do dossel (aos 6 anos) para ambos os clones, podendo ser um indicativo do grau de competição entre as árvores. Já o sítio 23 foi o que apresentou os menores valores de APAR comparados aos demais sítios, porém, manteve seu crescimento constante.

Analisando a variabilidade existente nos padrões de eficiência do uso da luz para os clones de eucalipto estudados, pode-se dizer que essa variabilidade está relacionada aos padrões que cada árvore apresenta para a obtenção de recursos para o desenvolvimento (GSPALTL et al., 2013). Pois, segundo Fernández e Gyenge (2009) desde que os recursos necessários para o crescimento das árvores estejam disponíveis, e que o dossel não esteja fechado, todas as árvores

do povoamento são igualmente eficientes. Mas, com o fechamento do dossel, e início da competição entre árvores, esse padrão de eficiência das árvores é alterado (GSPALTL et al., 2013).

De acordo Mattos et al. (2020), o fator fisiológico das árvores nesse tipo de estudo deve ser considerado, já que ao analisar as diferenças na estrutura do dossel, interceptação de luz e eficiência de uso da luz para 18 clones de *Eucalyptus* em um experimento no Brasil, estes autores concluíram que a produção do lenho das árvores é mais influenciada pelo material genético e o quão eficientes eles são na conversão de luz em madeira do que propriamente pela área foliar das árvores e quantidade de luz que é absorvida pelas árvores.

Os valores encontrados no presente estudo de eficiência do uso da luz para a produção de biomassa do fuste das árvores estão de acordo com as medições de pesquisas anteriores desenvolvidas em povoamentos de eucalipto, como em Le Maire et al. (2019) que encontraram entre 0,15 até 1,70 g MJ⁻¹; 1,18 g MJ⁻¹ (MARSDEN et al., 2010); entre 0,78 a 1,98 g MJ⁻¹ (STAPE; BINKLEY; RYAN, 2008) e 1,03 e 2,39 g MJ⁻¹ (STAPE, 2002).

No entanto, as pesquisas publicadas que abordam sobre a eficiência do uso da luz por árvores de eucalipto assumem uma densidade homogênea de plantio das árvores, ou mudança de densidade em relação a prática de desbaste, sendo assim, diferentes do tipo de análise metodológica aqui proposta. Como por exemplo, a pesquisa de Forrester et al. (2013) que analisaram o efeito do desbaste, poda e adubação nitrogenada na interceptação e eficiência do uso da luz em plantio de *Eucalyptus nitens* e concluíram que a prática de desbaste e adubação aumentaram a APAR, área foliar das árvores e a LUE em 36% (0,84–1,14 g MJ⁻¹).

Campoe et al. (2013a) avaliaram se árvores dominantes (as 20% maiores) são mais produtivas do que as árvores não dominantes (as 20% menores) em povoamentos de *Eucalyptus grandis* de origem seminal, em um gradiente de produtividade no Brasil. Esses autores perceberam que as 20% árvores menores obtiveram em média 10,6 kg de biomassa seca da madeira do caule em comparação com 185 kg por tronco de madeira nas árvores 20% maiores. As menores árvores apresentaram 3,0 m² versus 41,7 m² da área foliar das maiores; as menores árvores absorveram 2,2 GJ ano⁻¹ de luz enquanto que as maiores árvores absorveram 32,8 GJ ano⁻¹ de luz; e a eficiência do uso da luz das menores árvores foi igual a 0,75 kg GJ⁻¹ versus 1,03 kg GJ⁻¹ das maiores árvores.

O fato do sítio 30 ter apresentado as médias de eficiência do uso da luz mais baixas, pode ser explicada pelas condições climáticas deste ambiente, já que ele é detentor dos maiores valores de déficit hídrico, alta temperatura média e precipitação baixa (Tabela 3). Litton; Raich; Ryan (2007) explicam que os sítios menos estressantes onde a disponibilidade de nutrientes é

mais acessível e fácil, a absorção de carbono e alocação para os tecidos lenhosos tendem a aumentar. Por outro lado, se os sítios estão sob estresse, a absorção do carbono diminui e a alocação para as raízes aumentam. Ou seja, as árvores investem maiores proporções de alocação de carbono nos processos subterrâneos, como em raízes finas para tentar alcançar reservatórios de recursos no solo e suprir as suas necessidades.

Não foi encontrado até o momento de escrita dessa pesquisa publicações com metodologia semelhante à está em estudos com genótipos de *Eucalyptus*. Sugerimos que nossa metodologia seja aplicável a outras espécies florestais no Brasil.

5 CONCLUSÃO

Informações sobre a produtividade e crescimento das árvores é sempre o objeto principal de pesquisas florestais, no entanto, relacionar a eficiência do uso da luz com gradientes de espaçamento de plantio pode fornecer informações importantes aos gestores florestais.

Como esperado, os resultados encontrados da produtividade dos clones apresentaram variabilidade em função do sítio e período de análise. A produtividade foi analisada levando em consideração outras características do povoamento, como a área foliar. Nem sempre os maiores valores de APAR absorvidos serão convertidos em biomassa do fuste das árvores. O sítio mais produtivo, não necessariamente é o mais eficiente após o fechamento do dossel florestal (6 anos), mostrando que o comportamento das árvores foi variável de acordo com a época de análise. A área útil encontrada para os melhores resultados de eficiência do uso da luz é maior que as comumente empregadas no setor florestal brasileiro (em termos médios). O padrão de LUE variou entre clones e períodos de análise. Além disso, a eficiência de uso da luz no processo de conversão da radiação absorvida em biomassa do fuste é o tópico principal para diferenciar a produtividade dos clones e a sua interação com ambientes que apresentam características climáticas distintas.

REFERENCIAS

- ALBAUGH, T. J. et al. Tamm Review: Light use efficiency and carbon storage in nutrient and water experiments on major forest plantation species. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 376, p. 333–342, 2016.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- BINKLEY, D. et al. Patterns of growth dominance in forests of the Rocky Mountains, USA. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 236, n. 2–3, p. 193–201, 2006.
- BINKLEY, D. et al. Light absorption and use efficiency in forests: Why patterns differ for trees and stands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 288, p. 5–13, 2013.
- 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, p. 271–283, 2017.
- CAMARGO, A. P. DE. Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 21, p. 163–213, 1962.
- CAMPBELL, G. S.; NORMAN, J. M. **Introduction to environmental biophysics**. Springer-Verlag ed. New York: Springer-Verlag, 1998. 286 p.
- CAMPOE, O. C. et al. Stem production, light absorption and light use efficiency between dominant and non-dominant trees of *Eucalyptus grandis* across a productivity gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 288, p. 14–20, 2013a.
- 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, 2013b.
- CAMPOE, O. C. et al. Climate and genotype influences on carbon fluxes and partitioning in *Eucalyptus* plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 475, 2020.
- CARON, B. O. et al. Quantificação da Biomassa florestal em plantios de curta rotação com diferentes espaçamentos. **Comunicata Scientiae**, Bom Jesus, v. 6, p. 106–112, 2015.
- CERIANI, L.; VERME, P. The origins of the Gini index: extracts from *Variabilità e Mutabilità* (1912) by Corrado Gini. **The Journal of Economic Inequality**, Netherlands, v. 10, n. 3, p. 421–443, 2011.
- CHARBONNIER, F. et al. Increased light-use efficiency sustains net primary productivity of shaded coffee plants in agroforestry system. **Plant, Cell & Environment**, Oxford, v. 40, n. 8, p. 1592–1608, 2017.
- CORDONNIER, T.; KUNSTLER, G. The Gini index brings asymmetric competition to light. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, Netherlands, v. 17, n. 2, p. 107–115, 2015.
- CRAINE, J. M.; DYBZINSKI, R. Mechanisms of plant competition for nutrients, water and light. **Functional Ecology**, London, v. 27, n. 4, p. 833–840, 2013.

DA SILVA, R. M. L. et al. Fertilization Response, Light Use, and Growth Efficiency in *Eucalyptus* Plantations across Soil and Climate Gradients in Brazil. v. 7, n. 6, p. 117, 2016.

DE MATTOS, E. M. et al. Variation in canopy structure, leaf area, light interception and light use efficiency among *Eucalyptus* clones. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 463, 2020.

DE MORAES GONÇALVES, J. L. 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.

RIBEIRO, S. B. M. D. 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.

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, 2019.

ELOY, E. et al. Effect of age and spacing on biomass production in forest plantations. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 42, n. 2, p. 420214, 2018.

FERNÁNDEZ, M. E.; GYENGE, J. Testing Binkley's hypothesis about the interaction of individual tree water use efficiency and growth efficiency with dominance patterns in open and close canopy stands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 257, n. 8, p. 1859–1865, 2009.

FERNÁNDEZ-TSCHIEDER, E.; BINKLEY, D. Linking competition with Growth Dominance and production ecology. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 414, p. 99–107, 2018.

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, p. 21–30, 2013.

GONÇALVES, J. L. DE 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.

GONZÁLEZ, J. A.; CALBÓ, J. Modelled and measured ratio of PAR to global radiation under cloudless skies. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 110, n. 4, p. 319–325, 2002.

GONZALEZ-BENECKE, C. A. et al. General above-stump volume and biomass functions for *Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*. **Biomass and Bioenergy**, United Kingdom, v. 155, p. 106280, 2021.

GSPALTL, M. et al. Leaf area and light use efficiency patterns of Norway spruce under different thinning regimes and age classes. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 288, p. 49–59, 2013.

- HAKAMADA, R. et al. Growth and canopy traits affected by myrtle rust (*Austropuccinia psidii* Winter) in *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Forest Pathology**, United Kingdom, v. 52, n. 3, p. e12736, 2022.
- HAKAMADA, R. E. et al. Stocking effects on seasonal tree transpiration and ecosystem water balance in a fast-growing *Eucalyptus* plantation in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 466, 2020a.
- HAKAMADA, R. E. et al. Influence of stand density on growth and water use efficiency in *Eucalyptus* clones. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 466, p. 118125, 2020b.
- LANDSBERG, J.; SANDS, P. **Physiological Ecology of Forest Production: Principles, Processes and Models**. London: Academic Press, 2011.
- LE MAIRE, G. et al. Light absorption, light use efficiency and productivity of 16 contrasted genotypes of several *Eucalyptus* species along a 6-year rotation in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 449, 2019.
- LEXERØD, N. L.; EID, T. An evaluation of different diameter diversity indices based on criteria related to forest management planning. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 222, n. 1–3, p. 17–28, 2006.
- LITTON, C. M.; RAICH, J. W.; RYAN, M. G. Carbon allocation in forest ecosystems. **Global Change Biology**, Oxford, v. 13, n. 10, p. 2089–2109, 2007.
- LORENZ, M. O. Methods of measuring the concentration of wealth. **Publications of the American Statistical Association**, v. 9, n. 70, p. 209–219, 1905.
- MARSDEN, C. et al. Relating MODIS vegetation index time-series with structure, light absorption and stem production of fast-growing *Eucalyptus* plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, n. 9, p. 1741–1753, 2010.
- MEDLYN, B. A MAESTRO retrospective. Em: MENCUCCINI, M. et al. (Eds.). **Forests at the land-atmosphere interface**. Wallingford: CABI International, 2004. p. 105–122.
- NELDER, J. A. New Kinds of Systematic Designs for Spacing Experiments. **Biometrics**, v. 18, n. 3, p. 283, 1962.
- NORMAN, J. M.; WELLES, J. M. Radiative Transfer in an Array of Canopies1. **Agronomy Journal**, United States, v. 75, n. 3, p. 481–488, 1983.
- OLIVOTO, T.; LÚCIO, A. D. C. metan: An R package for multi-environment trial analysis. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 11, n. 6, p. 783–789, 2020.
- OUNBAN, W.; PUANGCHIT, L.; DILOKSUMPUN, S. Development of general biomass allometric equations for *Tectona grandis* Linn.f. and *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. plantations in Thailand. **Agriculture and Natural Resources**, Thailand, v. 50, n. 1, p. 48–53, 2016.
- PARK, S. E.; BENJAMIN, L. R.; WATKINSON, A. R. The Theory and Application of Plant Competition Models: an Agronomic Perspective. **Annals of Botany**, Oxford, v. 92, n. 6, p. 741–748, 2003.

PEZZOPANE, J. R. M. et al. Managing *Eucalyptus* trees in agroforestry systems: Productivity parameters and PAR transmittance. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Netherlands, v. 312, p. 107350, 2021.

PRETZSCH, H. et al. With increasing site quality asymmetric competition and mortality reduces Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stand structuring across Europe. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 520, p. 120365, 2022.

PRETZSCH, H.; BIBER, P. Tree species mixing can increase maximum stand density. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 46, n. 10, p. 1179–1193, 2016.

R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, 2022.

RODRIGUES, G. G.; SILVA, L. D.; NOUVELLON, Y. Production and carbon allocation in clonal *Eucalyptus* plantations under different planting spacings. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 493, p. 119249, 2021.

SCHWERZ, F. et al. Reduced planting spacing increase radiation use efficiency and biomass for energy in black wattle plantations: Towards sustainable production systems. **Biomass and Bioenergy**, United Kingdom, v. 120, p. 229–239, 2019.

SCOLFORO, H. F. et al. Comparison of taper functions applied to *Eucalypts* of varying genetics in Brazil: application and evaluation of the penalized mixed spline approach. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 48, n. 5, p. 568–580, 2018.

STAPE, J. L. **Production ecology of clonal Eucalyptus plantations in northeastern Brazil.** Fort Collins: Thesis (PhD) - Colorado State University, 2002.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G. Production and carbon allocation in a clonal *Eucalyptus* plantation with water and nutrient manipulations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, n. 3–4, p. 920–930, 2008.

STAPE, J. L.; SILVA, C. R.; BINKLEY, D. Spacing and geometric layout effects on the productivity of clonal *Eucalyptus* plantations. **Trees, Forests and People**, Netherlands, v. 8, p. 100235, 2022.

TUN, T. N. et al. Planting spacing affects canopy structure, biomass production and stem roundness in poplar plantations. **Scandinavian Journal of Forest Research**, London, v. 33, n. 5, p. 464–474, 2018.

WARING, R. H. Estimating Forest Growth and Efficiency in Relation to Canopy Leaf Area. **Advances in Ecological Research**, United States, v. 13, n. C, p. 327–354, 1983.

WARING, R. H.; THIES, W. G.; MUSCATO, D. Stem Growth per Unit of Leaf Area: A Measure of Tree Vigor. **Forest Science**, Lawrence, v. 26, n. 1, p. 112–117, 1980.

WICKHAM, H. **ggplot2: Elegant graphics for data analysis.** Nova York Springer, 2016. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/ggplot2/ggplot2.pdf>>. Acesso em: 29 jun. 2022.

ARTIGO 3: Impacto da inclusão de variáveis do povoamento, de variáveis climáticas e do diâmetro superior na predição do afilamento de árvores de diferentes genótipos de *Eucalyptus* no Brasil

Destaques

- Um modelo de afilamento mais preciso foi desenvolvido para diferentes genótipos de *Eucalyptus*.
- Combinando modelo de expoente variável com variáveis do povoamento e calibração de um diâmetro superior para modelar conicidade das árvores.
- A equação de afilamento pode ser utilizada para árvores de *Eucalyptus* localizadas em locais com gradiente climático contrastantes.

RESUMO

A busca por funções de afilamento que apresentem consistência biológica e flexibilidade tem sido demandada dentro da modelagem florestal. Objetivou-se com esse estudo realizar a modelagem de afilamento do fuste de clones de eucalipto, combinando a generalização e a calibração de um diâmetro superior para melhorar a precisão das estimativas do modelo. A base de dados é proveniente do experimento TECHS, que abrange dados de 17 locais de experimentação e um total de 18 genótipos de *Eucalyptus* distribuídos entre esses locais. A amostragem destrutiva das árvores aconteceu entre 28 e 81 meses após plantio. Primeiro, selecionamos o modelo de Kozak (1988) como modelo base, devido ao seu uso consolidado em pesquisas florestais na modelagem do afilamento de árvores. Em seguida, testamos a incorporação de variáveis (temperatura, precipitação, déficit hídrico do solo e idade das árvores, de forma isolada e interativamente com a variável z (hi/ht)) no expoente do modelo base, propiciando a generalização do modelo. Por fim, foi realizada a calibração do modelo generalizado, utilizando o método da restrição algébrica e o diâmetro superior localizado na altura de 6 metros. A inclusão das variáveis de idade e déficit hídrico do solo, interativamente com a variável z , no expoente variável do modelo e a calibração do diâmetro superior impactaram as estimativas de volume de madeira das árvores individuais (m^3) em que o RMSE reduziu 3,82% e 3,64% (ajuste e validação) e o MAE reduziu 3,00% e 3,50% (ajuste e validação), além de apresentar uma boa distribuição residual. Portanto, o modelo encontrado mostrou-se capaz de ser utilizado em experimentos de *Eucalyptus* com amplitude de informações climáticas e de idades diferentes.

PALAVRAS-CHAVE: Função de afilamento; Função de expoente variável; Calibração de um diâmetro superior; Restrição algébrica.

Impact of the inclusion of stand variables, climate variables, and upper-stem diameter in the prediction of tree taper of different Eucalyptus genotypes in Brazil.

ABSTRACT

The search for thinning functions that present biological consistency and flexibility have been demanded within forest modeling. This study aimed to stem tapering modeling of eucalyptus clones, combining generalization and calibration of an upper-stem diameter to improve the accuracy of model estimates. The TECHS experiment's database covers data from 17 trial sites and 18 Eucalyptus genotypes distributed among these sites. The destructive sampling was performed between 28 and 81 months after planting. First, we selected the model of Kozak (1988) as the base model due to its consolidated use in forestry research in modeling tree taper. Next, we tested the incorporation of variables (temperature, precipitation, soil water deficit, and age of trees, separated and interactively with the variable z (hi/ht)) in the exponent of the base model, providing the generalization of the model. Finally, the calibration of the generalized model was performed using the algebraic restriction method and the upper-stem diameter at the height of 6 m. The inclusion of the variables age and soil water deficit, interactively with the variable z , in the exponent of the model and calibration of the upper-stem diameter impacted the estimates of the wood volume of individual trees (m^3). Where RMSE and MAE reduced from 3.82% to 3.64% (adjustment and validation steps) and from 3.00% to 3.50% (adjustment and validation steps), respectively, and showed good residual distribution. Therefore, the proposed model can be used in Eucalyptus experiments with a wide range of edaphoclimatic information and for different ages.

KEYWORDS: Taper function; Variable exponent model; Calibration of an upper-stem diameter; Algebraic restriction.

1 INTRODUÇÃO

Além da boa representação matemática do fuste das árvores advinda da escolha do modelo de afilamento, nos últimos anos, pesquisas vem demonstrando que é necessário que se faça a inserção de fatores que possivelmente afetem a forma e o afilamento das árvores e que consequentemente, propiciem uma abordagem generalizada e flexível ao serem inseridos nos modelos (DE OLIVEIRA et al., 2022).

Entre os fatores que são passíveis de alterarem a forma e o afilamento das árvores cabe destacar a espécie, estrutura da copa das árvores, sítios florestais, idade das árvores, histórico das práticas de manejo florestal e fatores climáticos, como variação de temperatura, precipitação e déficit hídrico dos solos (HEVIA; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ; MAJADA, 2016; LARSON, 1963b; LIU et al., 2020a; MUHAIRWE; LEMAY; KOZAK, 1994; NIGH; SMITH, 2012; POUDEL; ÖZÇELIK; YAVUZ, 2020; PUTNEY; MAGUIRE, 2021; SCHNEIDER et al., 2018; SCOLFORO et al., 2019; VALENTINE et al., 2012). Já que não existe um único fator que seja capaz de explicar de maneira satisfatória o porquê existe toda essa variabilidade no formato do caule das árvores (CORRAL-RIVAS et al., 2007).

Pesquisas florestais que fizeram uso dessas variáveis comprovaram que ao utilizá-las os modelos apresentaram ganhos em sua capacidade preditiva. Como por exemplo na pesquisa de Hirigoyen et al. (2021), que desenvolveram um modelo de afilamento generalizado com a inserção do efeito da densidade do povoamento para *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii* localizados no Uruguai. Scolforo et al. (2018a) que realizaram a inserção de variáveis climáticas na modelagem de dados de diferentes materiais genéticos de eucalipto plantados em locais com características ambientais contrastantes no Brasil. Nigh e Smith (2012) analisaram povoamentos de *Pinus contorta* no Canadá, e desenvolveram um modelo de afilamento com a inclusão de variáveis climáticas, precipitação média anual e a data da primeira geada após o período de crescimento do verão. Um modelo de afilamento foi desenvolvido para a espécie *Larix gmelinii* localizadas na região nordeste da China, com a inclusão das variáveis precipitação e temperatura (HE et al., 2021).

Além do dap (diâmetro à 1,30 m do solo), altura total das árvores e a inserção dos fatores passíveis de alterarem a forma e afilamento das árvores, tem sido observado a prática de calibração dos modelos por meio do uso de uma medida extra de diâmetro, localizado acima do dap das árvores (ARIAS-RODIL; DIÉGUEZ-ARANDA; BURKHART, 2017). A inclusão desse diâmetro superior nos modelos de afilamento pode ser feita por meio da aplicação do método de restrição algébrica que foi proposto por Cao (2009), que obrigada as funções a

passarem por um ou mais pontos especificados. Com a aplicação dessa técnica na modelagem de afilamento é possível atribuir o valor zero para diâmetros correspondentes à ponta da árvore, evitando assim, que diâmetros negativos sejam obtidos ao levar em consideração as alturas próximas à altura total das árvores (SCOLFORO et al., 2018a, 2018b).

Hussain et al. (2021) analisaram funções de afilamento do fuste para espécies de *Betula platyphylla* e *Betula costata* localizadas em áreas montanhosas da China, com a inclusão de um diâmetro superior do caule localizado na altura de 5,3 m. Os autores concluíram que a calibração do modelo melhorou as estatísticas para ambas as espécies. Li e Weiskittel (2010) estudando espécies coníferas (*Abies balsamea*, *Picea rubens* e *Pinus strobus*) na América do Norte concluíram que a inclusão do diâmetro superior localizado na altura de 5,27 m possibilitou ao modelo prever melhor o volume do caule para todas as espécies pesquisadas.

Conforme analisado, pesquisas sobre modelos de afilamento do caule das árvores que englobem a adição de fatores modificadores do formato do fuste das árvores e a calibração de um diâmetro superior se faz necessária, já que os ganhos não são apenas para aumentar a precisão preditiva do modelo, mas, para torná-los mais adequados à lógica biológica.

Portanto, esta pesquisa teve como objetivo implementar um modelo de afilamento de alta precisão para diferentes genótipos de *Eucalyptus* provenientes de gradientes climáticos contrastantes no Brasil, por meio da combinação de alternativas metodológicas de generalização e de calibração de um diâmetro superior localizado na altura de 6 metros.

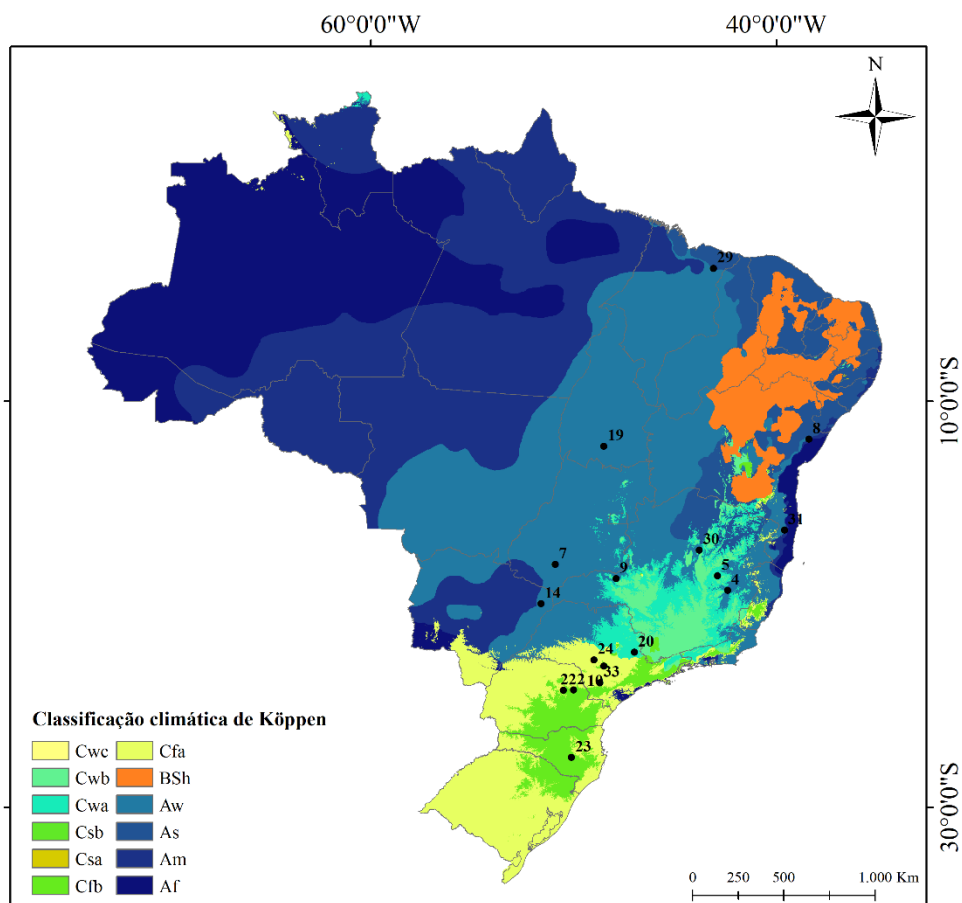
2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A base de dados utilizada no desenvolvimento desta pesquisa é proveniente do Programa Cooperativo TECHS (Tolerância de Eucalyptus Clonais ao Estresse Hídrico, Térmico e Bióticos, <https://www.ipef.br/techs/>). O projeto TECHS foi iniciado no ano de 2011 e objetivou analisar como os efeitos das interações entre os fatores de estresse hídrico, térmico e biótico em conjunto com o espaçamento e genética poderiam influenciar os processos de crescimento e sobrevivência de árvores individuais e/ou de povoamentos de eucalipto. Este projeto foi resultado de parceria entre empresas florestais, universidades e diferentes instituições de pesquisa que juntas conduziram a experimentação em 36 sítios florestais, distribuídos ao longo de todo território brasileiro e no norte do Uruguai (BINKLEY et al., 2017).

Foram utilizados dados de 17 locais de experimentação do projeto TECHS (“sítios subtropicais”: 10 e 23; “sítios tropicais”: 2, 4, 5, 7, 8, 9, 14, 19, 20, 22, 24, 29, 30, 31 e 33) distribuídos ao longo do gradiente climático do Brasil (Am, As, Aw, Cfa, Cfb, Cwa e Cwb, ALVARES et al. (2013)) (Figura 1). Os sítios do TECHS selecionados variaram de ambientes secos a áreas sem problemas com precipitação e temperaturas (Figura 1 e Tabela 1).

Figura 1 - Localização geográfica dos sítios do TECHS e sua classificação climática.



Fonte: Adaptado de Alvares et al., (2013). C - Zona subtropical húmida: Cwc: com o inverno seco, verão curto e fresco; Cwb: com o inverno seco e verão temperado; Cwa: com o inverno seco e verão quente; Csb: com o verão seco e temperado; Csa: com o verão seco e quente; Cfb: com o verão temperado; Cfa: com o verão quente. BSh: Zona seca, semiárida, com baixa latitude e altitude. A – Zona tropical: Aw: com inverno seco; As: com o verão seco; Am: de monção; Af: úmida.

Tabela 1- Caracterização dos sítios florestais do TECHS.

Sítio	Idade (meses)	Lat (°)	Long (°)	Altitude (m)	Cidade/Estado	Tipo	Clima	Tm (°C)	DEF (mm ano ⁻¹)	PPT (mm ano ⁻¹)
2	81	-24,21	-50	770	Arapoti-PR	Tropical	Cfb	18,14	-102,06	1677,23
4	76	-19,31	-42,4	243	Belo Oriente-MG	Tropical	Aw	23,35	-582,21	1055,95
5	71	-18,58	-42,9	873	Guanhães-MG	Tropical	Cwb	20,72	-691,93	959,57
7	72	-18,02	-50,9	681	Rio Verde-GO	Tropical	Aw	22,56	-590,87	1529,62
8	70	-11,86	-38,4	218	Inhambupe-BA	Tropical	Aw	25,36	-1128,14	775,71
9	76	-18,73	-47,9	969	Estrela do Sul-MG	Tropical	Cwb	23,40	-697,07	1426,58
10	77	-23,03	-48,5	869	Botucatu-SP	Subtropical	Cfb	20,83	-327,46	1567,76
14	75	-19,96	-51,6	480	Inocência-MS	Tropical	Aw	24,49	-697,84	1174,24
19	70	-12,2	-48,5	255	Peixe-TO	Tropical	Aw	26,79	-918,93	1208,86
20	28	-22,35	-47	633	Mogi Guaçu-SP	Tropical	Cwa	21,46	-394,21	1195,84
	21,87							-385,86	1265,98	
22	28	-24,23	-50,5	888	Telêmaco Borba-PR	Tropical	Cfb	18,63	-200,84	1586,74
	19,18							-159,86	1605,80	
23	77	-27,53	-50,1	870	Otacílio Costa-SC	Subtropical	Cfb	16,64	-94,53	1700,77
24	76	-22,73	-49	656	Borebi-SP	Tropical	Cfa	21,63	-307,05	1315,20
29	28	-3,44	-43,1	81	Urbano Santos-MA	Tropical	As	27,24	-1040,61	1156,67
	27,22							-901,44	1228,03	
30	30	-17,32	-43,8	848	Bocaiúva-MG	Tropical	Cwa	23,74	-1176,86	797,32
	23,05							-1289,21	778,95	
31	74	-16,34	-39,6	200	Eunápolis-BA	Tropical	Am	23,65	-479,22	1191,13
33	34	-23,85	-48,7	695	Buri-SP	Tropical	Cfa	19,45	-333,79	1318,34
	19,85							-401,2	1221,39	

Em que Lat representa a latitude, long a longitude, Tm a temperatura média, DEF é o déficit hídrico do solo e PPT é a precipitação. Os valores de Tm, DEF e PPT variam em função do período de tempo de análise dos dados.

Os clones que foram plantados nesses sítios representam os materiais genéticos de uso comum por indústrias florestais brasileiras e, que apresentam diferentes respostas adaptativas às diversidades ambientais apresentadas ao longo do território do Brasil (EVANGELISTA SILVA et al., 2020). Os sítios do projeto TECHS foram instalados entre janeiro e maio de 2012, e foi feita a padronização dos tratamentos silviculturais, espaçamento, preparo do solo e controle de ervas daninhas. Essa padronização garantiu a homogeneidade entre os locais e o isolamento dos fatores climáticos e edáficos, permitindo assim a captação da influência desses fatores sobre o crescimento das árvores.

Em cada um dos sítios do projeto TECHS foram testados 11 materiais genéticos, destes, 4 clones denominados de clones plásticos foram plantados em todos os sítios do TECHS devido a sua ampla adaptação a diferentes condições ambientais (Tabela 2), e os outros 7 clones testados variaram de acordo com as condições ambientais dos locais. Para os sítios do TECHS localizados em ambientes mais quentes, 7 clones tropicais foram plantados já em locais mais frios foram plantados 7 clones subtropicais (BINKLEY et al., 2017).

Tabela 2 - Os 18 genótipos de *Eucalyptus* plantados no TECHS, classificação do clone quanto a sua capacidade de adaptação e o clima de onde cada um desses clones foram desenvolvidos.

Clone	Genótipo	Tipo de clone	Clima da região de origem do clone*
A1	<i>E. urophylla</i> x sp	Plástico	Cwa
B2	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	Tropical	Aw
C3	<i>E. grandis</i> x <i>E. camaldulensis</i>	Plástico	As
D4	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Tropical	Aw
E5	<i>E. urophylla</i>	Tropical	Cwa
F6	<i>E. benthamii</i>	Subtropical	Cfb
G7	<i>E. urophylla</i>	Tropical	Cwa
H8	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Tropical	Am
I9	<i>E. dunnii</i>	Subtropical	Cfb
J1	<i>E. benthamii</i>	Subtropical	Cfb
K2	<i>E. saligna</i>	Plástico	Cfb
L3	<i>E. urophylla</i> x <i>E. globulus</i>	Subtropical	Cfb
M4	<i>E. dunnii</i>	Subtropical	Cfb
N5	<i>E. dunnii</i>	Subtropical	Cfb
O6	<i>E. grandis</i>	Subtropical	Cfb
P7	<i>E. urophylla</i> x <i>E. brassiana</i>	Tropical	As
Q8	<i>E. grandis</i> x sp	Plástico	Af
R9	<i>E. urophylla</i>	Tropical	Aw

Fonte: Adaptado de Binkley et al. (2017) *Classificação climática de Köppen (ALVARES et al., 2013).

Cada um desses clones foi plantado em uma única parcela, com espaçamento fixo de 3 x 3 m, totalizando 80 árvores por parcela (com área fixa de 720m²). Além disso, cada parcela possuía uma borda, denominada de parcelas destrutivas, com 40 árvores (cinco linhas com 8 árvores, espaçamento 3 x 3 m) disponíveis para que as amostragens destrutivas fossem feitas ao longo do desenvolvimento das análises do projeto TECHS (BINKLEY et al., 2017).

Binkley et al., (2017) destacam todos os detalhes silviculturais adicionais que foram conduzidos no experimento do TECHS.

2.2 Variáveis meteorológicas

Os dados meteorológicos foram obtidos das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET (www.inmet.gov.br) localizadas próximas aos municípios onde os sítios do TECHS foram instalados, e, de estação meteorológica local, para o período entre 09/12/2011 a 17/09/2018. Caso existissem dados faltantes, esses dados foram preenchidos pelo uso de outras bases meteorológicas de acordo com a metodologia de preenchimento de falhas descritas por Elli et al. (2019).

Foram utilizadas três variáveis meteorológicas médias abrangendo o período de plantio e avaliação específicos de cada um dos sítios TECHS utilizados nessa pesquisa (Tabela 1): a temperatura (T_m , °C), precipitação (PPT, mm) e o déficit hídrico do solo (DEF, mm). A variável DEF foi obtida a partir do desenvolvimento do balanço hídrico climatológico sequencial em escala mensal com base no método de Thornthwaite e Mather (CAMARGO, 1962). A T_m foi obtida por meio da realização da média aritmética das temperaturas médias mensais. Já a precipitação média foi obtida por meio da soma da precipitação acumulada em cada mês divididas pelo período de tempo de análise de cada sítio do TECHS.

2.3 Caracterização dos dados do inventário florestal

A base de dados utilizada neste estudo refere-se a 1262 árvores (amostradas destrutivamente e distribuídas entre os 18 genótipos de *Eucalyptus* plantados nos 17 sítios de experimentação do projeto TECHS. As datas de coleta dos dados variaram entre os sítios, de 01/07/2014 a 01/10/2018 (Tabela 3).

Tabela 3 - Distribuição do número das árvores amostradas destrutivamente em relação aos sítios, idades e clones.

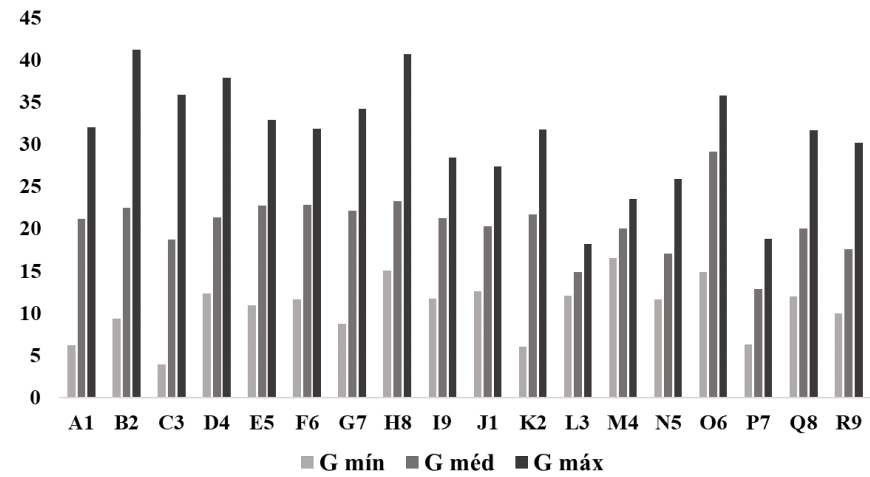
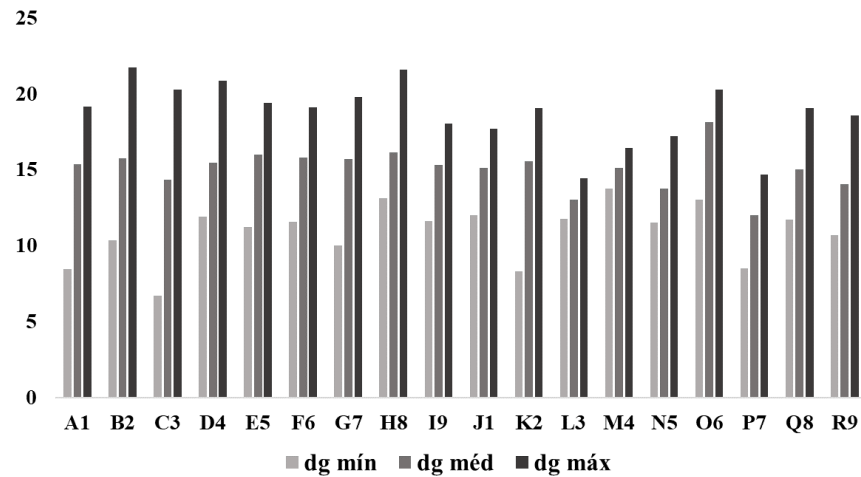
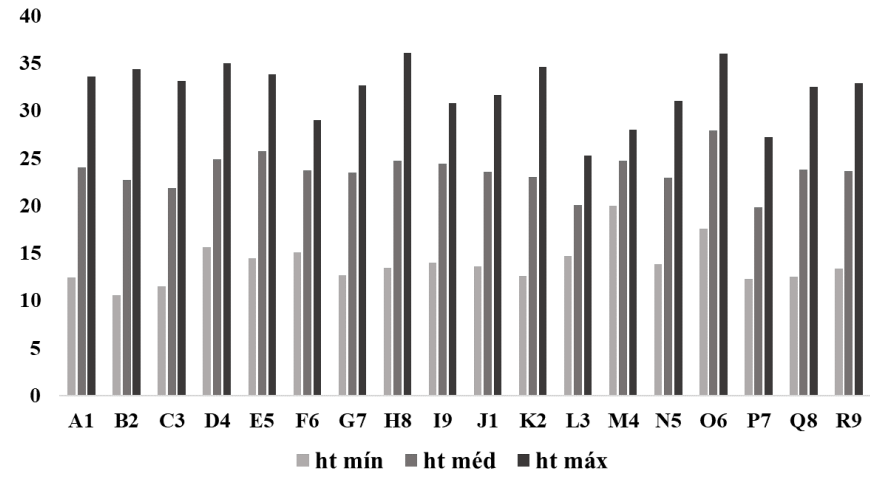
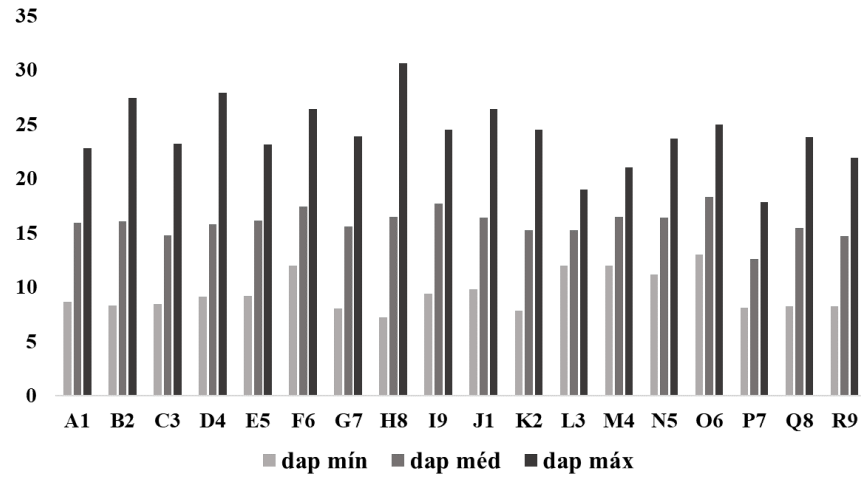
Sítio	Idade (meses)	N. de árvores	Clones
2	81	42	A1, C3, E5, G7, K2 e Q8
4	76	77	A1, B2, C3, D4, E5, G7, H8, K2, P7, Q8 e R9
5	71	71	A1, B2, C3, D4, E5, G7, H8, K2, P7, Q8 e R9
7	72	63	A1, C3, D4, E5, G7, H8, P7, Q8 e R9
8	70	68	A1, B2, C3, D4, E5, G7, H8, P7, Q8 e R9
9	76	70	A1, B2, C3, D4, E5, G7, H8, P7, Q8 e R9
10	77	77	A1, C3, F6, I9, K2, J1, L3, M4, N5, O6 e Q8
14	75	73	A1, B2, C3, D4, E5, G7, H8, K2, P7, Q8 e R9
19	70	20	A1, C3 e P7
20	28	26	A1, B2, C3, K2 e P7
	72	81	A1, B2, C3, D4, E5, G7, H8, K2, P7, Q8 e R9
22	28	26	A1, B2, C3, K2 e P7
	73	73	A1, B2, C3, D4, E5, G7, H8, K2, P7 e Q8
23	77	33	A1, F6, I9, K2 e J1
24	76	41	A1, C3, D4, E5, K2 e Q8
29	28	18	A1, B2, C3, K2 e P7
	78	69	A1, B2, C3, D4, E5, G7, H8, P7 e Q8
30	30	19	A1, B2, C3 e P7
	73	86	A1, B2, C3, D4, E5, G7, H8, P7 e Q8
31	74	35	A1, B2, D4, K2 e Q8
	34	68	A1, B2, C3, D4, E5, F6, G7, H8, I9, K2, J1, L3, N5, O6, Q8 e R9
33			A1, B2, C3, D4, E5, F6, G7, H8, I9, K2, J1, L3, M4, N5, P7, O6, Q8 e R9
	76	126	
Total		1262	

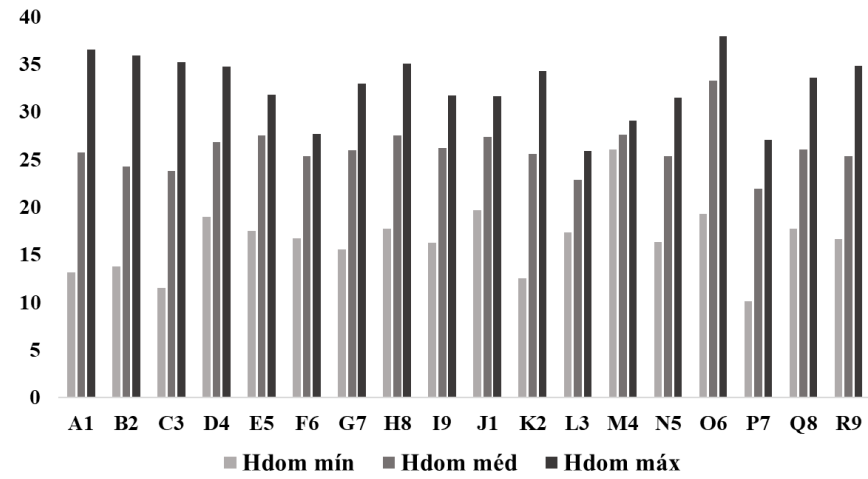
Em cada parcela, a cada seis meses foi desenvolvido o inventário florestal, e coletados dados do diâmetro à 1,30 m do solo (dap, cm) e a altura total (Ht, m). Foram calculados também a altura dominante (Hdom, m), considerando as 100 árvores mais grossas por hectare

(ASSMANN, 1970), a área basal (G , $m^2 ha^{-1}$) e o diâmetro médio quadrático (dg , cm) de cada parcela. Em cada local, as árvores foram selecionadas de acordo com as suas classes de tamanho. Após, foram abatidas e mensuradas as circunferências do tronco nas alturas: base (o mais próximo da superfície do solo possível), dap , 25%, 50%, 75% e 100%. Por fim, o método geométrico proposto por Scolforo (2005) permitiu a recuperação dos diâmetros após 1,3m a cada 1m até o topo da árvore (mínimo de 5 cm de diâmetro).

A análise descritiva das variáveis de inventário nas parcelas clonais ($Hdom$, G e dg) e das árvores abatidas (dap e Ht) é apresentada na Figura 2.

Figura 2 - Resumo descritivo dos dados em relação a cada um dos clones.





2.4 Desenvolvimento do modelo de afilamento

O modelo de afilamento foi construído seguindo a metodologia proposta por De Oliveira et al. (2022) que estudaram povoamentos de *Pinus taeda* submetidos a diferentes regimes de desbastes, localizados no sul do Brasil. Essa metodologia considera 3 etapas, conforme descritas a seguir:

Etapa 1 - Modelo base de afilamento do fuste das árvores

A primeira etapa foi a escolha e uso do modelo de expoente variável de Kozak (1988) no processo de estimativa dos diâmetros localizados em diferentes alturas ao longo do fuste das árvores (para descrever o afilamento) e dos seus respectivos volumes, e é representado pela expressão (1). Optou-se por não testar modelos diferentes, já que o modelo de Kozak (1988) tem uso difundido em estudos florestais devido ao seu bom desempenho estatístico (ANDRADE; FREITAS; TERRA, 2021; DE OLIVEIRA et al., 2022).

$$d_i = \alpha_0 \text{dap}^{\alpha_1} \alpha_2^{\text{dap}} X^{\left[\beta_1 z^2 + \beta_2 \ln(z+0,001) + \beta_3 \sqrt{z} + \beta_4 \exp(z) + \beta_5 \left(\frac{\text{dap}}{\text{ht}} \right) \right]} + \varepsilon_i \quad (1)$$

Em que, os $\alpha_{i,s}$ e $\beta_{i,s}$ são os coeficientes fixos do modelo a serem estimados; d_i representa os diâmetros (cm) localizados em diferentes alturas ao longo do fuste das árvores; dap é o diâmetro localizado à 1,3 m de altura; $x = \left[\left(1 - \sqrt{h_i / \text{ht}} \right) / \left(1 - \sqrt{1,3 / \text{ht}} \right) \right]$; h_i é a altura (m) ao longo do fuste; ht é a altura total (m) da árvore; $z = h_i / \text{ht}$; \ln é o logaritmo natural; \exp é a base dos logaritmos naturais, é o ε_i é erro aleatório associado ao modelo com média $E \{ \varepsilon_i \} = 0$ e variância $\sigma^2 \{ \varepsilon_i \} = \sigma^2$.

Etapa 2 - Inserção de variáveis auxiliares no expoente do modelo base

A segunda etapa foi a inserção de variáveis auxiliares no expoente do modelo. Uma vez que, vários fatores são responsáveis por alterarem a forma e o afilamento do fuste das árvores (SCHNEIDER, 2018), desta forma, a inserção dessas variáveis nas funções de afilamento auxiliam o processo de generalização dos modelos. Foi testado a inclusão de três variáveis climáticas, T_m , P_{pt} e DEF (valor numérico absoluto), e a idade das árvores, de forma simples e/ou como resultado da multiplicação destas variáveis com o fator z ($z = h_i / \text{ht}$). Foram testadas

todas as combinações possíveis de adição de variáveis no expoente do modelo de Kozak (1988), conforme apresentado na expressão (2).

$$d_i = \alpha_0 \text{dap}^{\alpha_1} \alpha_2^{\text{dap}} X^{\left[\begin{array}{l} \beta_1 z^2 + \beta_2 \ln(z+0,001) + \beta_3 \sqrt{z} + \beta_4 \exp(z) + \beta_5 \left(\frac{\text{dap}}{\text{ht}} \right) + \beta_6 (\text{Tm ou zTm}) + \\ \beta_7 (\text{PPT ou zPPT}) + \beta_8 (\text{DEF ou zDEF}) + \beta_9 (\text{I ou zI}) \end{array} \right]} + \varepsilon_i \quad (2)$$

Etapa 3 - Inserção de variáveis auxiliares no expoente do modelo base + restrição algébrica

A terceira etapa foi realizada após a seleção do melhor modelo com a inclusão de variáveis citadas na etapa 2. Foi testado também a calibração do modelo, por meio do uso de um diâmetro superior (d_s) localizado na altura de 6 metros (DE OLIVEIRA et al., 2022). O método da restrição algébrica utilizado foi o proposto por Cao (2009), que em resumo, força o modelo a passar pelo dap e por um d_s , de tal forma que modifica parâmetro médio α_0 por um parâmetro α_0' específico para cada uma das árvores.

Para a obtenção do parâmetro α_0' específico por árvore o primeiro passo foi isolar o parâmetro α_0 do modelo e aplicar as seguintes restrições: d_i igual ao d_s localizado na altura de 6 m, e h_i igual à 6 m. Em seguida, foi realizado a substituição do parâmetro α_0 pelo parâmetro α_0' no modelo, conforme exemplificado na expressão 3.

$$d_i = \alpha_0' \text{dap}^{\alpha_1} \alpha_2^{\text{dap}} X^{\left[\begin{array}{l} \beta_1 z^2 + \beta_2 \ln(z+0,001) + \beta_3 \sqrt{z} + \beta_4 \exp(z) + \beta_5 \left(\frac{\text{dap}}{\text{ht}} \right) + \beta_6 (\text{Tm ou zTm}) + \\ \beta_7 (\text{PPT ou zPPT}) + \beta_8 (\text{I ou zI}) + \beta_9 (\text{DEF ou zDEF}) \end{array} \right]} + \varepsilon_i \quad (3)$$

2.5 Avaliação dos modelos

Os resultados foram avaliados em relação ao diâmetro e ao volume de madeira das árvores, e para fins de avaliação dos modelos, a base de dados foi dividida de forma aleatória com as porcentagens de 70% e 30%, respectivamente, para a base de ajuste e validação. Os

critérios de informação Akaike (AIC) e Bayesiano (BIC) foram utilizados na etapa de ajuste para avaliar a precisão da abordagem de modelagem.

A raiz do erro quadrático médio (RMSE, expressão 4), erro absoluto médio (MAE, expressão 5) e erro médio (T, expressão 6) foram as estatísticas utilizadas para avaliar o desempenho dos modelos nas etapas de ajuste e validação. Além disso, análises gráficas foram utilizadas para avaliar o comportamento das estimativas de diâmetro ou volume de madeira das árvores.

$$\text{RMSE}(\%) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_o - y_e)^2}{n}}}{\frac{\sum_{i=1}^n (y_e)}{n}} \quad (4)$$

$$\text{MAE}(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{|y_o - y_e|}{y_o} \right)}{n} 100 \quad (5)$$

$$\text{T}(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{y_o - y_e}{y_o} \right)}{n} 100 \quad (6)$$

Em que i refere-se as medições dos diâmetros (cm) em diferentes alturas ao longo dos fustes ou volume de madeira das árvores individuais (variando entre 1 a n), y_o são os valores observados e y_e os valores estimados de diâmetro ou volume de madeira.

Em relação ao volume de madeira das árvores observado e estimado, foi realizado o cálculo seguindo a fórmula de Smalian. Foram considerados as seguintes seções: a altura do toco de 0,1 m; 0,7 m; 1,3 m; e em seguida, de 1 em 1 m até altura equivalente ao diâmetro de 5 cm.

O *software* R versão 4.1.0 (R Core Team 2021) foi utilizado no processamento dos dados. Para ajuste do modelo original de Kozak (1988) e de seus modelos derivados a função *nls* foi utilizada. A montagem dos gráficos foi feita usando o pacote *ggplot2* (WICKHAM, 2016). Também foi utilizado a função *mywhiskers* do pacote *lmfor* (MEHTÄTALO; KANSANEN, 2022) para gerar as barras de erro médio nos gráficos de resíduos, no qual, foi

considerado 10 classes de diâmetros e volumes padronizados, com intervalo de confiança de 95%.

3 RESULTADOS

3.1 Inclusão de variáveis na função de afilamento

O modelo original de Kozak (1988) após ser ajustado apresentou todos os parâmetros estatisticamente significativos ($\alpha = 0,05$). A incorporação das variáveis auxiliares no expoente do modelo base resultaram em melhorias estatísticas de previsão do diâmetro das árvores, no qual, foram selecionadas as variáveis z^*I e z^*DEF (expressão 7), e o padrão estatístico de significância dos parâmetros foram mantidos ($\alpha = 0,05$).

$$d_i = \alpha_0 \text{dap}^{\alpha_1} \alpha_2^{\text{dap}} X^{\left[\beta_1 z^2 + \beta_2 \ln(z+0,001) + \beta_3 \sqrt{z} + \beta_4 \exp(z) + \beta_5 \left(\frac{\text{dap}}{\text{ht}} \right) + \beta_6 (zI) + \beta_7 (zDEF) \right]} \quad (7)$$

Os parâmetros ajustados desses modelos refletem características lógicas de crescimento biológico para povoamentos clonais de eucalipto. Os parâmetros estimados nos modelos (1) e (7) e seus respectivos erros padronizados são apresentados na Tabela 4. Todos os parâmetros foram significativos em $\alpha = 0,05$.

Tabela 4 - Valores estimados (VE) dos parâmetros e seus respectivos erros padronizados (EP).

Parâmetros	Equação 1	EP	Equação 7	EP
	Coeficientes		Coeficientes	
α_0	0,8907	0,0192	0,9397	0,0200
α_1	1,0595	0,0118	1,0330	0,0116
α_2	0,9977	0,0007	0,9989	0,0007
β_1	2,7339	0,0944	3,0600	0,0937
β_2	-0,7656	0,0245	-0,8161	0,0241
β_3	5,2468	0,1829	5,8590	0,1815
β_4	-2,8219	0,1032	-3,0590	0,1020
β_5	0,2949	0,0065	0,2539	0,0068
β_6			-0,0033	0,0002

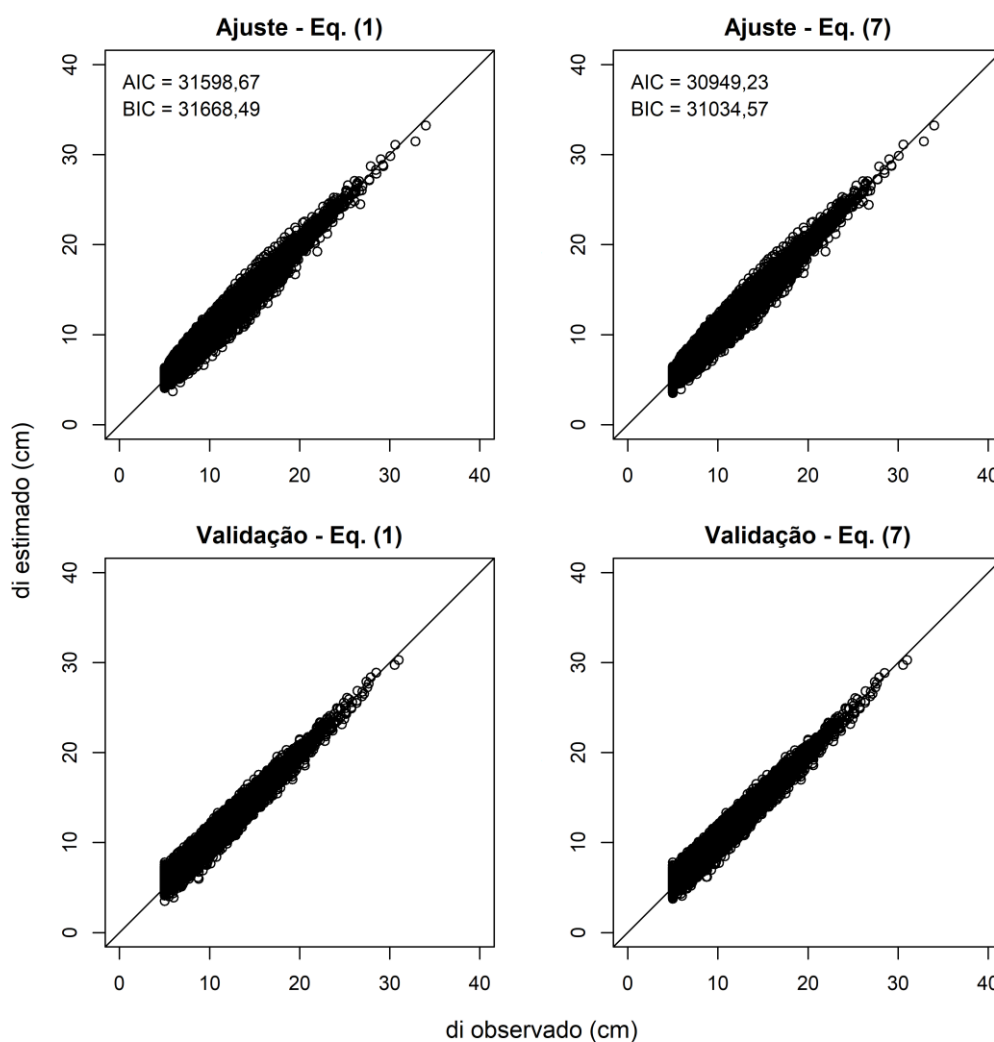
β_7

-0,000043

0,000003

Na Figura 3 são apresentados os gráficos 1:1 que demonstram o comportamento dos diâmetros estimados em função aos diâmetros observados, resultado dos modelos (1) e (7). É possível observar que os modelos demonstraram estimativas consistentes para os clones de eucalipto. E, ao comparar as estatísticas AIC e BIC, observou que o modelo (7) com a adição das variáveis z^*I e z^*DEF melhorou a qualidade das estimativas.

Figura 3 - Valores observados e estimados dos diâmetros ao longo do fuste e estatísticas de qualidade, das equações (1) e (7), para a base de ajuste e validação dos dados.



O modelo (7) foi o que apresentou resultados de maior acurácia em relação à estimativa do diâmetro ao longo do fuste das árvores e também na estimativa do volume de madeira das árvores individuais (m^3) (Tabela 5).

Tabela 5 - Estatísticas de acurácia aplicadas para avaliar o diâmetro ao longo do fuste (cm) e o volume individual das árvores (m³), estimados pelas funções de afilamento.

Equação	Base de dados	di (cm)			volume (m ³)		
		RMSE (%)	MAE (%)	T (%)	RMSE (%)	MAE (%)	T (%)
(1)	ajuste	5,17	4,46	-0,42	8,78	6,36	-0,95
	validação	5,78	5,09	-1,00	9,61	7,23	-1,96
(7)	ajuste	5,08	4,33	-0,37	8,75	5,98	-0,73
	validação	5,61	4,91	-0,92	9,49	6,68	-1,65

3.2 Calibração do modelo com inclusão do diâmetro superior

Após o modelo (expressão 7) com a inclusão das variáveis ter sido selecionado por proporcionar melhorias estatísticas em comparação ao modelo (expressão 1) em sua forma original, foi realizada a calibração específica por árvore, considerando o $ds = 6$ m. O parâmetro médio α_0 foi alterado para o parâmetro específico por árvores, denominado de α_0' , e foi observado melhorias estatísticas (Tabela 6) em comparação ao modelo não calibrado.

Tabela 6 - Estatísticas de acurácia aplicadas para avaliar os diâmetros estimados ao longo do fuste (cm) e o volume de madeira por árvore individual (m³), estimados pela equação (7) não calibrada e equação (7) + $ds = 6$ m calibrada.

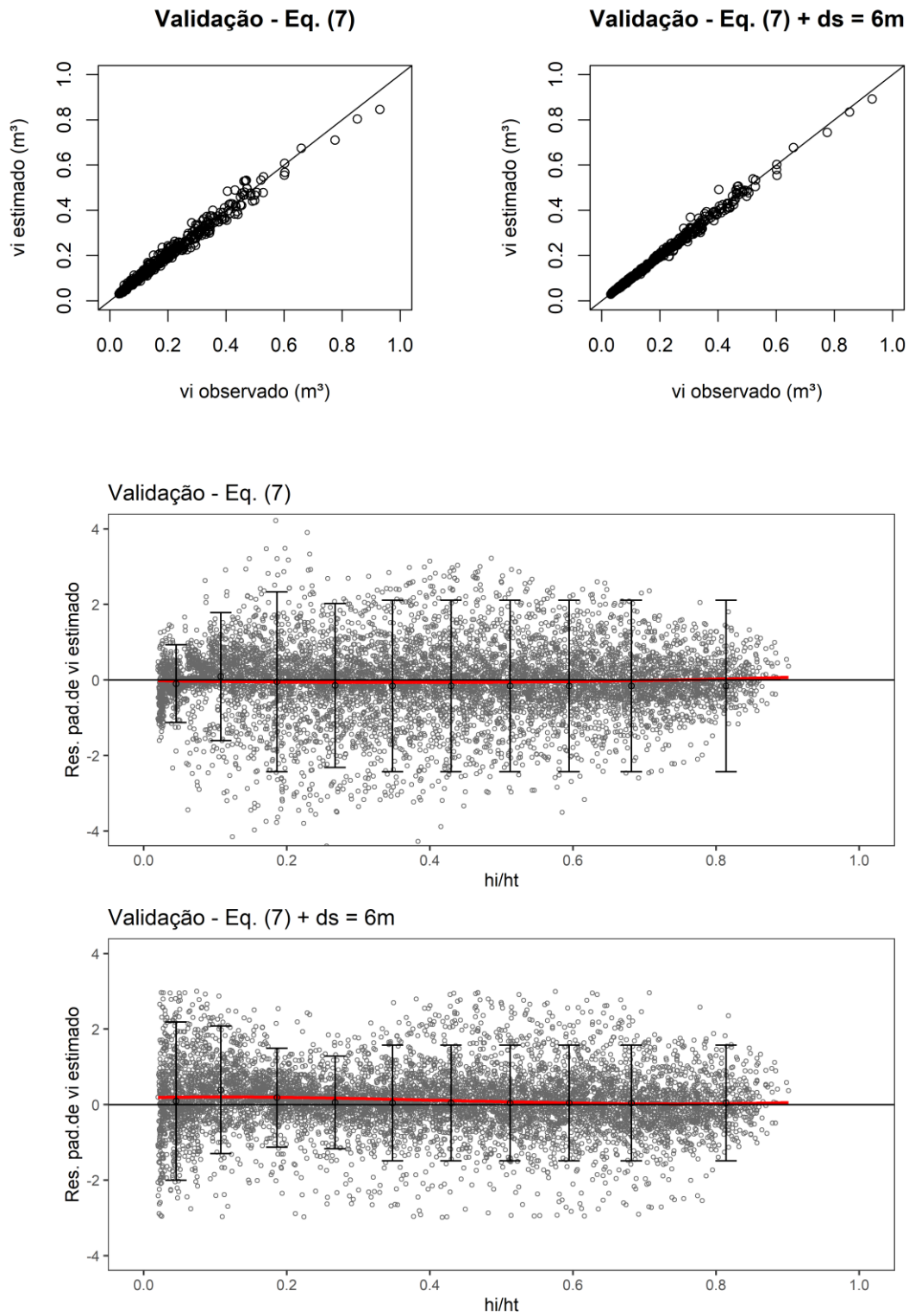
Equação	Base de dados	di (cm)			volume (m ³)		
		RMSE (%)	MAE (%)	T (%)	RMSE (%)	MAE (%)	T (%)
(7)	ajuste	5,08	4,33	-0,37	8,75	5,98	-0,73
	validação	5,61	4,91	-0,92	9,49	6,68	-1,65
(7) + ds = 6m	ajuste	4,24	3,42	0,23	4,93	2,98	0,96
	validação	4,70	3,82	0,05	5,85	3,18	0,96

Observou-se que ao realizar a generalização e calibração dos dados ((7) + $ds = 6$ m) (Tabela 6) houve a redução do erro do modelo, para os dados de ajuste e validação, e consequentemente aumento da acurácia em comparação ao modelo base (equação 7). Em relação a variável diâmetro, para os dados de ajuste e validação, o RMSE reduziu menos de 1%. Resultado similar foi verificado para a estatística MAE para a base de ajuste e, já em relação a validação, a redução foi levemente superior, igual a 1,09%. Mas, o maior impacto foi nas estimativas de volume de madeira das árvores individuais (m³) em que o RMSE reduziu 3,82% e 3,64% (ajuste e validação) e o MAE 3,00% e 3,50% (ajuste e validação).

A análise gráfica dos valores observados e estimados dos volumes de madeira (m^3) das árvores e os resíduos padronizados gerados para a variável volume de madeira (m^3) ao longo do caule para o modelo (7) e modelo (7) + ds = 6m são apresentados na Figura 4.

Com os resultados das análises das Tabelas 5 e 6, e Figuras 3 e 4, verifica-se que o melhor modelo foi a equação calibrada (equação (7) + ds = 6m), o que mostra a necessidade de inserção de variáveis para aumentar a flexibilização dos modelos bem como expressar os possíveis efeitos do ambiente sob a forma de afilamento do fuste das árvores, e conseqüentemente aos dados de volume de madeira das árvores.

Figura 4 - Valores observados e estimados dos volumes de madeira (m^3) das árvores e os resíduos padronizados de vi estimados pela equação (7) e equação (7) + $ds = 6m$ (calibrada) para a base de validação.



3.3 Análise do comportamento de dois clones em 4 sítios contrastantes

Para analisar se o comportamento do afilamento do fuste dos clones é variável de acordo com o ambiente na qual estão inseridos, e se os modelos propostos conseguem captar essa variabilidade, foi realizada a análise gráfica dos valores observados e estimados de d_i (cm) das árvores ao longo do caule com uso dos modelos (1), modelo (7) e modelo (7) + $d_s = 6m$ (Figuras 5, 6, 7 e 8). Para isso, foram selecionados dois clones plantados em todos os sítios de experimentação do projeto TECHS, os clones A1 e C3, localizados em ambientes com características climáticas contrastantes, sítios 2, 20, 29 e 30. A escolha desses sítios foi de forma randômica.

Figura 5 - Valores observados e estimados dos d_i (cm) das árvores pelas equações (1), (7) e a equação (7) + $d_s = 6m$ (calibrada) para o sítio 2.

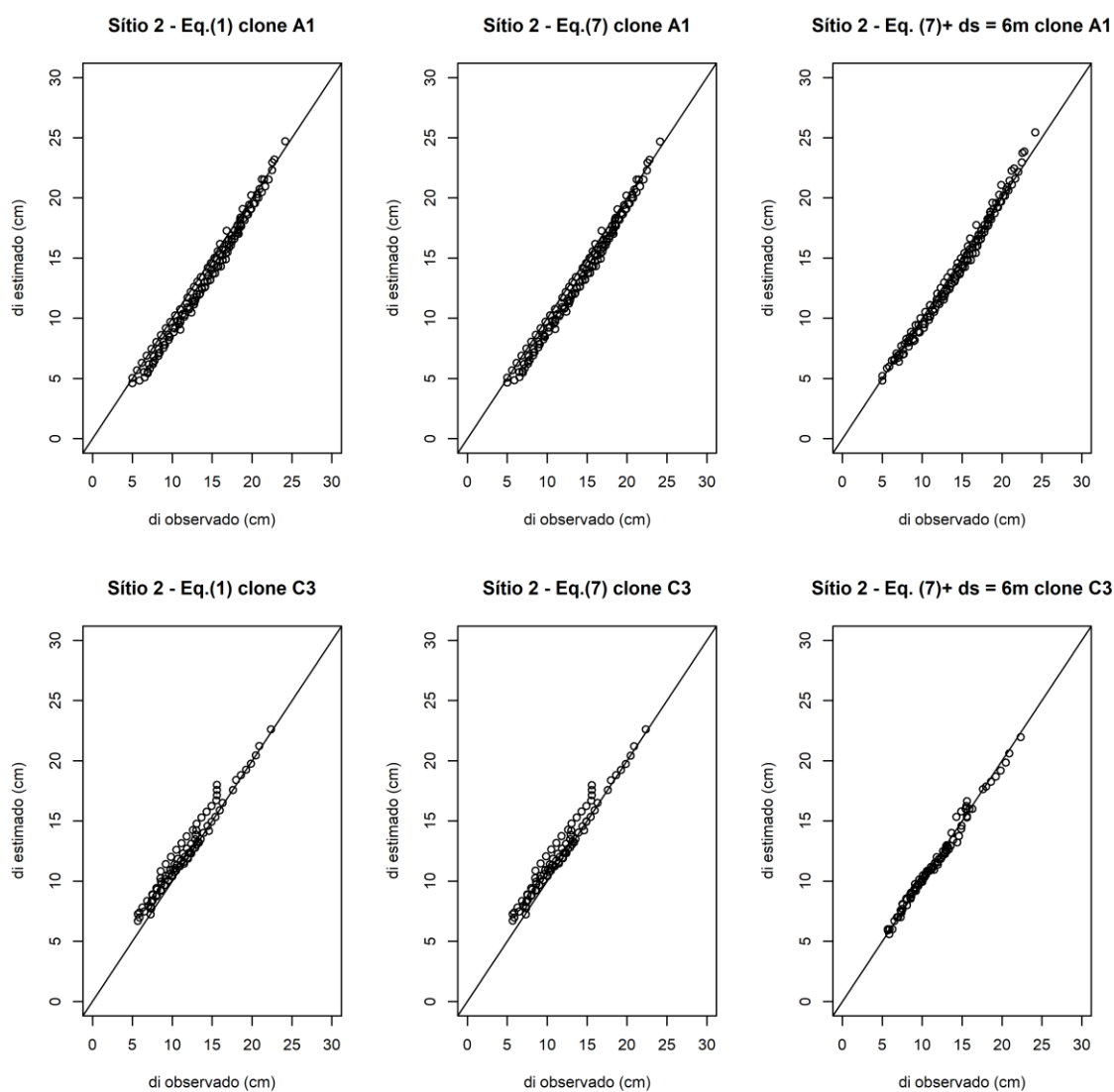


Figura 6 - Valores observados e estimados dos di (cm) das árvores pelas equações (1), (7) e a equação (7) + $ds = 6$ m (calibrada) para o sítio 20.

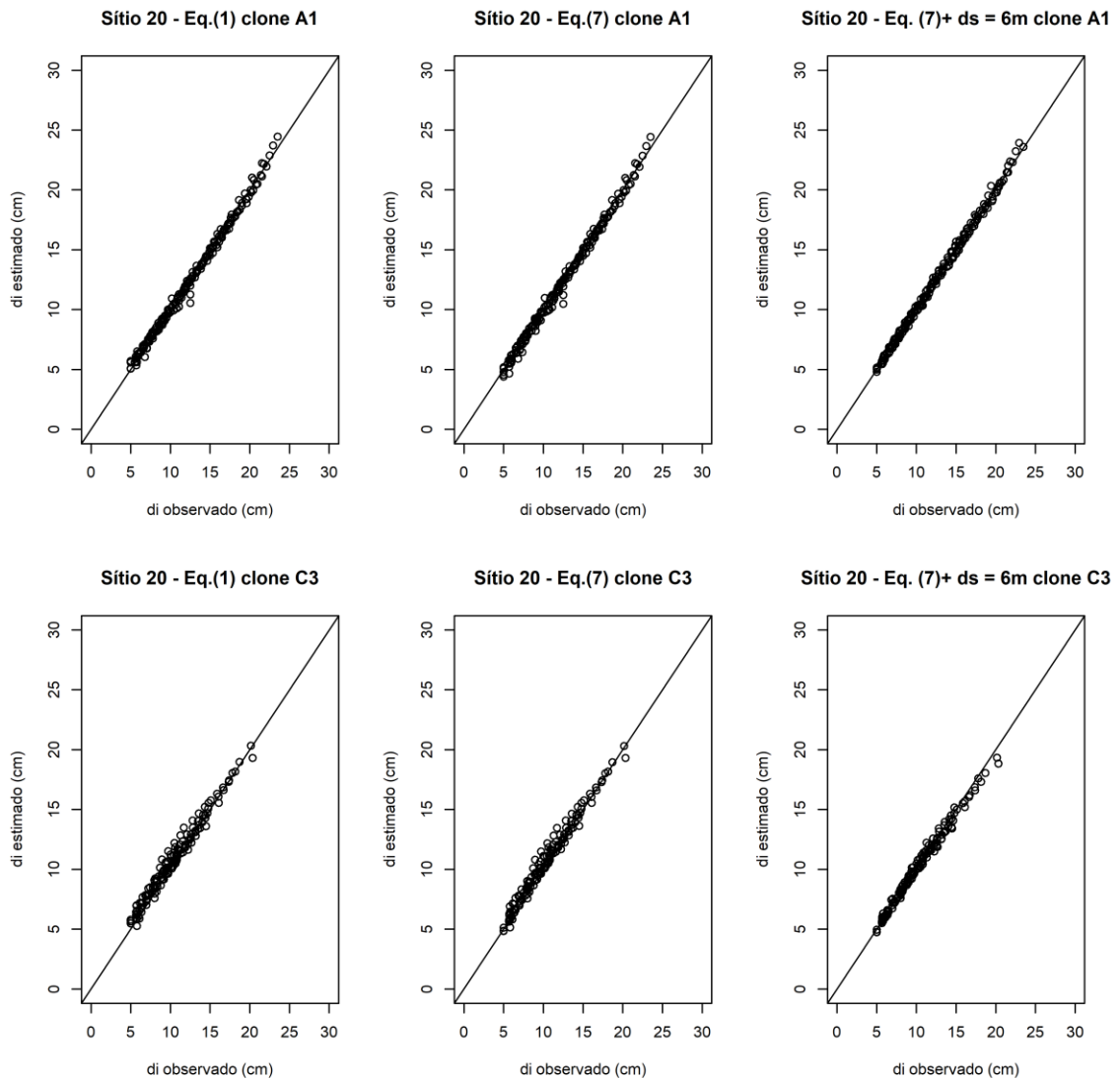


Figura 7 - Valores observados e estimados dos di (cm) das árvores pelas equações (1), (7) e a equação (7) + $ds = 6$ m (calibrada) para o sítio 29.

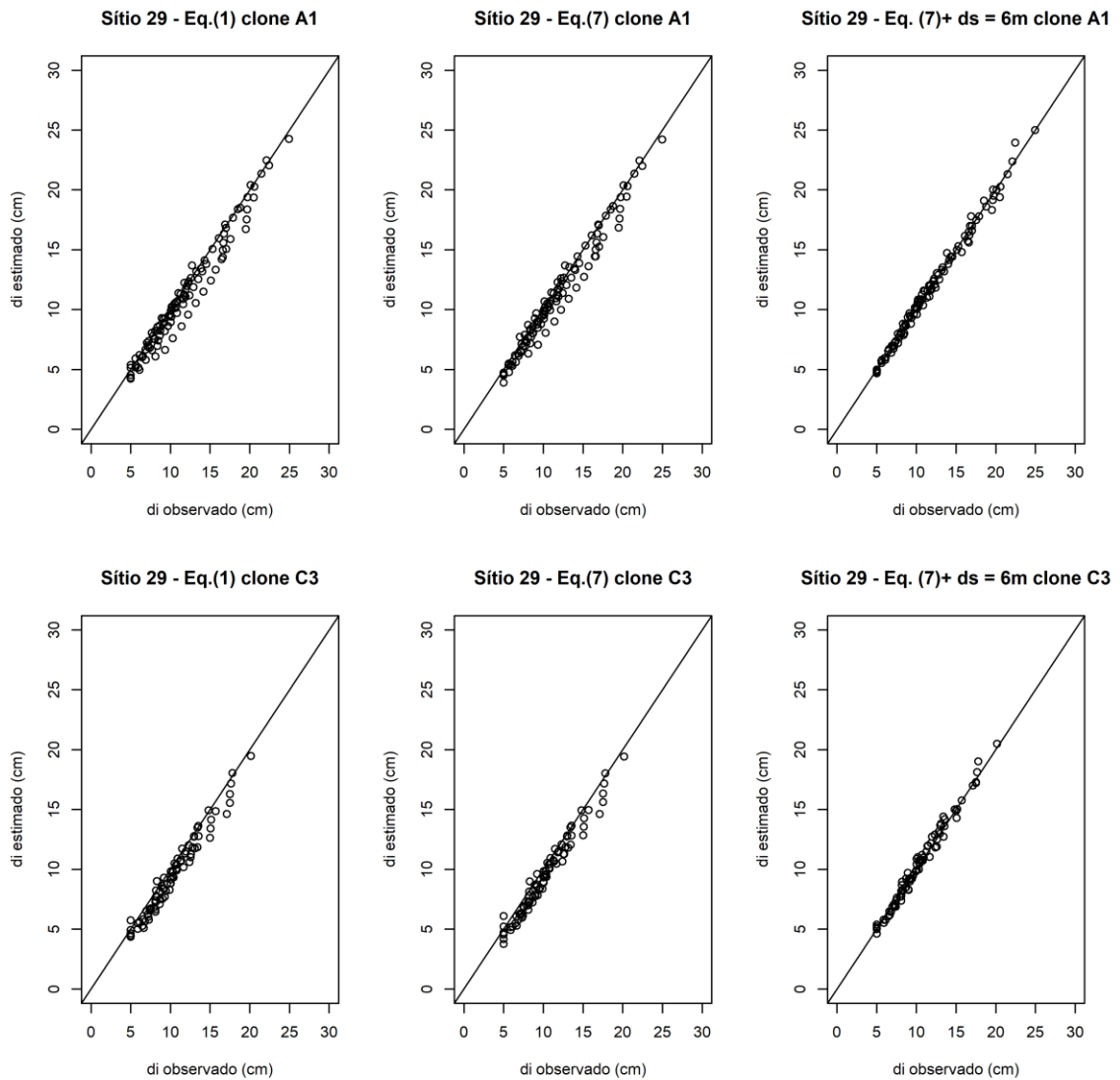
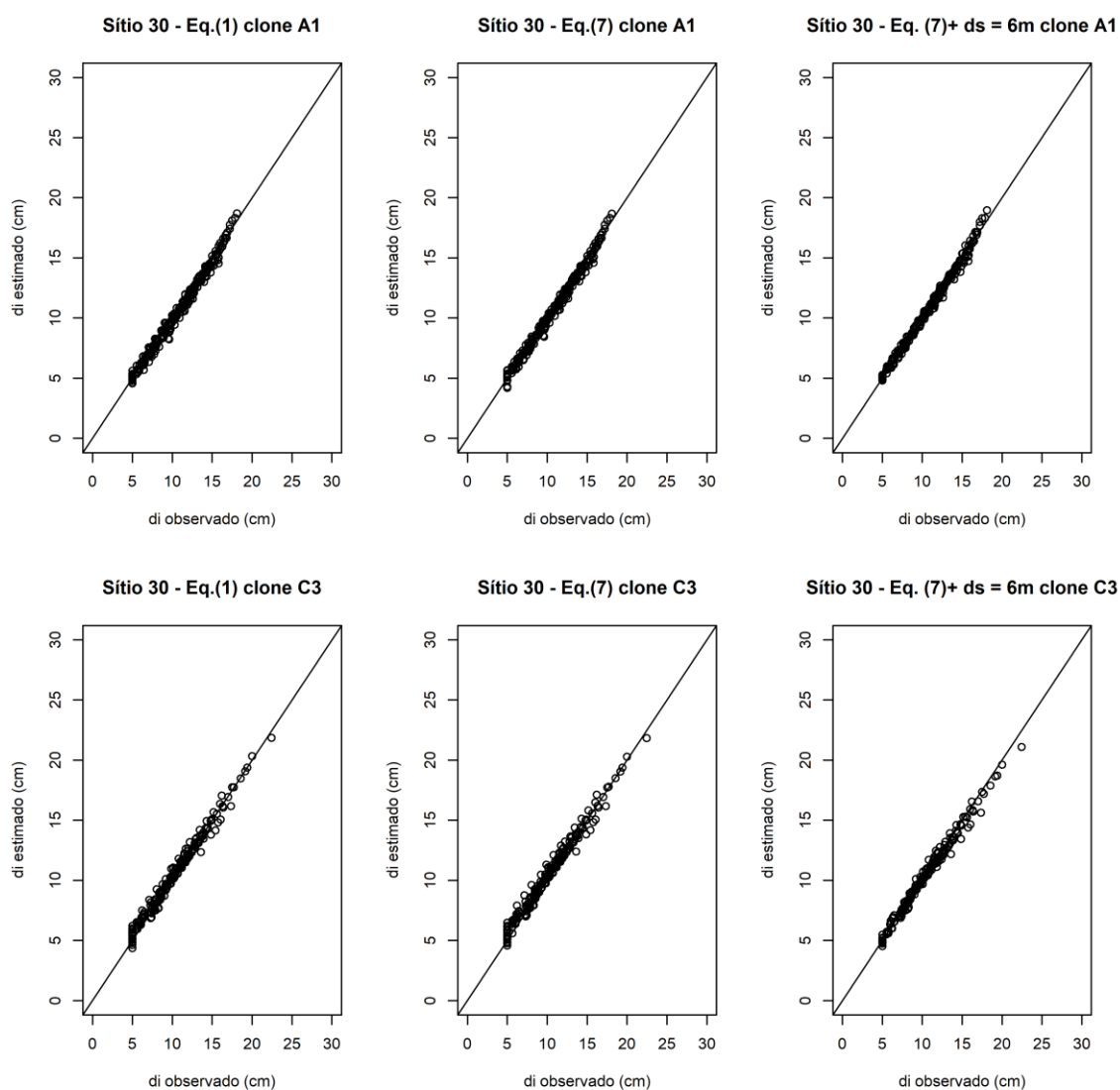


Figura 8 - Valores observados e estimados dos di (cm) das árvores pelas equações (1), (7) e a equação (7) + ds = 6 m (calibrada) para o sítio 30.



4 DISCUSSÃO

Este artigo fornece uma abordagem útil e precisa do afilamento do fuste de clones de eucalipto e a predição do volume de madeira para dados proveniente de uma área extensa do Brasil. O conjunto de dados do experimento TECHS é único e oferece ampla informação sobre a produtividade clonal no Brasil, abrangendo diferentes condições climáticas (BINKLEY et al., 2017).

Pesquisas sobre afilamento, como essa, são importantes para a descrição, modelagem, avaliação e gerenciamento de florestas, e é utilizada para descrever com precisão o formato do

fuste das árvores (SALEKIN et al., 2021) localizadas em regiões com diferentes características ambientais. Os seus principais usos são a previsão de diâmetro em qualquer altura da árvore e/ou previsão do volume de madeira das árvores (MEHTÄTALO; LAPPI, 2020).

Entre os modelos que são de uso comum para tal finalidade nos estudos florestais destaca-se o modelo de Kozak (1988). Andrade (2014) trabalhando com *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis* com idade de até sete anos, observou que o desempenho das estimativas por Kozak (1988) foi melhor do que os modelos compatíveis e sigmóides analisados em sua pesquisa. Uma série de outras aplicações com bons resultados deste modelo envolvendo diferentes espécies florestais já foram relatadas (DE OLIVEIRA et al., 2022; DE SOUZA et al., 2018; KO et al., 2019; SCHRÖDER et al., 2015), fato que reforça o potencial deste modelo como modelo base em pesquisas de afilamento.

Desta forma, para modelar o afilamento de árvores de 18 genótipos de *Eucalyptus* plantados em 17 sítios de experimentação do projeto TECHS, avaliamos a inserção de alguns fatores que têm alta relação com a forma do fuste das árvores, em conjunto com a calibração de um diâmetro superior extra localizado na altura de 6 metros na função de expoente variável de Kozak (1988) para melhorar o desempenho da modelagem.

A adição de parâmetros na modelagem do afilamento do fuste das árvores pode aumentar a flexibilidade do modelo ao comparar com o modelo baseado exclusivamente nos fundamentos matemáticos de representação do fuste das árvores, por adicionar possíveis efeitos do ambiente sobre o formato das árvores (DE OLIVEIRA et al., 2022).

Dentre os parâmetros climáticos analisados, o déficit hídrico foi o mais relevante para prever sobre o afilamento dos fustes de eucalipto, controlando assim a interação entre os genótipos e os ambientes contrastantes. O uso dessa variável climática na modelagem florestal se faz necessário, já que nele fica embutido o efeito de outras variáveis ambientais relacionadas ao tipo de solo, clima e a topografia (SCOLFORO et al., 2019).

Além disso, o déficit hídrico do solo tem a capacidade de influenciar de forma direta alguns processos dentro das árvores, como por exemplo, a distribuição da alocação de recursos entre a raiz ou parte aérea das árvores, com a maior porcentagem dessa alocação para órgãos abaixo do solo (LEDO et al., 2018) em ambientes de maior déficit hídrico. Alterações na quantidade de radiação absorvida, por meio das mudanças geradas no índice de área foliar e na altura das árvores também poderão ocorrer (CHRISTINA et al., 2015). A influência do efeito do déficit hídrico do solo sobre o crescimento e desenvolvimento das árvores já foi observado em estudos anteriores (CHAMBI-LEGOAS et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2021; TNG et al., 2018).

Outro parâmetro selecionado para a inclusão no modelo de expoente variável de Kozak (1988) foi a idade das árvores. Kohler et al. (2016) analisaram a conicidade do caule de árvores de *Pinus taeda* em função da idade, e concluíram que árvores mais jovens são mais cônicas e que ao longo do tempo melhoram a forma, ficando, mais cilíndricas. Corroborando com esse fato, Liu et al. (2020) citam que a forma do caule das árvores é diretamente influenciada pela idade, e que seus efeitos costumam ser desconsiderados na maioria das equações de afilamento das árvores. O efeito da idade sobre as formas do caule é uma característica específica de cada espécie ou clone, devido a taxa de crescimento ser variável ao longo do tempo.

Além da inclusão de variáveis, foi avaliado se a inclusão de um diâmetro superior localizado na altura de 6 m do fuste iria melhorar a qualidade do ajuste do modelo. Pois, de acordo com Burkhart e Tomé (2012), a inclusão de diâmetros superiores em funções de afilamento é uma das melhores abordagens para a captação da variabilidade entre árvores nos modelos de afilamento.

A coleta de dados de diâmetros extras durante o desenvolvimento de práticas de inventários florestais já tem sido viabilizada pelos avanços tecnológicos do sensoriamento remoto e a inserção desta prática dentro do dia-a-dia das atividades do setor florestal. A exemplo, Windrim e Bryson (2020) pesquisaram *Pinus radiata* localizados em plantios comerciais na Austrália com idade entre 23 e 26 anos, e desenvolveram uma abordagem de detecção automatizada do afilamento do fuste dessas árvores a partir de dados de LiDAR (Light Detection and Ranging). Metodologia semelhante foi apresentada por Kuželka; Slavík e Surový (2020) que estudaram plantios homogêneos de *Picea abies* e *Pinus sylvestris* na República Tcheca. Estes autores conseguiram detectar individualmente 98% e 99% das árvores presentes nas parcelas pesquisadas e estimar o diâmetro do caule das árvores a partir de dados de varredura a laser (LiDAR) com erro de posição médio de 13 cm, e estimativas de dap com viés de 0,1 cm.

A inserção dessa medida extra de diâmetros superiores nos modelos de afilamento das árvores pode ser feita por meio do uso de diferentes formas metodológicas, como as que Cao e Wang (2015) e Burkhart e Tomé (2012) abordaram em seus estudos. Westfall et al. (2016) citam que essa prática aumenta a precisão das estimativas do volume de madeira das árvores individuais e, portanto, deve-se preferir a utilização de modelos que fazem uso desse tipo de informação.

Dessa forma, para comparar a existência de ganhos na modelagem fizemos a comparação entre os resultados apresentados pelo modelo (7) e do modelo (7) + ds = 6m, com a inserção das variáveis z^*I e Z^*DEF e do diâmetro superior pelo método da restrição algébrica

(CAO, 2009). De forma geral, pode-se dizer que ambos apresentaram bons resultados na análise residual do volume de madeira (Figura 4). Entretanto, houve uma melhor distribuição das barras de erro médio no gráfico de resíduos para o modelo $(7) + ds = 6m$, já que os resíduos padronizados do vi estimados ficaram entre 2 e -2, e em contrapartida para o modelo (7) esses valores foram muitas vezes superiores. Os resultados apresentados na Tabela 6 confirmam a superioridade do modelo $(7) + ds = 6m$, já que também ocorreram melhorias significativas nas estatísticas deste modelo.

O resultado encontrado no gráfico de resíduos (Figura 4) vai de acordo com as colocações de Boczniewicz; Mason e Morgenroth (2022), que citam que considerando o aspecto econômico e silvicultural, a parte mais valiosa do fuste das árvores é a parte inferior, onde se encontram os maiores diâmetros das árvores, e conseqüentemente, os maiores volumes de madeira. Porém, mesmo com a presença de resíduos das predições dos modelos de afilamento nessa região, um aspecto importante a ser considerado nesse tipo de modelagem é se a análise residual em toda a faixa de diâmetros das árvores é distribuída sem grandes tendências no viés.

Além disso, o modelo $(7) + ds = 6m$ foi passível de ser aplicado de forma generalizada, mostrando ser flexível e com bons resultados preditivos, característica essa que é esperada para uma melhor aplicabilidade prática pelos gestores florestais (GOMAT et al., 2011). Corroborando com este resultado, observamos nas Figuras 5, 6, 7 e 8 para o modelo $(7) + ds = 6m$ foi quem melhor capturou a variabilidade do afilamento do caule dos clones A1 e C3 localizados em ambientes com características climáticas contrastantes, validando assim o seu potencial de uso.

Não foi encontrado até o momento de escrita dessa pesquisa publicações com metodologias semelhantes a está em estudos com genótipos de *Eucalyptus*, porém, para *Pinus taeda* já é possível encontrar literatura publicada. De Oliveira et al. (2022) estudaram plantios de *Pinus taeda* no Brasil desbastados e não desbastados, fazendo uso de metodologia similar a utilizada nesta pesquisa. Estes autores testaram a inclusão de variáveis do povoamento (com a seleção da posição sociológica das árvores) no modelo de expoente variável de Kozak (1988), junto com a inserção do diâmetro superior localizado na altura de 6 metros pelo método da restrição algébrica (proposto por Cao, 2009) e obtiveram melhorias estatísticas no modelo, com redução de 3,2 % do RMSE e 2,6 % do MAE em relação ao volume de madeira (m^3).

Portanto, o modelo $(7) + ds = 6m$ pode ser utilizado de forma confiável para estimar o diâmetro e volume das árvores de povoamentos de *Eucalyptus* com características similares aos

da base de dados utilizada nesta pesquisa. Pesquisas futuras podem ser conduzidas testando outras variáveis climáticas, regimes de manejo e espécies florestais.

5 CONCLUSÃO

Este estudo desenvolveu um modelo de conicidade por meio da inserção de variáveis (inclusão de z^*I e z^*DEF) para a generalização do modelo e a calibração pelo método de restrição algébrica, com a inserção do diâmetro superior localizado à 6 metros de altura da árvore para prever os diâmetros ao longo do caule e volume de madeira para clones de *Eucalyptus*, espécie madeireira mais importante e de maior área plantada no Brasil.

A idade das árvores é uma variável fácil de ser obtida, pois, é feito o controle pelas empresas de quando os plantios foram desenvolvidos. Já em relação ao déficit hídrico do solo, é possível obter os dados climáticos em estações meteorológicas do INMET próximas das áreas de plantios de eucalipto, e posteriormente, serem feitos os cálculos dessa variável. Em relação ao diâmetro superior na altura de 6 metros, este seria necessário ser coletado no campo durante a realização do inventário florestal, o que não é um fator muito limitante, já que com o desenvolvimento tecnológico atual esse tipo de coleta poderia ser desenvolvido com o uso de métodos não destrutivos, de forma fácil e rápida e/ou aliados ao uso de informações do sensoriamento remoto. O custo envolvido na obtenção desta variável é justificado pelos seus ganhos em acurácia das estimativas do modelo.

Deste modo, o modelo de conicidade do caule proposto pode ser usado por pesquisadores e silvicultores para calcularem diâmetros superiores do caule, bem como o volume de madeira para qualquer limite comercializável desejável. No entanto, é recomendado que a sua aplicação seja desenvolvida para árvores e locais com características semelhantes aos da base de dados utilizadas nesta pesquisa. Pois, as pesquisas de melhoramento genético (clones) de *Eucalyptus* possuem atualizações contínuas buscando incrementar características como o rápido crescimento das árvores, e esse pode ser um fator que altere o padrão de conicidade do caule das árvores e, conseqüentemente, a sua produção volumétrica.

Declaração de Interesse Concorrente

Os autores declaram que não têm interesses financeiros concorrentes conhecidos ou relacionamentos pessoais que possam ter influenciado o trabalho relatado neste artigo.

Agradecimentos

Os autores são especialmente gratos ao Programa TECHS-IPEF, Laboratório de Manejo Florestal (LEMAF) da Universidade Federal de Lavras (UFLA) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANDRADE, V. C. L. DE. Novos modelos de taper do tipo expoente-forma para descrever o perfil do fuste de árvores. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 34, n. 80, 2014.
- ANDRADE, V. C. L. DE; FREITAS, B. C.; TERRA, D. L. C. V. Equações de perfil do tronco avaliados para *Corymbia citriodora* Hill & Johnson. **Agrarian**, Grande Dourados, v. 14, n. 51, p. 82–94, 2021.
- ARIAS-RODIL, M.; DIÉGUEZ-ARANDA, U.; BURKHART, H. E. Effects of measurement error in total tree height and upper-stem diameter on stem volume prediction. **Forest Science**, Lawrence, v. 63, n. 3, p. 250–260, 2017.
- ASSMANN, E. **The principles of forest yield study**. Oxford: Pergamon Press, 1970.
- 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, p. 271–283, 2017.
- BOCZNIEWICZ, D.; MASON, E. G.; MORGENROTH, J. A. Developing fully compatible taper and volume equations for all stem components of *Eucalyptus globoidea* Blakely trees in New Zealand. **New Zealand Journal of Forestry Science**, New Zealand, v. 52, 2022.
- BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling Forest Trees and Stands**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012.
- CAMARGO, A. P. DE. Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 21, p. 163–213, 1962.
- CAO, Q. V. Calibrating a Segmented Taper Equation with Two Diameter Measurements. **Southern Journal of Applied Forestry**, Washington, v. 33, n. 2, p. 58-61, 2009.

- CAO, Q. V.; WANG, J. Evaluation of methods for calibrating a tree taper equation. **Forest Science**, Lawrence, v. 61, n. 2, p. 213–219, 2015.
- CASTRO, C. A. DE O. et al. Comportamento da interação genótipos por locais aos três e nove anos em clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 46, n. 120, 2018.
- CHAMBI-LEGOAS, R. et al. Inter-annual effects of potassium/sodium fertilization and water deficit on wood quality of *Eucalyptus grandis* trees over a full rotation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 496, 2021.
- CHRISTINA, M. et al. Measured and modeled interactive effects of potassium deficiency and water deficit on gross primary productivity and light-use efficiency in *Eucalyptus grandis* plantations. **Global Change Biology**, Oxford, v. 21, n. 5, p. 2022–2039, 2015.
- CORRAL-RIVAS, J. J. et al. A merchantable volume system for major pine species in El Salto, Durango (Mexico). **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 238, n. 1–3, p. 118–129, 2007.
- DE OLIVEIRA, X. M. et al. Impact of the inclusion of the sociological position and upper-stem diameter in the taper modeling of *Pinus taeda* trees, subjected to different thinning regimes. **Trees, Forests and People**, Netherlands, v. 8, 2022.
- DE SOUZA, G. S. A. et al. Evaluation of non-linear taper equations for predicting the diameter of *Eucalyptus* trees. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 42, n. 1, 2018.
- 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, 2019.
- EVANGELISTA SILVA, V. et al. Influences of edaphoclimatic conditions on deep rooting and soil water availability in Brazilian *Eucalyptus* plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 455, 2020.
- GOMAT, H. Y. et al. What factors influence the stem taper of *Eucalyptus*: Growth, environmental conditions, or genetics? **Annals of Forest Science**, Champenoux, v. 68, n. 1, p. 109-120, 2011.
- HE, P. et al. Evaluation of four regression techniques for stem taper modeling of Dahurian larch (*Larix gmelinii*) in Northeastern China. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 494, 2021.
- HEVIA, A.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J. G.; MAJADA, J. Effects of pruning on knotty core taper and form of *Pinus radiata* and *Pinus pinaster*. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 74, n. 5, p. 741–750, 2016.
- HIRIGOYEN, A. et al. Modelling taper and stem volume considering stand density in *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus dunnii*. **iForest - Biogeosciences and Forestry**, Viterbo, v. 14, n. 2, p. 127–136, 2021.
- HUSSAIN, A. et al. Stem taper functions for white birch (*Betula platyphylla*) and costata birch (*Betula costata*) in the Xiaoxing'an Mountains, northeast China. **Forestry**, v. 94, n. 5, p. 714–733, 2021.

- KO, C. et al. Estimating stem volume using stem taper equation for *Quercus mongolica* in South Korea. **Forest Science and Technology**, v. 15, n. 2, p. 58–62, 2019.
- KOHLER, S. V. et al. Evolução do afilamento do tronco em povoamentos de *Pinus taeda*. **Ciência Rural**, v. 46, n. 7, p. 1185–1191, 2016.
- KOZAK, A. A variable-exponent taper equation. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 18, n. 11, p. 1363–1368, 1988.
- KUŽELKA, K.; SLAVÍK, M.; SUROVÝ, P. Very high density point clouds from UAV laser scanning for automatic tree stem detection and direct diameter measurement. **Remote Sensing**, Switzerland, v. 12, n. 8, 2020.
- LARSON, P. R. Stem Form Development of Forest Trees. **Forest Science**, Lawrence, v. 9, n. suppl_2, p. a0001-42, 1963.
- LEDO, A. et al. Tree size and climatic water deficit control root to shoot ratio in individual trees globally. **New Phytologist**, United Kingdom, v. 217, n. 1, p. 8–11, 2018.
- LI, R.; WEISKITTEL, A. R. Comparison of model forms for estimating stem taper and volume in the primary conifer species of the North American Acadian Region. **Annals of Forest Science**, Champenoux, v. 67, n. 3, 2010.
- LIU, Y. et al. Incorporating climate effects in *Larix gmelinii* improves stem taper models in the Greater Khingan Mountains of Inner Mongolia, northeast China. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 464, 2020a.
- LIU, Y. et al. Tree profile equations are significantly improved when adding tree age and stocking degree: an example for *Larix gmelinii* in the Greater Khingan Mountains of Inner Mongolia, northeast China. **European Journal of Forest Research**, v. 139, n. 3, p. 443–458, 1 jun. 2020b.
- MEHTÄTALO, L.; KANSANEN, K. **lmfor: Functions for Forest Biometrics**. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/lmfor/lmfor.pdf>, 2022.
- MEHTÄTALO, L.; LAPPI, J. Taper curves. In: **Biometry for Forestry and Environmental Data: With Examples in R**. CRC Press, Taylor & Francis Group: Boca Raton, FL, USA, 2020. p. 377–378.
- MUHAIRWE, C. K.; LEMAY, V. M.; KOZAK, A. Effects of adding tree, stand, and site variables to Kozak's variable-exponent taper equation. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 24, n. 2, p. 252–259, 1994.
- NIGH, G.; SMITH, W. Effect of climate on lodgepole pine stem taper in British Columbia, Canada. **Forestry**, v. 85, n. 5, p. 579–587, 2012.
- OLIVEIRA, R. DE S. et al. Wood energy yield for *Eucalyptus* clones growing under seasonal drought-stress in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 154, p. 106264, 2021.
- POUDEL, K. P.; ÖZÇELİK, R.; YAVUZ, H. Differences in stem taper of black alder (*Alnus glutinosa* subsp. *barbata*) by origin. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 50, n. 6, p. 581–588, 2020.

- PUTNEY, J. D.; MAGUIRE, D. A. Response of Douglas-fir stem profile to operational nitrogen fertilization in western Oregon. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 496, 15 set. 2021.
- R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria R Foundation for Statistical Computing, 2021.
- SALEKIN, S. et al. Global Tree Taper Modelling: A Review of Applications, Methods, Functions, and Their Parameters. **Forests**, Switzerland, v. 12, n. 7, p. 913, 2021.
- SCHNEIDER, R. Understanding the factors influencing stem form with modelling tools. **Progress in Botany**, v. 80, p. 295-316, 2018.
- SCHNEIDER, R. et al. Climate-induced changes in the stem form of 5 North American tree species. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 427, p. 446–455, 2018.
- SCHRÖDER, T. et al. Taper Equations for *Pinus elliottii* Engelm. in Southern Paraná, Brazil. **Forest Science**, Lawrence, v. 61, n. 2, p. 311–319, 2015.
- SCOLFORO, H. F. et al. Generalized stem taper and tree volume equations applied to *Eucalyptus* of varying genetics in Brazil. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 49, n. 5, p. 447–462, 2018a.
- SCOLFORO, H. F. et al. Comparison of taper functions applied to *Eucalypts* of varying genetics in Brazil: application and evaluation of the penalized mixed spline approach. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 48, n. 5, p. 568–580, 2018b.
- 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.
- SCOLFORO, J. R. S. Modelos volumétricos. In: **Biometria Florestal: Parte I: Modelos de Regressão Linear e Não-linear, Parte II: Modelos para Relação Hipsométrica, Volume, Afilamento, e Peso da Matéria Seca**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005. p. 248–252.
- TNG, D. Y. P. et al. Rainforest trees respond to drought by modifying their hydraulic architecture. **Ecology and Evolution**, v. 8, n. 24, p. 12479–12491, 2018.
- VALENTINE, H. T. et al. Models relating stem growth to crown length dynamics: Application to loblolly pine and Norway spruce. **Trees - Structure and Function**, v. 26, n. 2, p. 469–478, 2012.
- WESTFALL, J. A. et al. Effects of uncertainty in upper-stem diameter information on tree volume estimates. **European Journal of Forest Research**, v. 135, n. 5, p. 937–947, 2016.
- WICKHAM, H. **ggplot2: Elegant graphics for data analysis**. Nova York Springer, 2016. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/ggplot2/ggplot2.pdf>>. Acesso em: 29 jun. 2022
- WINDRIM, L.; BRYSON, M. Detection, segmentation, and model fitting of individual tree stems from airborne laser scanning of forests using deep learning. **Remote Sensing**, Switzerland, v. 12, n. 9, 2020.