



LAVÍNIA BARBOSA OLIVEIRA

**SELEÇÃO GENÉTICA EM *Pinus elliottii* var. *elliottii* Elgem E
Pinus caribaea var. *hondurensis* Barr. & Golf. PARA PRODUÇÃO
DE GOMA-RESINA**

**LAVRAS – MG
2025**

LAVÍNIA BARBOSA OLIVEIRA

**SELEÇÃO GENÉTICA EM *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm E
Pinus caribaea var. *hondurensis* Barr. & Golf. PARA PRODUÇÃO DE GOMA-RESINA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Silvicultura e Genética Florestal, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. DSc. Lucas Amaral de Melo
Orientador

DSc. Adelson Lemes da Silva Júnior
Prof. DSc. Rodolfo Soares de Almeida
Coorientadores

**LAVRAS – MG
2025**

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

Barbosa Oliveira, Lavínia.

Seleção genética em *Pinus elliottii* var. *elliottii* Elgem e *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. & Golf. para produção de goma-resina / Lavínia Barbosa Oliveira. - 2025.

120 p. : il.

Orientador: Lucas Amaral de Melo

Coorientador: Adelson Lemes da Silva Júnior

Coorientador: Rodolfo Soares de Almeida

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2025.

Bibliografia.

1. Melhoramento Florestal. 2. Adaptação. 3. Produtividade resinífera. I. Amaral de Melo, Lucas. II. Lemes da Silva Júnior, Adelson. III. Soares de Almeida, Rodolfo. IV. Universidade Federal de Lavras. V. Título.

LAVÍNIA BARBOSA OLIVEIRA

SELEÇÃO GENÉTICA EM *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm E *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. & Golf PARA PRODUÇÃO DE GOMA-RESINA

GENETIC SELECTION IN *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm AND *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. & Golf FOR THE PRODUCTION OF GUM RESIN

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Silvicultura e Genética Florestal, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 05 de setembro de 2025.

DSc. Lucas Amaral de Melo	UFLA
DSc. Otávio Camargo Campoe	UFLA
DSc. Evandro Novais	UFLA
DSc. Arnaldo Ferreira	USDA
DSc. Andrei Caique Pires Nunes	UFSB

Prof. DSc. Lucas Amaral de Melo
Orientador

DSc. Adelson Lemes da Silva Júnior
Prof. DSc. Rodolfo Soares de Almeida
Coorientadores

**LAVRAS – MG
2025**

*A Deus, que rege a tudo, meus pais Azenaldo Dionizio de Oliveira
e Maria Eni Barbosa Oliveira, fonte de força e amor supremo
e ao meu irmão Moisés Barbosa Oliveira que tanto acreditou em mim.*

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pela minha existência, pela sua misericórdia e amor incondicional. Aos meus pais, Azenaldo Dionizio de Oliveira e Maria Eni Barbosa Oliveira e ao meu irmão Moisés Barbosa Oliveira pelo amor supremo, apoio e por sempre acreditarem em mim. A Cléovis Dionizio Mendes, pelo amor, paciência e todo o incentivo. Vocês são tudo de mais precioso que tenho.

Aos meus familiares, representados por minha avó Maria de Lourdes Barbosa e pelas minhas tias Maria Eunice Barbosa e Marivânia Barbosa que, mesmo distante, se fizeram presentes e torceram pela concretização deste sonho. Aos meus amigos de longa data, Camila Leal, Cleidiane Alves, Franciele Miranda, Otniel Trancoso, Raul Brenner, Raydson Miranda e Vanessa Rodrigues por serem presença, emanando força e boas energias.

À Universidade Federal de Lavras – UFLA, em especial ao Departamento de Ciências Florestais, pela infraestrutura e apoio no desenvolvimento das atividades. Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, pela oportunidade de desenvolver este trabalho e ao corpo docente, dos Programas de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Genética e Melhoramento de Plantas e Solos pela competência e empenho nas atividades que contribuíram com a minha formação acadêmica, profissional e pessoal.

Ao professor Lucas Amaral de Melo, orientador e amigo, pelas inúmeras contribuições mediante os desafios acadêmicos, profissionais e por muitas vezes pessoais. Agradeço a oportunidade de ser sua orientada por ser um exemplo de profissional a ser seguido e copiado. Sou sua fã.

Ao meu coorientador, amigo, irmão e afilhado Rodolfo Soares de Almeida, serei sempre grata pela acolhida, suporte em minha chegada, por ter sido companhia e ouvido nos momentos alegres e nos difíceis, pelas críticas construtivas, aulas de inglês e por muitas vezes ter acreditado em mim, mais que eu mesma.

Ao meu coorientador e amigo Adelson Lemes da Silva Júnior, por abraçar os desafios junto comigo e não medir esforços para me auxiliar na concretização desta etapa. Em muitos momentos seu apoio foi essencial, o seu profissionalismo e fé me inspiram. Sou grata a Deus por nossa amizade.

Ao professor Otávio Camargo Campoe, pelo apoio, incentivo e pelas oportunidades de capacitação a mim conferidas, em seu nome estendo meus agradecimentos ao FPC – (*Forest Productivity Cooperative*), pela parceria e apoio financeiro.

Ao corpo técnico administrativo, em especial ao Matheus Luz e José Pedro (Zé Pedro) pelo apoio nas atividades de campo e pela amizade.

A Adriene de Oliveira Bastos, Carolina Rafaela Barroco Soares e Lais Lara Jesus Barros Freitas, as *best friends* que Lavras me deu, gratidão. Vocês me ensinaram diariamente sobre amor, paciência, respeito ao próximo e me deram aula de proatividade, competência e comprometimento. A jornada foi mais divertida por ter vocês, *I love you*.

A toda equipe do LASERF, pelo cooperativismo, apoio, troca de saberes e amizade. Em especial a Soraya Alvarenga, Fernanda Leite, Lucas Rafael, Raul Assunção, Gabriel Baroni, Laila Amuda, Marileydy Hernan, Paulo Castilho, Samuel Abade, Isáira Leite, Hyngrid Félix, Natielle Cordeiro e Kelly Guimarães.

Aos estudantes de graduação Alisson Oliveira, Bruno Blanco, Diogo Troia, João Carlos Maciel, João Carlos Fernandes, Ellen Dutra, Emanuely Resende, Leticia Gomes, Lucas Serrano, Lucas Vieira, Maria Gabrielly e a estudante do ensino médio Maria Luiza, pela amizade, por me auxiliarem em diversas etapas deste trabalho, fazendo a jornada mais leve e em sua maioria por terem confiado a mim, a orientação.

A Maria Sueliane Andrade, por ter dividido o lar comigo. Obrigada pela fraternidade familiar que compartilhamos, pelos risos, pelas vezes que sonhou meus sonhos e estendeu-me o ombro como acalento.

Ao Núcleo de Estudos em Silvicultura (NES) e ao Grupo de Pesquisa em Silvicultura e Melhoramento Florestal - SILMEF, pelas oportunidades de crescimento, bem como a felicidade de encontrar bons amigos e companheiros de trabalho.

A Empresa Resineves Agronegócios na pessoa do Proprietário Generci Assis Neves pela disponibilização do material genético e manutenção do plantio e ao Técnico Florestal Denílson Rodrigues por todos os ensinamentos, atenção e empenho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Ao *ELAP – Emerging Leaders in the Americas Program*, pela oportunidade de realizar minha internacionalização, aguçando ainda mais meus aspectos sociais, linguísticos e de liderança.

A Lakehead University, em nome da Professora Ashley Tomson por me acolher gentilmente e repassar seus conhecimentos no âmbito da genômica populacional. Essa oportunidade ficará marcada pra sempre em minha trajetória.

A Karla Ramirez pela amizade, paciência, cuidado e apoio durante os meses no Canadá, a jornada foi mais leve por ter sua companhia.

A Idevânia Costa, pela amizade, irmandade, suporte, acolhimento e por todos os momentos de alegria compartilhados em Thunder Bay, sou extremamente grata a Deus por cruzar nossos caminhos.

A todos os demais amigos conterrâneos de Taiobeiras e Salinas, e aos amigos de Campinas, Lavras e Thunder Bay que me apoiaram e me apoiam em todas as minhas conquistas.

Estou feliz e grata pela conclusão desta etapa!

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar.

Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”

Madre Teresa de Calcutá

RESUMO

O gênero *Pinus* possui grande relevância econômica no Brasil nas regiões Sul e Sudeste, atendendo os mercados madeireiro e resinífero. Contudo, os programas de melhoramento florestal têm priorizado características de crescimento e da qualidade da madeira, enquanto os avanços para a produtividade resinífera ainda são limitados, sobretudo em regiões tropicais. Este estudo objetivou avaliar o desempenho genético de progênies de meios-irmãos de *Pinus elliottii* var. *elliottii* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, visando à seleção de materiais superiores para crescimento e produtividade de goma-resina. Os experimentos foram conduzidos em blocos completos, com avaliação de diâmetro à altura do peito (DAP), altura (H) e produtividade de goma-resina (PGR). As análises estatísticas foram realizadas por modelos mistos no software R. A variável número de canais resiníferos (NCR) foi analisada por ANAVA, seguida do teste de *Scott-Knott*. As análises para sobrevivência, crescimento e produtividade demonstraram o potencial adaptativo das espécies à região de estudo, a existência de variabilidade genética entre as progênies que apresentaram herdabilidades moderadas a altas. Houve correlação genética idade-idade alta para DAP e H, favorecendo a seleção precoce e alta entre DAP e H, possibilitando a seleção indireta. A PGR apresentou correlações baixas e/ou negativas com o crescimento, sugerindo uma associação genética contrastante. A seleção direta para PGR foi mais eficiente, e o uso de índices combinados possibilita ganhos moderados para crescimento e para PGR, simultaneamente. Os resultados contribuem para o avanço do melhoramento florestal voltado ao crescimento e à produtividade de goma-resina e reforçam o potencial do gênero *Pinus* para expansão em regiões tropicais.

Palavras-chave: melhoramento florestal; adaptação; produtividade resinífera.

ABSTRACT

The genus *Pinus* has great economic relevance in Brazil, particularly in the southern and southeastern regions, serving both the timber and the resin markets. However, forest breeding programs have prioritized growth and wood quality traits, while advances in the resin productivity remain limited, especially in tropical regions. This study aimed to evaluate the genetic performance of half-sib progenies of *Pinus elliottii* var. *elliottii* and *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, with a focus on selecting superior materials for growth and gum-resin yield. The experiments were conducted in randomized complete block designs, with evaluations of diameter at breast height (DBH), height (H), and gum-resin yield (GRY). Statistical analyses were performed using mixed models in R software. The variable number of resin canals (NRC) was analyzed by ANOVA, followed by the *Scott-Knott* test. Analyses of survival, growth, and productivity demonstrated the adaptive potential of the species to the study region, as well as the existence of genetic variability among progenies, which showed moderate to high heritabilities. A strong age-age genetic correlation was observed for DBH and H, favoring the early selection, as well as a strong correlation between DBH and H, enabling the indirect selection. GRY showed low and/or negative correlations with growth, suggesting a contrasting genetic association. Direct selection for GRY proved more efficient, while the use of combined selection indices allowed moderate gains in both growth and productivity, simultaneously. The results contribute to the advancement of forest breeding programs aimed at growth and gum-resin yield and reinforce the potential of the *Pinus* genus for expansion in tropical regions.

Keywords: forest breeding; adaptation; resin yield.

INDICADORES DE IMPACTO

A realização do presente estudo, com as espécies *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm e *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. & Golf., contribuem para o desenvolvimento e aprimoramento de conhecimentos sobre o melhoramento genético das espécies visando produção de goma-resina e madeira, trazendo impactos positivos no âmbito do desenvolvimento socioeconômico, ambiental, educacional e tecnológico e, favorecendo a exploração sustentável dos recursos florestais plantados. Com o apoio de docentes, discentes e técnicos do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Lavras – UFLA e da Empresa Resineves Agronegócios, a pesquisa também contribui com a difusão de conhecimentos acerca da adoção de estratégias de melhoramento e definição dos melhores materiais genéticos de *Pinus* em nível de adaptação e produtividade de goma-resina. Os resultados deste trabalho contribuem para a expansão de áreas produtivas, ampliando a oferta de matéria-prima, gerando empregos e reduzindo a dependência de produtos importados. Além disso, ajudam a aliviar a pressão sobre áreas naturais, colaborando para o controle de eventos climáticos extremos e na formação de profissionais habilitados para a condução de cultivos e para a produção de goma-resina de *Pinus*. Essas contribuições estão em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), da Organização das Nações Unidas (ONU), especialmente no que se refere à ação contra as mudanças climáticas (ODS 13), à gestão sustentável das florestas (ODS 15), à promoção da educação e formação técnica (ODS 4), ao incentivo à indústria, inovação e infraestrutura (ODS 9) e ao fortalecimento de parcerias multissetoriais entre universidades e empresas (ODS 17).

IMPACT INDICATORS

The present study, with *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm and *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. & Golf., contributes to the development and improvement of knowledge on the genetic breeding of these species aimed at resin and timber production, generating positive impacts in the socioeconomic, environmental, educational, and technological spheres, while fostering the sustainable use of planted forest resources. Along with the support of professors, students, and technicians from the Department of Forest Sciences of the Federal University of Lavras – UFLA and the company ‘Resineves Agronegócios’, the research also contributes to the dissemination of knowledge regarding the adoption of breeding strategies and the identification of the best *Pinus* genetic materials in terms of adaptation and resin productivity. The results of this work contribute to the expansion of productive areas, increasing the supply of raw materials, generating jobs, and reducing the dependence on imported products. In addition, they help to alleviate the pressure on natural areas, collaborate in controlling extreme climate events, and support the training of professionals qualified to manage *Pinus* cultivation and resin production. These contributions are in line with the United Nations (UN) Sustainable Development Goals (SDGs), particularly with respect to climate action (SDG 13), sustainable forest management (SDG 15), the promotion of education and technical training (SDG 4), the encouragement of industry, innovation and infrastructure (SDG 9), and the strengthening of multisectoral partnerships between universities and companies (SDG 17).

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	15
1 INTRODUÇÃO GERAL	15
2 REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1 O gênero <i>Pinus</i> na silvicultura brasileira.....	17
2.2 Resinagem em <i>Pinus</i>	19
2.3 Melhoramento genético do <i>Pinus</i>	20
2.4 Teste de progênies, parâmetros genéticos e seleção	22
2.5 Caracterização das espécies de <i>Pinus</i> mais utilizadas no Brasil para extração de goma-resina	24
REFERÊNCIAS	28
SEGUNDA PARTE – ARTIGOS 1, 2 e 3.....	35
ARTIGO 1 – GENETIC PARAMETERS AND SELECTION STRATEGIES FOR <i>Pinus elliotii</i> var. <i>elliotii</i> Engelm IN NON-TRADITIONAL CULTIVATION REGION IN SOUTHEASTERN BRAZIL	35
1 INTRODUCTION	37
2 MATERIALS AND METHODS	38
2.1 Study Site	38
2.2 Genetic Material and Experimental Design	39
2.3 Data collection	39
3 RESULTS.....	47
4 DISCUSSION	54
5 CONCLUSION.....	60
REFERENCES	61
APPENDIX	66
ARTIGO 2 – DIÂMETRO, CANAIS RESINÍFEROS E PRODUTIVIDADE DE GOMA-RESINA EM <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> Barr. & Golf.	69
1. INTRODUÇÃO	71
2. METODOLOGIA	72
2.1 Caracterização do experimento.....	72
2.2 Avaliação do DAP, número de canais e da produção de goma-resina	73
2.3 Análises estatísticas	76
3. RESULTADOS.....	77
4. DISCUSSÃO.....	81
5. CONCLUSÕES	83
REFERÊNCIAS	84

ARTIGO 3 - SELEÇÃO GENÉTICA E RELAÇÕES ENTRE CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DE GOMA-RESINA EM *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. & Golf. 87

1	INTRODUÇÃO	89
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	90
2.1	Local e condições experimentais	90
2.2	Material genético e delineamento experimental.....	91
2.3	Coleta de dados.....	92
2.4	Análises estatísticas	92
3	RESULTADOS.....	96
4	DISCUSSÃO.....	105
5	CONCLUSÕES	109
	REFERÊNCIAS	111
	APÊNDICE	115
	TERCEIRA PARTE	120
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	120

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO GERAL

O *Pinus* foi introduzido no Brasil na década de 60 e se estabeleceu como uma cultura comercial nas regiões Sul e Sudeste na década de 1980, graças aos incentivos fiscais e à sua adaptação ao clima dessas áreas (Fritzsons *et al.*, 2022; Yuan *et al.*, 2013). Além disso, desde a sua introdução, o *Pinus* tem sido altamente atrativo para o setor florestal brasileiro, devido à sua utilização como matéria-prima nas indústrias de celulose e papel, processamento mecânico e extração de goma-resina (Ferro *et al.*, 2018; Resende, Borém e Leite, 2023; Shimizu, 2006). Na atualidade, as áreas de florestas plantadas comerciais no Brasil cobrem aproximadamente 10,23 milhões de hectares. Dessas, cerca de 1,93 milhões de hectares são dedicados ao plantio de *Pinus*, tornando-o o segundo gênero mais cultivado no território brasileiro (IBÁ, 2024). Embora seja considerada uma atividade secundária, a produção resinífera coloca o Brasil como o segundo maior produtor mundial, atrás apenas da China. No ranking de exportações, ele ocupa o primeiro lugar. A produção nacional de goma-resina é de aproximadamente 142 171 t ano⁻¹, concentrando-se principalmente nos estados de São Paulo, Paraná e Santa Catarina, que juntos respondem por 80% do total (ARESB, 2025; IBGE, 2025).

Na região Sudeste, especialmente em Minas Gerais, há potencial edafoclimático para o estabelecimento de plantios com algumas espécies do gênero, principalmente as produtoras de goma-resina, como *P. elliottii* e as variações do *P. caribaea* (Kronka *et al.*, 2005; Resende; Borém; Leite, 2023; Shimizu, 2006). Apesar disso, Minas Gerais possui apenas 2% do total de áreas plantadas com espécies de *Pinus*, correspondendo a 47,9 mil hectares, contribuindo com 4% da produção nacional de goma-resina (ARESB, 2025; IBÁ 2024, IBGE, 2025). Especificamente para a mesorregião do Campo das Vertentes em Minas Gerais, os estudos que avaliam o potencial de utilização de espécies do gênero até o momento são incipientes (Niere *et al.*, 2022). Entretanto, a diversificação de áreas para produção florestal tem sido alvo de estudos tanto para espécies do gênero, quanto para outras espécies florestais (Carvalho *et al.*, 2018; Reis *et al.*, 2021).

A expansão de áreas de plantios de *Pinus* pode gerar diversos benefícios, como a ampliação da oferta da matéria-prima, a criação de novos empregos, a redução da dependência de produtos importados, além de serviços ecossistêmicos, como a redução da pressão sobre áreas naturais e a cooperação para o controle de extremos climáticos (Carvalho *et al.*, 2018).

Para isso, o desenvolvimento de programas de melhoramento se faz necessário. Apesar de eles já serem desenvolvidos desde a década de 70 para espécies do gênero, o foco sempre foi no desenvolvimento em altura, diâmetro e volume das árvores, bem como nas propriedades da madeira. Já os esforços voltados à melhoria da produtividade e da qualidade da goma-resina até então são incipientes (de Aguiar *et al.*, 2011; Shimizu, 2007).

Por meio de programas de melhoramento genético, é possível selecionar genótipos de *Pinus* adaptados a diferentes condições edafoclimáticas, o que é fundamental para sua introdução e para o seu estudo em novas regiões. Essa estratégia viabiliza a expansão das áreas de cultivo com genótipos superiores, especialmente voltados à exploração de matéria-prima, como a goma-resina (Corrêa *et al.*, 2012). A instalação e a avaliação de testes de progênies são fundamentais para identificar, de forma eficiente, os genótipos com caracteres desejáveis. Além disso, possibilitam a estimação de parâmetros genéticos e a adoção de estratégias de seleção, conservação e manejo eficientes, sem comprometer a variabilidade genética (Brandão *et al.*, 2015; Duarte *et al.*, 2015; Paludeto *et al.*, 2020).

Segundo Rodrigues (2008), o rendimento de goma-resina está diretamente relacionado ao diâmetro das árvores e à quantidade de canais resiníferos radiais. O rendimento é uma característica altamente hereditária, cuja variação é fortemente influenciada por fatores genéticos, o que destaca a importância da seleção de genótipos superiores em programas de melhoramento. Estudos apontam que a herdabilidade da produtividade de goma-resina em *Pinus* é de moderada a alta, variando de 0,46 a 0,77, o que permite obter ganhos a partir da seleção de indivíduos com alta produtividade (Lai *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2013; Roberds; Strom, 2006; Squillace; Bengston, 1961; Tadesse *et al.*, 2001).

No entanto, um grande entrave no melhoramento de espécies perenes é o tempo necessário para a seleção dos genótipos superiores e o custo associado à implantação e à manutenção destes testes. Logo, a adoção de técnicas mais eficientes, com elevado rigor experimental, em idades precoces, pode permitir ganhos expressivos (Araújo *et al.*, 2015). A seleção precoce pressupõe que o comportamento juvenil é um preditor do comportamento adulto, e algumas espécies apresentam correlação entre as fases juvenis-maduras, como foi encontrado na seringueira (Bombonato *et al.*, 2015), em eucalipto (Lima *et al.*, 2011) e no próprio pinus (Chauhan *et al.*, 2013), sinalizando a possibilidade de aplicar a seleção precoce. Para o caráter produtividade de goma-resina, por exemplo, Gurgel Garrido *et al.* (1994) estimaram a correlação da produtividade entre diferentes idades e observaram valores altos e significativos, sugerindo uma alta repetibilidade, possibilitando o sucesso na seleção precoce.

Diante desse contexto, o principal objetivo desta tese é trazer informações acerca dos programas de melhoramento para as espécies de *P. elliottii* var. *elliottii* Engelm e *P. caribaea* var. *hondurensis* Barr. & Golf., que vem sendo desenvolvidas em Minas Gerais, com o intuito de se obter materiais genéticos superiores para serem recomendados para a mesorregião do Campo das Vertentes, que não possui plantios comerciais com essas espécies.

Esta tese está estruturada em duas partes. A primeira tem como objetivo contextualizar o leitor sobre o tema abordado, apresentando as espécies estudadas, o histórico do melhoramento genético e os fundamentos teóricos relacionados à seleção. A segunda parte é composta por três artigos científicos: o primeiro trata do melhoramento genético de *P. elliottii* var. *elliottii* Engelm, e o terceiro do melhoramento genético de *P. caribaea* var. *hondurensis* Barr. & Golf., ambos com foco em estimar os parâmetros genéticos para os caracteres de diâmetro à altura do peito (DAP) e altura (H) em diferentes idades, além da produtividade de goma-resina (PGR). Já o segundo é voltado à análise do crescimento em DAP, da PGR e do número de canais resiníferos (NCR) do *P. caribaea* var. *hondurensis*, buscando analisar a existência de correlação entre eles.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O gênero *Pinus* na silvicultura brasileira

O gênero *Pinus* ocorre naturalmente, principalmente, no hemisfério Norte. Suas espécies se distribuem pela América do Norte, América Central, Europa, Ásia e norte da África (Burdon, 2002; Businský, 2016; Mattos, 1977). Constituído por mais de 100 espécies que se caracterizam por apresentar acículas com feixes de 2 a 5 pares, fuste com variação de 3 a 50 metros de comprimento, ramos em verticilos ou em forma desordenada, flores constituídas de brácteas escamiformes e sementes aladas. São árvores monoicas com sistema reprodutivo misto, com tendência à alogamia, além de serem organismos diploides (2n), contendo 24 cromossomos (Kronka *et al.*, 2005; Mattos, 1977).

Conforme Kronka *et al.* (2005), os relatos de introdução das primeiras espécies no Brasil são datados de 1906, quando o botânico sueco Alberto Loefgren publicou notas sobre a introdução de 16 espécies de *Pinus* no estado de São Paulo. Segundo os mesmos autores, os primeiros estudos com pinus subtropicais foram realizados pelo Instituto Florestal de São Paulo em 1936, com a introdução de sementes de *P. elliottii* e de *P. taeda*. Só em 1955, o Instituto

Florestal iniciou os estudos com as espécies de pinus tropicais, como *P. caribaea* var. *caribaea*, *P. caribaea* var. *hondurensis*, *P. caribaea* var. *bahamensis*, *P. kesiya*, *P. patula*, *P. oocarpa*, *P. tecunumani*, *P. strobus* e *P. maximinoi*.

A expansão do cultivo desse gênero no país ocorreu principalmente devido aos incentivos fiscais concedidos aos empreendimentos florestais, estabelecidos pela Lei nº 5.106 de setembro de 1966, que permitia que as empresas destinassem até 50% do valor do imposto de renda para investimentos em projetos florestais (Soares *et al.*, 2014). Assim, a silvicultura do *Pinus* teve início no sul do Brasil e no cerrado paulista, devido à semelhança das condições edafoclimáticas dessas regiões com as do sudeste dos Estados Unidos, que é o habitat natural da espécie de *P. taeda* (Neis *et al.*, 2019a) e do *P. elliottii*. A introdução do *P. taeda* nessas áreas ocorreu inicialmente com o objetivo de suprir a demanda da indústria de celulose e papel, laminação de madeira e confecção de painéis, além de retirar a pressão sobre a exploração de remanescentes nativos, uma vez que a madeira de *Araucaria angustifolia*, conhecida como pinheiro-do-Paraná, estava escassa devido à exploração predatória e excessiva (Kronka *et al.*, 2005; Shimizu, 2006).

Atualmente, no Brasil, existem 1,93 milhões de hectares dedicados ao cultivo de *Pinus*, representando 18,87% da área total de florestas plantadas no país e o tornando o segundo gênero mais cultivado. Esses plantios estão distribuídos nos estados do Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, São Paulo e Minas Gerais, sendo que a maior parte, 89% da área total, está localizada na região Sul e 8% na região Sudeste (IBÁ, 2024).

A distribuição dos plantios divide-se por regiões de zonas climáticas: temperada, subtropical e tropical. Nesse sentido, os plantios localizados nos planaltos da região Sul, até o norte do Paraná, caracterizados por terem clima temperado são de *P. taeda* e os da região Sul como um todo, parte do Sudeste, no estado de São Paulo e nas regiões serranas do sul de Minas Gerais, caracterizados por terem clima subtropical, são de *P. elliottii* (Shimizu, 2006). Ambas as espécies apresentam resistência a geadas e alta produtividade nessas regiões onde são plantadas. Já as espécies como *P. caribaea* var. *hondurensis*, *P. caribaea* var. *bahamensis*, *P. oocarpa*, *P. maximinoi*, *P. tecunumanii*, *P. kesiya* e *P. patula*, são plantadas em regiões de clima tropical, com inexistência de geadas severas, estando sujeitas a um período de deficiência hídrica e mostrando um grande potencial para a produção de madeira e goma-resina (Donadoni *et al.*, 2010; Shimizu, 2006).

2.2 Resinagem em *Pinus*

A goma-resina consiste em um produto natural de origem vegetal que pode ser encontrada em todas as espécies coníferas, sendo que em algumas delas em maior quantidade e qualidade (Ratola *et al.*, 2011). Produzida em cavidades especiais chamadas de canais resiníferos, localizados no xilema e floema secundários das espécies de *Pinus* (Hood; Sala, 2015; Wu; Hu, 1997), é tida como a principal defesa química das coníferas contra a herbivoria ou ao ataque de patógenos. Ao ser ferida, a árvore secreta goma-resina, criando um ambiente tóxico que dificulta o ataque de insetos e a proliferação de fungos (Lange, 2015; Neis *et al.*, 2018).

A goma-resina é constituída por uma mistura complexa de componentes orgânicos, denominados de terpenos, insolúveis em água, mas solúveis em certos solventes orgânicos, tais como hidrocarbonetos, éter e etanol (Zulak; Bohlmann, 2010). De acordo com suas características físicas e sua composição, que é muito complexa, divide-se em: resinas verdadeiras - são duras, quebradiças e insolúveis em água; gomas resinas - misturas naturais de goma e resina e que se emulsionam com água, podendo ou não ter óleo essencial em sua composição; oleoresinas - mistura de resina e óleo essencial; bálsamos, compostos de resinas, ácidos aromáticos e ésteres (Kronka, *et al.* 2005). No Brasil, o produto extraído das árvores vivas de *Pinus* é chamado de goma-resina, que quando destilada resulta em cerca de 70–80% de breu (ácidos resínicos e ácidos graxos), que é a fração fixa e 20–30% de terebintina que é a fração volátil (Kronka *et al.*, 2005; Salvador *et al.* 2020).

A terebintina pode ser utilizada na fabricação de solventes de limpeza e matéria-prima para fármacos e outros compostos orgânicos, fragrâncias, aromas em perfumes, aromatizantes alimentícios e na indústria de inseticidas (Rodrigues-Corrêa; Lima; Fett-Neto, 2013; Yadav; Idwani; Vyas *et al.*, 2016). Já o breu, pode ser empregado na fabricação de tintas, vernizes, plásticos, lubrificantes, adesivos, asfalto, borracha, inseticidas, germicidas, cosméticos, gomas de mascar e inúmeros produtos farmacêuticos (Neis *et al.*, 2019b; Phun *et al.*, 2017;).

A exploração da goma-resina no Brasil iniciou-se nas florestas provenientes dos incentivos fiscais das décadas de 60 e 70. Essas, conforme já citado, foram plantadas em aglomerações, com a finalidade de atender as demandas das empresas madeireiras (Kronka *et al.*, 2005; Shimizu, 2006). Com a execução de desbastes nessas áreas, o maior desenvolvimento

do tronco e da copa evidenciou a produtividade de goma-resina que até então é tida como uma atividade secundária.

Apesar disso, na atualidade, o Brasil é o segundo maior produtor de goma-resina do mundo, abaixo apenas da China, ocupando o primeiro lugar no *ranking* de exportação. Segundo o IBGE (2025), a produção brasileira de goma-resina para a safra de 2023 foi estimada em 142 171 toneladas. O maior produtor de goma-resina no Brasil é o estado de São Paulo, seguido pelo Rio Grande do Sul e Paraná. Juntos, são responsáveis por aproximadamente 80% da produção nacional de goma-resina de *Pinus*. A espécie mais utilizada para a exploração no Brasil é *P. elliottii* var. *elliotti*, seguida pelas espécies de pinus tropicais.

Nos primórdios da exploração resinífera, a produtividade era bastante variável, especialmente em árvores de *Pinus* não submetidas a melhoramento genético, com rendimentos médios entre 1 e 3 kg por árvore ao ano (Brito *et al.*, 1978; Moreira; Godinho; Carvalho, 2018; Shimizu, 2007). Com o avanço dos programas de melhoramento e das técnicas silviculturais, foi possível elevar significativamente essa produtividade, alcançando médias de até 6 kg por árvore ao ano (Moreira; Godinho; Carvalho, 2018). Esses resultados evidenciam a importância do melhoramento genético para as espécies do gênero *Pinus*, uma vez que contribuem diretamente para o aumento da eficiência produtiva e a viabilidade econômica da atividade resinífera (Brito *et al.*, 1978; Neis *et al.*, 2018).

2.3 Melhoramento genético do *Pinus*

O primeiro relato de programa de melhoramento do *Pinus* visando características de goma-resina no hemisfério Norte se deu na década de 1940, e considerava características de goma-resina em *P. palustris* Miller (Liefeld, 1940). Apesar desse relato, o incentivo a programas de melhoramento para espécies do gênero teve seu marco no sul dos Estados Unidos na década de 1950. Esses, por sua vez, eram voltados a características de crescimento, principalmente para as espécies de *P. taeda* e *P. elliottii* (Mckeand, 2019; Zobel; Sprague, 1993; Zobel; Talbert, 1984).

Assim, somente na década de 1980 é que os estudos das variações genéticas para o rendimento em goma-resina do *Pinus* passaram a ser desenvolvidos, sendo expandidos por todo o mundo (Ding *et al.*, 2023). Nessa época, os Estados Unidos retomaram as atividades e realizaram a primeira seleção considerando características de rendimento em goma-resina,

quando obtiveram um aumento de 60 a 100% na produtividade, levando ao estabelecimento de um pomar de sementes com alto rendimento em goma-resina (McCreynolds; Gansel, 1985).

Na China, a principal produtora mundial de goma-resina, os programas de melhoramento começaram na década de 1930, com foco na adaptação das espécies de *Pinus* e na melhoria das propriedades da madeira, visando atender às necessidades do setor madeireiro. O melhoramento para produção de goma-resina ocorreu mais tarde, concentrando-se principalmente na seleção de árvores que produziam grandes quantidades de goma-resina com base no desempenho fenotípico de plantações não melhoradas (Ding *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2013). Apesar do número significativo de pesquisas que vêm sendo desenvolvidas sobre o melhoramento genético dessas características, o número de programas em termos mundiais, ainda são limitados e poucos pomares de sementes de alta produção foram estabelecidos (Yi *et al.*, 2021; Zhang; Jiang; Luan, 2016).

No Brasil, o desenvolvimento dos programas de melhoramento genético de *Pinus* teve início na década de 1970, seguindo uma trajetória semelhante à observada nos Estados Unidos e na China. Os esforços concentraram-se nas três espécies de maior importância econômica: *P. taeda*, *P. elliottii* var. *elliottii* e *P. caribaea* var. *hondurensis* (de Aguiar *et al.*, 2011; Shimizu, 2006). O principal objetivo desses programas tem sido promover melhorias no crescimento das árvores, com foco em características como altura, diâmetro, volume e forma do fuste, atendendo às demandas do setor madeireiro, especialmente o de celulose, e de processamento mecânico. Essas ações têm sido fundamentais para o sucesso do cultivo comercial de *Pinus* no país (Shimizu, 2008).

Dentre as iniciativas brasileiras, destaca-se o programa de melhoramento genético de coníferas da Embrapa Florestas, iniciado em 1988. Este programa envolve testes de procedências e progênies com materiais genéticos provenientes de instituições nacionais e internacionais, com o intuito de selecionar indivíduos superiores dentro de famílias e transformá-los em pomares de sementes por mudas (PSM). Diversas espécies foram incorporadas às estratégias de melhoramento, entre elas: *P. taeda*, *P. elliottii*, *P. patula*, *P. oocarpa*, *P. maximinoi*, *P. tecunumanii*, *P. caribaea* var. *hondurensis*, *P. caribaea* var. *bahamensis*, *P. greggii* var. *bahamensis*, *P. greggii*, *P. pringlei*, *P. kesiya*, *P. palustres*, *P. chiapensis* e *P. chiapensis*, cada uma selecionada por características específicas de interesse. Por exemplo, *P. patula* e *P. greggii* produzem madeira densa e de alta resistência mecânica, sendo adaptadas a regiões de clima temperado e subtropical. *P. chiapensis* se destaca pela madeira de baixa densidade, porém de excelente qualidade para marcenaria. Já *P. oocarpa*, *P.*

maximinoi e *P. tecunumanii* fornecem madeira de alta densidade e resistência, sendo apropriadas para ambientes tropicais. Por fim, *P. elliottii* e *P. caribaea* var. *hondurensis* apresentam elevado potencial para produtividade de goma-resina (de Aguiar *et al.*, 2011).

Esses programas foram implantados nos estados da região Sul, além de nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Bahia, Pará e Rondônia e no Distrito Federal. Com base nas avaliações realizadas, observou-se que, em regiões de clima temperado e subtropical, as espécies mais produtivas são *P. taeda*, *P. elliottii* e *P. patula*. Já nas regiões tropicais, destacam-se *P. caribaea*, *P. oocarpa*, *P. tecunumanii*, *P. kesiya* e *P. chiapensis* (Shimizu, 2006; Shimizu, 2007).

De modo geral, verificou-se que procedências oriundas de regiões com altitudes e latitudes semelhantes às das áreas brasileiras de introdução apresentaram melhor desempenho em características como altura, diâmetro e forma do fuste. Por outro lado, no que se refere à qualidade da goma-resina, os esforços de melhoramento ainda são incipientes. Conforme previsto por Aguiar *et al.* (2011), havia a expectativa de que essa variável passasse a integrar as metas estratégicas de melhoramento entre os anos de 2011 e 2026. No entanto, observa-se que a inclusão efetiva da qualidade da goma-resina como critério de seleção ainda é limitada, indicando a necessidade de avanços nesse aspecto do programa de melhoramento.

2.4 Teste de progênies, parâmetros genéticos e seleção

Os programas de melhoramento genético visam, a cada ciclo de seleção, acumular alelos favoráveis nas populações, promovendo o ganho genético em características de interesse. Para isso, podem ser utilizados testes de progênies, seleção e recombinação. Os testes de progênies consistem na avaliação do desempenho de descendentes oriundos de cruzamentos controlados ou naturais, permitindo a estimativa do valor genético dos genitores e da herdabilidade de caracteres, o que possibilita a identificação de materiais com desempenho superior com maior precisão (Borém; Miranda; Fritsche-Neto, 2021).

A seleção de genótipos é baseada em características quantitativas como altura, diâmetro à altura do peito (DAP), volume de madeira (atributos amplamente empregados em programas de melhoramento com espécies do gênero *Pinus*) e produção de goma-resina (Dias; Mbanze, 2020; Ishibashi *et al.*, 2022; Perek *et al.*, 2022; Zas *et al.*, 2020). A partir dessas variáveis, são estimados parâmetros e ganhos genéticos que permitem identificar indivíduos superiores entre

e dentro de progênies, preservando a variabilidade genética das populações (Brandão *et al.*, 2015; Duarte *et al.*, 2015; Manfio *et al.*, 2012; Paludeto *et al.*, 2020).

Alguns dos parâmetros genéticos estimados são fundamentais para orientar programas de melhoramento genético, como a herdabilidade individual no sentido restrito (proporção da variabilidade devida aos efeitos genéticos aditivos) e a herdabilidade média da progênie (representando a contribuição genética média dos pais às características dos descendentes) (Santos; Araujo; Silva, 2021). Outros indicadores importantes incluem o coeficiente de variação aditiva individual, que expressa a variabilidade genética em relação à média da população; o coeficiente de variação genética entre progênies, que revela a variabilidade entre famílias; o coeficiente de variação experimental, que mede variações oriundas de fatores ambientais; e a acurácia seletiva, que indica a confiabilidade das predições genotípicas (Nieri *et al.*, 2022; Resende; Duarte, 2007;).

Apesar de sua eficácia, o melhoramento genético florestal é um processo demorado e custoso, pois envolve avaliações em árvores adultas ao longo de ciclos prolongados. Para superar essas limitações, pesquisas têm buscado estratégias de seleção precoce, permitindo a identificação de genótipos promissores em estágios juvenis (Niere *et al.*, 2022; Ransan; Vilasboas; Costa, 2019; Romanelli, 1995). Essa abordagem reduz significativamente o tempo de seleção, possibilitando decisões mais rápidas e eficientes quanto ao uso comercial de novos materiais (Xavier; Wendling; Silva, 2009). A seleção antecipada torna viável prever o desempenho futuro das árvores ainda jovens, encurtando os ciclos de melhoramento e acelerando a recomendação de genótipos superiores. Com isso, torna-se possível aumentar a produtividade dos plantios comerciais, reduzir os custos operacionais e acelerar o progresso genético entre gerações (Gonçalves *et al.*, 1998; Massaro *et al.*, 2010).

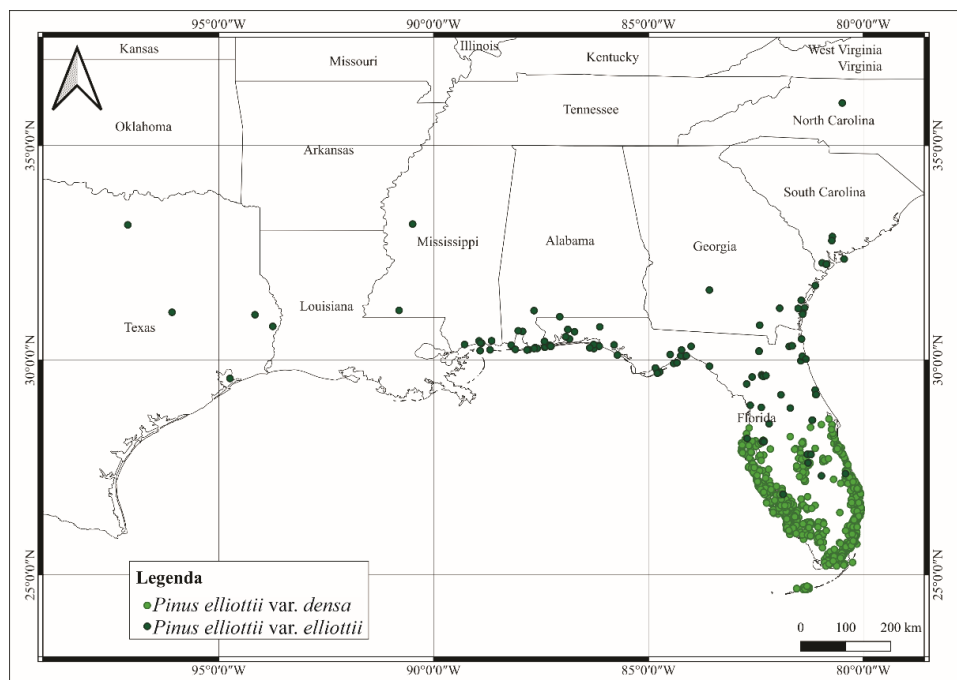
Na atualidade, alguns trabalhos demonstraram que a combinação de ferramentas de predição genômica (por exemplo, GBLUP) com ensaios de progênies em múltiplos locais pode aumentar a acurácia e permitir seleção mais precoce, tanto para o crescimento quanto para as características de resina (Lai *et al.*, 2017; Papin *et al.*, 2024). Estudos sobre componentes químicos da resina mostram herdabilidades de moderadas a altas, abrindo possibilidades para integrar a química da resina ao processo de seleção (Lai *et al.*, 2020). Avanços estatísticos, como a correção da variação espacial em ensaios de campo, também têm se mostrado eficientes em melhorar as estimativas de parâmetros genéticos (Cappa *et al.*, 2022).

2.5 Caracterização das espécies de *Pinus* mais utilizadas no Brasil para extração de goma-resina

2.5.1 *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm

Pinus elliottii var. *elliottii* Engelm é uma espécie subtropical, originária da região sul dos Estados Unidos, ocorrendo na Flórida (de Aguiar *et al.*, 2011) (Figura 1). Cresce em áreas com temperatura média anual entre 15 e 24°C, pode tolerar até 32°C no mês mais quente e requer chuvas em torno de 1.150 a 1.500 mm, bem distribuídas, sem déficit hídrico (Nilsson *et al.*, 2020).

Figura 1 – Mapa da ocorrência natural do *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm.

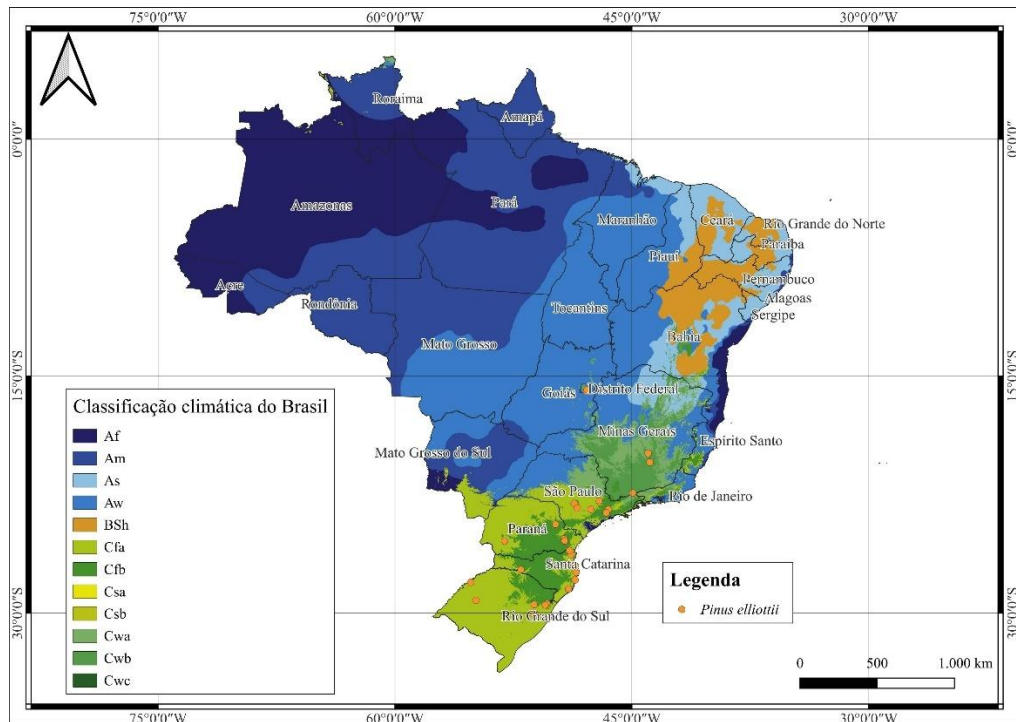


Fonte: (Adaptado de Kronka *et al.*, 2005).

Seus plantios estão amplamente distribuídos na África do Sul, Nova Zelândia, Austrália e Brasil (Nunes *et al.*, 2016). No território brasileiro, a maior concentração dessas plantações encontra-se nas regiões Sul e Sudeste (Figura 2). A madeira, que apresenta boas características físicas e mecânicas - com densidade média de 0,46 g cm⁻³, possui diversos usos, sendo aproveitada nos mercados de madeira e goma-resina. Diferentemente dos Estados Unidos, a espécie é pouco utilizada para a fabricação de celulose no Brasil devido ao elevado teor de lignina e extrativos, quando comparado à *P. taeda*, por exemplo, que é indesejável no processo

de polpação, pois consome reagentes, principalmente no início do cozimento e também interfere na qualidade da polpa celulósica (Shimizu, 2008).

Figura 2 – Mapa das principais áreas plantadas com *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm no Brasil.



Fonte: (Adaptado de Kronka *et al.*, 2005 e Alvares *et al.*, 2013).

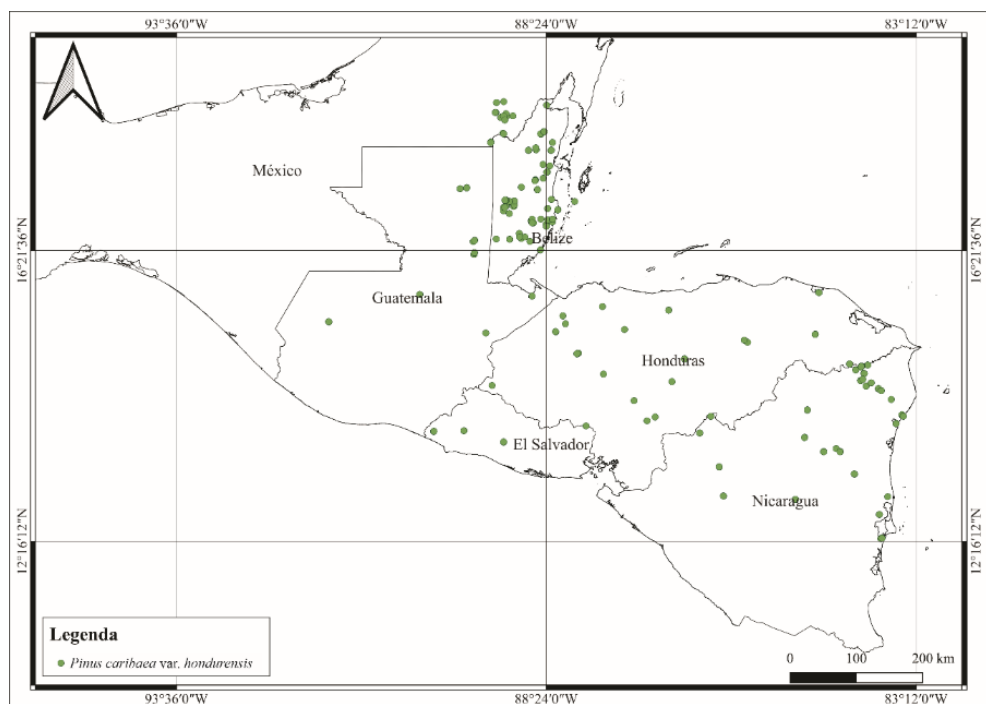
No entanto, ela se destaca no setor resinífero, respondendo por 80% da produção nacional, principalmente nos estados do Paraná, Santa Catarina e São Paulo (IBGE, 2025). Segundo dados da ARESB (2025), existem mais de 30 empresas consolidadas no ramo da goma-resinagem no país. A citar, como exemplo, a Resineves Agronegócios, o Grupo resinas Brasil e o AS resinas.

Ao final do ciclo de extração da goma-resina, é comum que a madeira seja encaminhada para serrarias, onde é aproveitada pela indústria madeireira. A espécie apresenta uma produtividade média de goma-resina de 4,5 kg árvore⁻¹ ano, podendo ter indivíduos com capacidade produtiva superior a 8,7 kg⁻¹ árvore⁻¹ ano, o que evidencia a variabilidade genética para a produtividade de goma-resina, de modo a possibilitar ganhos futuros com a seleção de indivíduos superiores em programas de melhoramento (Neis *et al.*, 2018; Neis *et al.*, 2019b).

2.5.2 *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. & Golf.

Pinus caribaea var. *hondurensis* Barr. & Golf. é uma espécie originária da América Central, sendo encontrada, naturalmente, em Belize, Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicarágua e México (Perry Júnior, 1991) (Figura 3). A espécie apresenta melhor crescimento em regiões com precipitação média anual entre 670 e 2.400 mm, temperaturas médias entre 22°C e 27°C, e não tolera a ocorrência de geadas (Donadoni *et al.*, 2010).

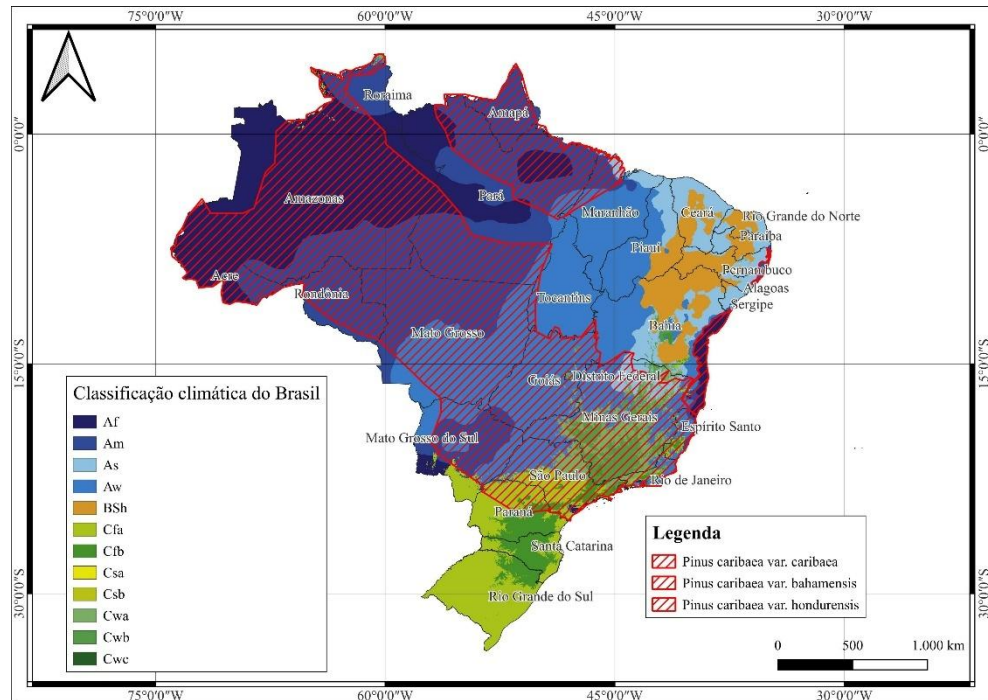
Figura 3 – Mapa da ocorrência natural do *P. caribaea* var. *hondurensis* Barr. & Golf.



Fonte: (Adaptado de Kronka *et al.*, 2005).

No Brasil, o *P. caribaea* var. *hondurensis* pode ser cultivado desde o norte do Paraná e o centro do estado de São Paulo, até a região amazônica (Kronka *et al.*, 2005), com plantios concentrados, principalmente, nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Rondônia (Figura 4). Essas regiões contribuem com parte dos 17% da produção nacional de goma-resina provenientes de espécies classificadas como tropicais, dentre elas *P. caribaea* e suas variações, *P. oocarpa*, dentre outros (ARESB, 2025; Resende; Borém; Leite, 2023). Em Minas Gerais, destacam-se os plantios localizados no Triângulo Mineiro, onde as condições edafoclimáticas se assemelham àquelas encontradas nas áreas de ocorrência natural da espécie, favorecendo seu desenvolvimento (Bila *et al.*, 2012; Chaves; Corrêa, 2005; Kronka *et al.*, 2005; Silva *et al.*, 2011).

Figura 4 – Mapa das áreas aptas ao plantio de *P. caribaea* no Brasil.



Fonte: (Adaptado de Kronka *et al.*, 2005 e Alvares *et al.*, 2013).

P. caribaea var. *hondurensis* é considerada a espécie de *Pinus* mais explorada economicamente no mundo para a produção de madeira. Ela é utilizada na fabricação de painéis, compensados, carvão, lenha, papel e na construção civil, devido às suas boas características físicas e mecânicas, com densidade média variando entre 0,48 e 0,53 g cm⁻³. Embora essa densidade atenda às exigências do setor de celulose, seu uso nesse segmento no Brasil ainda é restrito, em razão dos elevados teores de lignina e extrativos, que dificultam o processo de polpação (de Moraes; Duboc, 2008; Resende; Borém; Leite, 2023; Shimzu, 2008).

Adicionalmente, a espécie apresenta potencial para a produção de goma-resina (Hodge; Dvorak *et al.*, 2001). Conforme Santos *et al.* (2016), *Pinus caribaea* var. *hondurensis* apresentou, aos 27 anos, produtividade de goma-resina de **4,83 kg árvore⁻¹ ano** e alta variabilidade genética para as características de crescimento (altura, diâmetro à altura do peito e volume) e produtividade de goma-resina, de modo a possibilitar ganhos futuros com a seleção de indivíduos superiores.

A espécie apresenta disposição à manifestação do *fox tail* (rabo-de-raposa), uma anomalia no desenvolvimento da árvore, caracterizada pela formação de uma copa irregular, com ramificações anormais e em ângulos acentuados, o que confere à planta uma aparência semelhante à cauda de uma raposa. Essa condição é predominantemente de origem genética,

mas também pode ser influenciada por fatores ambientais, como práticas inadequadas de manejo, competição por luz e nutrientes, variações nas características do solo e volume chuvoso acima do ideal para o seu cultivo. As principais consequências do *fox tail* são a redução na qualidade da madeira e a diminuição do valor econômico da árvore, uma vez que essa deformação impacta negativamente o crescimento e a uniformidade das plantações (Shimizu, 2006).

O controle genético surge como uma estratégia essencial para mitigar essa anomalia, sendo realizado por meio da seleção de genótipos que não apresentem predisposição ao seu desenvolvimento. A prevenção do *fox tail* envolve a escolha de material genético menos suscetível a essa deformação, práticas de manejo florestal adequadas, como o espaçamento correto entre árvores e o controle da competição, além de um monitoramento contínuo das plantações para a detecção precoce de sinais da anomalia, permitindo a adoção de medidas corretivas oportunas (Shimizu, 2006).

REFERÊNCIAS

ALVARES C.A. *et al.* KÖPPEN'S climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711-728, 2013.

ARAÚJO, M. J. *et al.* Número de repetições, de plantas por parcela e de avaliações para testes clonais de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, p. 923-931, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015001000008>

ASSOCIAÇÃO DOS RESINADORES DO BRASIL-ARESB. **Estatísticas**. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://www.aresb.com.br/portal/estatisticas/> Acesso em: 03 de abril de 2025.

BILA, J.M.; SANQUETTA, C.R.; MACHADO, S.A. classificação de sítios com base em fatores edáficos para *Pinus caribaea* var. *hondurensis* na região de prata, Minas Gerais. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 42, n. 3, p. 465 - 474, 2012.

BOMBONATO, A. L. *et al.* Rubber tree ortet-ramet genetic correlation and early selection efficiency to reduce rubber tree breeding cycle. **Industrial Crops and Products**, v. 77, p. 855-860, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.09.020>

BORÉM, A., MIRANDA, G. V., e FRITSCHÉ-NETO, R. **Melhoramento de plantas**. 8. ed.: São Paulo: Oficina de Textos, 2021.

BRANDÃO, M.M. *et al.* Genetic diversity of neotropical tree *Myrcia splendens* (Myrtaceae) in a fragment-corridor system in the Atlantic rainforest. **Flora**, v. 216, p. 35- 41, 2015. DOI: 10.1016/j.flora.2015.07.006.

- BRITO, J. O. *et al.* Resinagem e qualidade de resinas de pinheiros tropicais: I. comparações entre espécies e época de resinagem. Piracicaba: IPEF, 1978. 20 p. (IPEF. Circular técnica, 35)
- BURDON, R.D. **An Introduction to Pines**. In: *Pines of silvicultural importance*. Oxon, 2002.
- BUSINSKÝ, R. New insight into the morphology of the long shoots of *Pinus* (*Pinacea*). *Flora, Munich*, n. 223, p.167-190, may. 2016.
- CANTARELLI, E. B. *et al.* Quantificação das perdas no desenvolvimento de *Pinus taeda* após o ataque de formigas cortadeiras. **Ciência Florestal**, v. 18, n. 1, p. 39-45, 2008.
- CARVALHO, P. L. P. T.; GODINHO, T O.; MOREIRA, D. A. F. Pró-resina: Uma alternativa para a diversificação de renda no Espírito Santo. **Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural**, Vitória/ES: Documentos n° 246: Incaper. 2018.
- CHAUHAN, S. S. *et al.* Methods for the very early selection of *Pinus radiata* D. Don. for solid wood products. **Annals of Forest Science**, v. 70, n. 4, p. 439-449, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0270-3>
- CHAVES, R.Q.; CORRÊA, G.F. Macronutrientes no sistema solo *Pinus caribaea* Morelet em plantios apresentando amarelecimento das acículas e morte de plantas. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.29, n.5, p.691-700, 2005.
- CAPPA, E. P. *et al.* Improving lodgepole pine genomic evaluation using spatial correlation structure and SNP selection with single-step GBLUP. **Heredity**, v. 128, p. 209–224, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41437-022-00508-2>.
- CORRÊA, P.R.R. *et al.* Seleção precoce de progênies de *Pinus radiata* a *Sphaeropsis sapinea*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 2, p. 275-281, abr./jun., 2012.
- de AGUIAR, A. V. *et al.* Programa de melhoramento de pinus na Embrapa Florestas. Embrapa Florestas, 2011. 83p.
- DIAS, C. R. G.; MBANZE, A. A. Crescimento e Adaptabilidade de Procedências e Progênies de *Pinus tecunumanii* no Norte de Moçambique. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 19, n. 3, p. 285-298, 2020.
- DING, X. *et al.* Genetic analysis and elite tree selection of the main resin components of slash pine. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 2023.
- DONADONI, A. X. *et al.* Relação hipsométrica para *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e *Pinus tecunumanii* em povoamento homogêneo no Estado de Rondônia. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 12, p. 2499-2504, 2010.
- DUARTE, J. F.; CARVALHO, D.; VIEIRA, F.A. (2015). Genetic conservation of *Ficus bonijesulapensis* R.M. Castro in a dry forest on limestone outcrops. **Biochemical Systematics and Ecology**, 59: 54-62, 2015. DOI: [dx.doi.org/10.1016/j.bse.2015.01.008](https://doi.org/10.1016/j.bse.2015.01.008).

- FERRO, F. S. *et al.* Environmental life cycle assessment of industrial pine roundwood production in Brazilian forests. **Science of The Total Environment, Amsterdam**, v. 640-641, p. 599-608, 2018. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.262
- FRITZSONS, E. *et al.* Grupos climáticos para implantação de experimentos de melhoramento e plantio de *Pinus taeda* no Sul do Brasil. **Embrapa Informação Tecnológica**, Colombo: Embrapa Florestas. 2022.
- GONÇALVES, P. S. *et al.* Early selection for growth vigor in rubber tree genotypes in northwestern São Paulo State (Brazil). **Genetics and Molecular Biology**, v. 21, p. 515-521, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-47571998000400018>
- GURGEL GARRIDO, L. M.; RIBAS, C.; GARRIDO, M. A. de O. Variabilidade da produção de resina em *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm. **Rev. Inst. Flor.**, São Paulo, v. 6, p. 113-128, 1994.
- HODGE, G. R.; DVORAK, W. S. Genetic parameters and provenance variation of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* in 48 international trials. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 31, n. 3, p. 496-511, 2001.
- HOOD, S.; SALA, A. Ponderosa pine resin defenses and growth: metrics matter. **Tree Physiology**, v. 35, n. 11, p. 1223-1235, 2015.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório anual 2024 do setor florestal brasileiro de árvores plantadas**. São Paulo, 2024. Disponível em: <<chrome-extension://efaidnbmninnkjkpcjpdglcefindmkaj/https://iba.org/relatorio2024.pdf>> Acesso em: 13 de abril de 2025.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção da extração vegetal e da silvicultura: 2023**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/16/0> . Acesso em: 02 de abril de 2025.
- ISHIBASHI, V. *et al.* Estratégias de seleção genética para silvicultura clonal em *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. 2022.
- KRONKA, F.J.N.; BERTOLANI, F.; PONTE, R.H. **A cultura de Pinus no Brasil**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2005. 160p.
- LAI, M. *et al.* Genetic variation, heritability and genotype × environment interactions of resin yield, growth traits and morphologic traits for *Pinus elliottii* at three progeny trials. **Forests**, v. 8, p. 409, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/f8110409>.
- LAI, M. *et al.* Inheritance of resin yield and main resin components in *Pinus elliottii* Engelm. at three locations in southern China. **Industrial crops and products**, v. 144, n.11 p. 20-65.2020.
- LANGE, B. M. The evolution of plant secretory structures and emergence of terpenoid chemical diversity. **Annual Review of Plant Biology**, 66, 139-159.2015.
- LIEFELD, T. A. Increased naval stores production from chemically treated streaks. **South. For. Exp. Station**, v. 97, p. 6. 1940.

LIMA, J. L. *et al.* Early selection of parents and trees in *Eucalyptus* full-sib progeny tests. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 11, p. 10-16, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1984-70332011000100002>

LIU, Q.H. *et al.* Genetic variation and correlation among resin yield, growth, and morphologic traits of *Pinus massoniana*. **Silv. Genet.**, 62, 38–44. 2013.

MANFIO, C. E. *et al.* Avaliação de progênes de macaúba na fase juvenil e estimativas de parâmetros genéticos e diversidade genética. **Pesquisa Floresta Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 69, p. 63, 2012.

MASSARO, R. A. M. *et al.* Viabilidade de aplicação da seleção precoce em testes clonais de *Eucalyptus* spp. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 4, p. 597-609. 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/198050982418>

MATTOS, J.R. Espécies de pinus cultivados no Brasil. São Paulo: Chacaras e quintais. 133p.

MCKEAND, S. E. The evolution of a seedling market for genetically improved loblolly pine in the southern United States. **Journal of Forestry**, v.117n. 3, p. 293-301.2019.

MCREYNOLDS, R. D.; GANSEL, C. R. Pinheiro de alta produção de goma: Desempenho até os 30 anos. **Sul. J. Appl. Silvicultura**, v. 9, p. 29–32. 1985. DOI:10.1093/sjaf/9.1.29

De MORAES N.; DUBOC, P. S. E. Parâmetros Genéticos da Densidade Básica da Madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, v. 213, 2008.

MOREIRA, DAF; GODINHO, T. de O.; CARVALHO, PLPT. Pró-resina: uma alternativa para a diversificação de renda no Espírito Santo. 2018.

NEIS, *et al.* Biomass yield of resin in adult *Pinus elliottii* Engelm. trees is differentially regulated by environmental factors and biochemical effectors. **Industrial Crops and Products**, v.118, p. 20-25, 2018. ISSN 0926-6690, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.03.027> .

NEIS, F. A. *et al.* Multiple industrial uses of non-wood pine products. **Industrial Crops and Products**, v. 130, p. 248-258. 2019a.

NEIS, F. A. *et al.* Resin exudation profile, chemical composition, and secretory canal characterization in contrasting yield phenotypes of *Pinus elliottii* Engelm. **Industrial Crops and Products**, v. 132, p. 76-83.2019b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.02.013>

NIERI, É. M. *et al.* Selection of *Pinus* spp. progenies in Lavras (Minas Gerais, Brazil) at 36 months of age. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 52. 2022.

NILSSON, O. *et al.* Growth and modulus of elasticity of pine species and hybrids three years after planting in South Africa. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 82, n. 4, p. 367-376.2020.

- NUNES, S. *et al.* Physiological characterization and true-to-typeness evaluation of *in vitro* and *ex vitro* seedlings of *Pinus elliottii*: A contribution to breeding programs. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 107, p. 222-227. 2016.
- PALUDETO, J. G. Z. *et al.* Variabilidade genética em população base de *Eucalyptus viminalis* em idade juvenil. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 126, p. 1-9. 2020.
- PAPIN, A. *et al.* Unlocking genome-based prediction and selection in conifers: the key role of within-family prediction accuracy illustrated in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait). **Annals of Forest Science**, v. 81, n. 1, p. 1–15, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13595-024-01269-0>.
- PENTEADO, S. do R. C. *et al.* Manual para o controle da vespa-da-madeira em plantios de pinus: 2024. [S.l.]: [s.n.], 2024.
- PENTEADO, S. do R. C. *et al.* Sirex noctilio. In: Manual para o controle da vespa-da-madeira em plantios de pinus. [S.l.]: [s.n.], 2021.
- PENTEADO, S.; REIS FILHO, W.; IEDE, E. T. Os pulgões gigantes do pinus, *Cinara pinivora* e *Cinara atlantica*, no Brasil. Colombo: Embrapa Florestas, 2004. (Embrapa Florestas. Circular Técnica, 87).
- PEREK, M. *et al.* Predicted genetic gains for growth traits and wood resistance in *Pinus maximinoi* and *Pinus tecunumanii*. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 22. (2022).
- PERRY JÚNIOR, J. P. **The pines of Mexico and Central America**. Portland, Timber Press, 1991. 231 p.
- PHUN, L.; SNEAD, D.; HURD, P.; JING, F. Industrial Applications of Pine-Chemical-Based Materials. **Sustainable Polymers from Biomass**, p. 151-179. 2017.
- RANSAN, L. G.; VILASBOA, J.; COSTA, C. T. D. Método da gota de exsudação versus gravimetria de resina em braquiblastos: validação de indicadores de seleção precoce para capacidade resinífera de *Pinus elliottii* Engelm. 2019.
- RATOLA, N. *et al.* Differences between *Pinus pinea* and *Pinus pinaster* as bioindicators of polycyclic aromatic hydrocarbons. **Environmental and Experimental Botany**, v. 72, n. 2, p. 339–347, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.04.012>
- REIS FILHO, W. *et al.* Recomendações para o controle químico de formigas cortadeiras em plantios de *Pinus* e *Eucalyptus*. Colombo: Embrapa Florestas, 2015. 7p. (Circular Técnico, 354).
- REIS FILHO, W.; PENTEADO, S.; IEDE, E. T. Controle biológico de pulgão-gigante-do-pinus, *Cinara atlantica* (Hemiptera: Aphididae), pelo parasitóide *Xenostigmus bifasciatus* (Hymenoptera: Braconidae). Colombo: Embrapa Florestas, 2004. 3p. (Comunicado técnico, 122).
- REIS, C. A. F. *et al.* Competitividade da cadeia produtiva de florestas plantadas em Goiás: a visão das organizações públicas e privadas. DOCUMENTOS 220, 360: 1-35. 2021.

RESENDE, M. D. V.; BORÉM, A.; LEITE, F. P. **Pinus: do melhoramento genético à produção florestal**. São Paulo: Oficina de texto, 2023.

RESENDE, M. D. V.; DUARTE, J. B. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 37, n. 3, p. 182–194. 2007.
ROBERDS, J. H.; STROM, B. L. Repeatability estimates for oleoresin yield measurements in three species of the southern pines. **Forest ecology and management**, v. 228, n. 1-3, p. 215-224. 2006.

RODRIGUES, K.C. S. Extração de óleo resina de *Pinus elliottii* no Sul do Brasil: caracterização e perspectivas. **Revista da Madeira**, v. 116, p. 86-90. 2008.

RODRIGUES-CORRÊA, K. C. da S.; LIMA, J. C.; FETT-NETO, A. G. Oleoresins from *Pine*: Production and Industrial Uses. **Natural Products**, [s.l.], p.4037- 4060, 2013.
http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-22144-6_175.

ROMANELLI, R. C. Seleção precoce em progênies de *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm. **Revista do Instituto Florestal**, v. 7, n. 1, p. 101-113. 1995.

SALVADOR, V. T. *et al.* Biomass transformation: hydration and isomerization reactions of turpentine oil using ion exchange resins as catalyst. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 15, p. 100214, mar. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scp.2020.100214>.

SANTOS, H.G. *et al.* Parâmetros genéticos para caracteres silviculturais em cedro australiano. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 130, p. 3467. 2021. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n130.05>

SANTOS, W. *et al.* Genetic variation of wood and resin production in *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barret & Golfari. **Silvae Genetica**, Warsaw, v.65, n.1, p. 31-37, 2016.

SHIMIZU, J. H. *Pinus* na silvicultura brasileira. *Revista Madeira*, Curitiba, ano 16, n. 99, p. 4-14, set. 2006.

SHIMIZU, J. Y. Melhoramento genético de coníferas florestais para produção de madeira e resina. Macroprograma 2- Competividade e sustentabilidade. 2007.

SILVA, F.; CORTE, A.P.D.; SANQUETTA, C.R. Equações de afilamento paradescrever o volume total do fuste de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* na região do Triângulo Mineiro. **Scientia forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 91, p. 367-376, set. 2011.

SOARES, N.S.; SILVA, M.L.; CORDEIRO, S.A. Produto interno bruto do setor florestal brasileiro, 1994 a 2008. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.38, n.4, p.725- 732, 2014.

SQUILLACE, A.E.; BENGSTON, G.W. Inheritance of gum yield and other characteristics of slash pine. In Proceedings of the Sixth Southern Conference on Forest Tree Improvement, Gainesville, FL, USA, 7–8 June 1961; School of Forestry, University of Florida: Gainesville, FL, USA, 1961; pp. 85–96.

- TADESSE, W. *et al.* Evaluation of high resin yielders of *Pinus pinaster* AIT. For. **Genet.**, v. 8, p. 271–278. 2001.
- WU, HONG; HU, ZHENG-HAI. Comparative anatomy of resin ducts of the Pinaceae. **Trees**, v. 11, p. 135-143, 1997.
- XAVIER, A.; WENDLING; SILVA, R.L. **Silvicultura clonal**. Viçosa: EditoraUFV. 2009. 272 p.
- YADAV, B. K.G; IDWANI, B.; VYAS, A. Rosin: Recent advances and potential applications in novel drug delivery system. **Journal of Bioactive and Compatible Polymers**, v. 31, n. 2, p. 111-126. 2016.
- YANG, Y.; LI, C. Photosynthesis and growth adaptation of *Pterocarya stenoptera* and *Pinus elliottii* seedlings to submergence and drought. **Photosynthetica**, v. 54, n. 1, p. 120-129. 2016.
- YI, M. *et al.* Resin yield in *Pinus elliottii* Engelm. is related to the resin flow rate, resin components and resin duct characteristics at three locations in southern China. **Industrial Crops and Products**, v. 160, n.1, p. 31- 41. 2021.
- YUAN, T. *et al.* Avaliação dos benefícios da extração precoce de *Pinus elliottii*. **Pesquisa Agrícola Asiática**, v. 5, n. 9, p. 100-102. 2013.
- ZAS, R. *et al.* Variation in resin flow among Maritime pine populations: Relationship with growth potential and climatic responses. **Forest Ecology and Management**, v. 474, p. 118351.2020.
- ZHANG, S.; JIANG, J.; LUAN, Q. Genetic and correlation analysis of oleoresin chemical components in slash pine. **Genet Mol Res**, v. 15, n. 3, p. 1-12.2016
- ZOBEL, B.J.; TALBERT, J.T. Applied tree improvement. **John Wiley & Sons**, New York. 1984. 505 p.
- ZOBEL, B.J; SPRAGUE, J. R. A forestry revolution: The history of tree improvement in the Southern United States. **Carolina Academic Press**, Durham, NC. 1993.161 p.
- ZULAK, K. G.; BOHLMANN, J. Terpenoid biosynthesis and specialized vascular cells of conifer defense. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 52, n. 1, p. 86-97. 2010.

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS 1, 2 e 3

ARTIGO 1 – GENETIC PARAMETERS AND SELECTION STRATEGIES FOR *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm IN NON-TRADITIONAL CULTIVATION REGION IN SOUTHEASTERN BRAZIL

ABSTRACT

Pinus elliottii var. *elliottii* Engelm is a prominent species in the forestry sector, but it remains little studied regarding to the gum-resin yield and the adaptation in the subtropical regions of Minas Gerais state. This study presents the first genetic evaluation of *P. elliottii* var. *elliottii* progenies in Minas Gerais state, southeastern Brazil, aiming to estimate genetic parameters, correlations, and selection strategies for growth and gum-resin production. Ten half-sib progenies were evaluated in a randomized complete block design, with thirty replications and one plant per plot. The traits analyzed were: survival at 9 years, height (H) from 2 to 5 years, diameter at breast height (DBH) from 3 to 9 years, and gum-resin yield (GRY) at 9 years. Mixed models were applied to estimate genetic parameters, correlations, and selection gains. The survival rate of 91% confirms the species adaptation to local conditions. The heritability estimates ranged from moderate to high for DBH (0.23–0.56), H (0.31–0.57), and GRY (0.48), with higher values at the progeny mean level. Strong age–age genetic correlations for DBH and H indicate the feasibility of the early selection, and the correlations between DBH and H suggest the possibility of indirect selection for growth. In contrast, the correlations between growth and GRY were low, suggesting independent selection. The direct selection for gum-resin yield and DBH provided the highest genetic gains (10.34% and 8.31%), whereas the selection indices yielded lower percentages but remain applicable for multi-purpose breeding programs. These results highlight the potential of the species for breeding programs targeting both growth and gum-resin production.

Keywords: forest breeding; progeny testing; gum resin production.

RESUMO

Pinus elliottii var. *elliottii* Engelm é uma espécie de destaque no cenário florestal, mas ainda pouco estudada quanto à produtividade de goma-resina e à adaptação em regiões subtropicais mineiras. Este trabalho apresenta a primeira avaliação genética de progênies de *P. elliottii* var. *elliottii* no estado de Minas Gerais, região sudeste do Brasil, visando estimar parâmetros genéticos, correlações e estratégias de seleção para crescimento e produção de goma-resina. Foram avaliadas dez progênies de meios-irmãos em delineamento de blocos casualizados, com trinta repetições e uma planta por parcela. As variáveis analisadas foram: sobrevivência aos 9 anos, altura (H) dos 2 aos 5 anos, diâmetro à altura do peito (DAP) dos 3 aos 9 anos e produtividade de goma-resina (PGR) aos 9 anos. Utilizaram-se modelos mistos para estimativas genéticas, correlações e ganhos por seleção. A sobrevivência de 91% confirma a adaptação da espécie às condições locais. As herdabilidades foram de moderadas a altas para DAP (0,23–0,56), H (0,31–0,57) e PGR (0,48), com maiores valores entre médias de progênies. As altas correlações genéticas idade-idade para DAP e H indicam viabilidade de seleção precoce, e entre DAP e H revelam possibilidade de seleção indireta para crescimento. Já as correlações entre crescimento e PGR foram baixas, sugerindo seleção independente. A seleção direta para goma-resina e DAP apresentou os maiores ganhos (10,34% e 8,31%), enquanto índices combinados mostraram menores percentuais, mas aplicáveis ao melhoramento para múltiplos usos. Os resultados evidenciam o potencial da espécie para programas de melhoramento voltados ao crescimento e à goma-resina.

Palavras-chave: melhoramento florestal; teste de progênies; produção de goma-resina.

1 INTRODUCTION

Pinus elliottii var. *elliottii* Engelm is a subtropical conifer native to the southeastern United States. Introduced in Brazil during the 1960s, through fiscal incentives, the species adapted well to local conditions and quickly became commercially relevant. Today, its plantations are predominantly concentrated in the southern and southeastern regions of the country, particularly in Rio Grande do Sul, central Paraná, and southern São Paulo states, where the climate is favorable for its development (Fritzsos *et al.*, 2022; Nilsson *et al.*, 2020; Yuan *et al.*, 2013).

The species plays a key role in the Brazilian forestry sector, with applications in pulp, timber, and resin industries. It is currently responsible for approximately 80% of the country's gum resin production, which is estimated at 142 171 t year⁻¹ (IBGE, 2025; Nunes *et al.*, 2016; Shimizu, 2008; Yang; Li, 2016). Although the resin market has expanded significantly in recent decades, most forest plantations have historically been managed with a focus on wood production (de Aguiar *et al.*, 2011). The extraction of gum resin has gained strategic importance, serving as a supplementary or primary income source for small and medium producers (de Freitas *et al.*, 2023; Lima *et al.*, 2021). Despite advances in silviculture and genetic improvement for wood traits, research targeting gum resin production remains limited. Critical aspects such as gum resin yield optimization, product quality, and regional adaptation lack technical and scientific development (Ding *et al.*, 2022; Neis *et al.*, 2019; Shimizu; Spir, 1999). These gaps hinder fully exploitation of *P. elliottii*'s potential as a multi-use species.

In breeding programs aimed at gum resin production, it is essential to assess traits such as diameter at breast height, height, crown development, the number and volume of resin canals, and gum resin yield itself. These characteristics are influenced by genetic and environmental factors, and can be improved through selection and management (Meng Lai *et al.*, 2020; Neis *et al.*, 2019). Progeny tests are valuable tools in this context, as they enable the estimation of genetic parameters and the identification of superior families and genotypes, while supporting conservation and strategies for maintaining the genetic diversity (Brandão *et al.*, 2015; Duarte *et al.*, 2015; Paludeto *et al.*, 2020).

Preliminary data on *P. elliottii* indicate an average gum resin yield of approximately 4.5 kg tree⁻¹ year⁻¹, although individuals may vary widely, with production ranging from less than 3.93 kg to over 8.70 kg tree⁻¹ year⁻¹ (Neis *et al.*, 2018; Neis *et al.*, 2019). This variability highlights significant genetic potential to be explored through selective breeding.

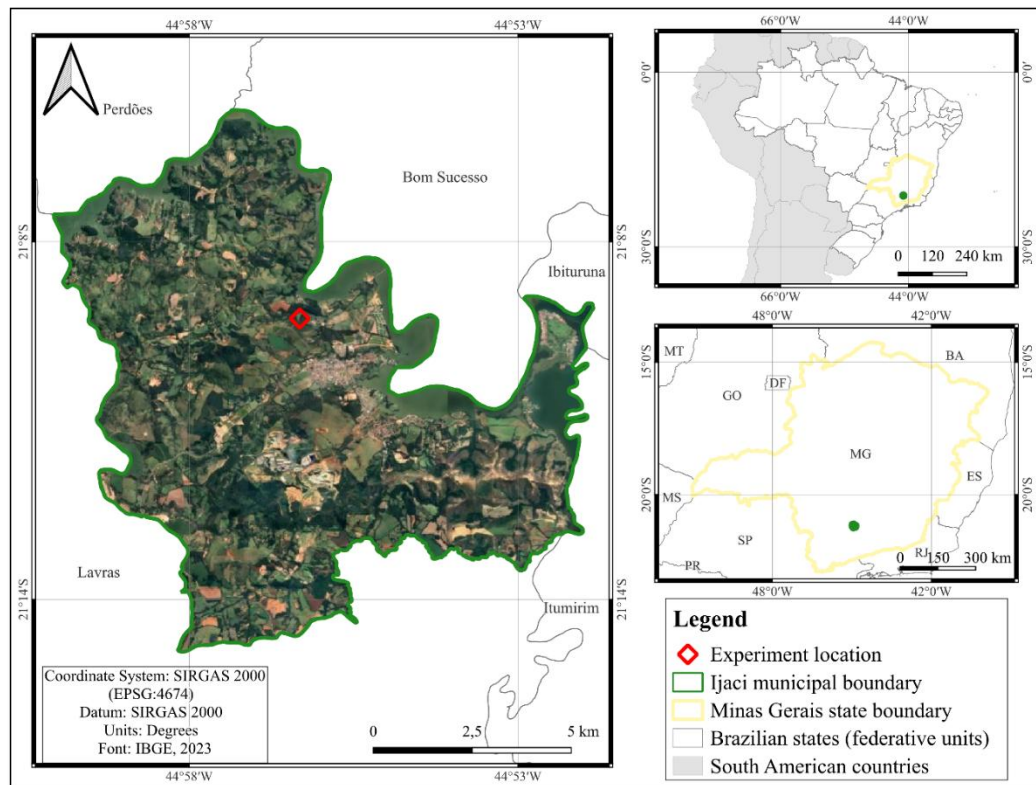
In Minas Gerais state, southeastern Brazil, no previous studies have evaluated the performance of *P. elliottii* in terms of gum resin or growth traits. However, the area has attracted attention for forest expansion due to its economic and environmental potential, reinforcing the need for technical validation of species adaptability and productive capacity (Carvalho *et al.*, 2018; Reis *et al.*, 2021). Therefore, the objectives of this study were to (i) estimate genetic parameters for the traits diameter at breast height (DBH), height (H), and gum resin yield (GRY); (ii) analyze the phenotypic and genetic correlations among these variables; and (iii) select the most promising progenies for future breeding programs in the tropical region.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 Study Site

The experiment was conducted at Palmital Farm, part of the Federal University of Lavras - UFLA, located in Ijaci, in the Campo das Vertentes mesoregion, Minas Gerais state, Brazil (21° 9'34.98"S, 44°55'59.15"O; altitude: 833 m) (Figure 1), a non-traditional cultivation region for the species. The area lies in an ecotonal region between the Atlantic Forest and the Cerrado biomes, characterized as a semideciduous seasonal forest. The soil is classified as a dark red Latosol (Embrapa, 2018), and the climate is humid subtropical (Cwa), with dry winters and rainy summers (Beck *et al.*, 2023). The mean annual temperature is 19.9°C, with monthly averages ranging from 16.9°C (June–July) to 22.8°C (February), and average yearly precipitation of 1,486 mm (INMET, 2024).

Figure 1 - Map of the experimental area with progenies of *P. elliottii* var. *elliottii* in Ijaci-MG state, southeastern Brazil.



Source: From the author (2025).

2.2 Genetic Material and Experimental Design

Ten open-pollinated progenies of *P. elliottii* were evaluated, derived from selected mother trees in commercial plantations of Resineves Agronegocios in Itapeva, São Paulo state. The seedlings were produced in 55 cm³ tubes with commercial substrate. The planting occurred in August 2015, using a 3 m × 3 m spacing, following the methodology described by Nieri *et al.* (2022). The experimental design was a randomized complete block with 30 replications and one tree per plot.

2.3 Data collection

The survival (S) was assessed at nine years, assigning 0 to dead plants and 1 to living ones. From three to nine years, the diameter at breast height (DBH – cm) was measured using a caliper. The height (H–m) of the trees was measured from two to five years using a graduated

ruler, with measurement subsequently suspended due to technical difficulties imposed by the increase in the tree size and in the densification of the area.

The gum resin yield (GRY - kg per tree) was measured at nine years of age over six months (November 2024 to May 2025 - spring/summer and part of fall). Only trees with DBH ≥ 15 cm were selected (230 of the 300 trees in the experiment were considered). The tapping method was adapted from Lazarotto, Candaten, and Balbinot (2023). Each tree received a single groove on one side of the trunk, approximately 10 –15 cm in length and 2 cm in width, reaching the cambium without damaging the wood. A 12% sulfuric acid-based stimulant was applied to the groove every 15 days using a pick with a dosing nozzle. The gum resin was collected in custom plastic containers (35 mm \times 25 mm, 200 μ m), fixed with galvanized wire, and supported by a flexible rod (Figure 2). At the end of the extraction period, contaminants such as needles and water were discarded, and the gum resin mass (kg tree^{-1}) was determined using a precision scale. The border trees were excluded from final analyses (Figure 3).

Figure 2 – Step-by-step for the striation. A- Splitter; B- Opening of the support moustache for the collection and storage container; C- Installation of the collection and storage bag; D- Opening of the first spline; E- Application of the stimulating paste; F- Tree in the process of releasing gum resin after the complete procedure.



Source: From the author (2025).

Figure 3 – Step-by-step gum resin collection. A - Collection container full; B - Detaching the wire from the trunk; C - Carefully removing the container; D - Cleaning the waste and removing the water; E - Weighing; F - Packing the gum resin in a bucket/gallon for storage and transportation.



Source: From the author (2025).

2.4 Statistical Analyses

All analyses were performed in *R* (R Core Team, 2024). The data importation was carried out using the *readxl* package (Wickham; Bryan, 2023). The variance components and the genetic parameters were estimated via mixed models using the *sommer* package (Covarrubias-Pazarán, 2016) (Table 1), based on the following model:

$$y = Xb + Za + e \tag{1}$$

Where: y is the vector of observations; b is the vector of repetition effects (fixed); a is the vector of genetic effects or progenies (random); e is the vector of residues (random). X and Z represent the incidence matrices for the effects as mentioned earlier.

The likelihood ratio tests (LRT) with a significance level of 5%, the phenotypic correlations (Equation 11) (Table 1), the genotypic correlations (Equation 12) (Table 1), and the genetic gain (Equation 13) (Table 1) were also estimated using the *sommer* package (Covarrubias-Pazarán, 2016). The genetic gain for DBH (cm) and GRY (kg tree⁻¹) at nine years of age was calculated, considering the positive genetic values of the evaluated progenies. The accuracy was determined using 100 bootstrap resamples.

Table 1 – Equations for estimating the genetic parameters in progenies of *P. Elliottii* var. *elliottii*, in Ijaci-MG state, southeastern Brazil.
(Continued)

Order	Parameters	Equations	Components
1	Additive genetic individual heritability - h_a^2	$h_a^2 = \frac{\sigma_a^2}{\sigma_p^2}$	Additive variance - σ_a^2 Phenotypic variance - σ_p^2
2	Mean progeny heritability- h_m^2	$h_m^2 = \frac{\sigma_g^2}{\sigma_g^2 + \frac{\sigma_e^2}{n}}$	Genetic variance - σ_g^2 Residual variance - σ_e^2 Number of plants per progeny - n
3	Additive heritability within progeny - h_{ad}^2	$h_{ad}^2 = \frac{\sigma_a^2}{\sigma_a^2 + \sigma_e^2}$	Additive variance - σ_a^2 Residual variance - σ_e^2
4	Accuracy of the progeny selection - $Acrop$	$Acrop = \sqrt{h_m^2}$	Mean progeny heritability- h_m^2
5	Coefficient of the individual genetic variation - $CV_i\%$	$CV_i = \frac{\sqrt{\sigma_a^2}}{m} \cdot 100$	Additive variance - σ_a^2 General average - m
6	Genetic variation among progenies - $CV_{gp}\%$	$CV_{gp} = \frac{\sqrt{\sigma_g^2}}{m} \cdot 100$	Genetic variance - σ_g^2 General average - m

Table 1 – Equations for estimating the genetic parameters in progenies of *P. elliottii* var. *elliottii*, in Ijaci-MG state, southeastern Brazil.
(Continued)

Order	Parameters	Equations	Components
7	Coefficient of residual variation - $CV_e\%$	$CV_e = \frac{\sqrt{\sigma_e^2}}{m} \cdot 100$	Residual variance - σ_e^2 General average - m
8	Variance of the error of prediction of the genotypic values – PEV	$PEV = (1 - Acrop^2)\sigma_a^2$	Additive variance - σ_a^2 Accuracy of the progeny selection - $Acrop$
9	Standard deviation of the predicted genotypic values – SEP	$SEP = \sqrt{PEV}$	Variance of the error of prediction of the genotypic values - PEV
10	Coefficient of the experimental variation - CV_r	$CV_r = \frac{CV_i}{CV_e}$	Coefficient of the individual genetic variation – $CV_i\%$ Coefficient of the residual variation - $CV_e\%$
11	Phenotypic correlation - r_p	$r_p = \frac{Cov(xy)}{\sigma_x \sigma_y}$	Covariance between traits X and Y - $Cov(xy)$ Standard deviation of traits X and Y - σ
12	Genetic correlation - r_{gxy}	$r_{gxy} = \frac{cov_a(xy)}{\sqrt{\sigma_{ax}^2 \cdot \sigma_{ay}^2}}$	Additive genetic covariance between traits X and Y - cov_a Additive genetic variance for variables X and Y - σ_a^2

Table 1 – Equations for estimating genetic parameters in progenies of *P. elliottii* var. *elliottii*, in Ijaci-MG state, southeastern Brazil.

(Conclusion)

Order	Parameters	Equations	Components
13	Genetic gain - ΔG	$\Delta G = X_s - X_0$	Average genetic values of the selected progeny - X_s Overall average genetic values of the progeny - X_0

Source: From the author (2025).

The combined direct selection for DBH (cm) and GRY (kg tree⁻¹) was carried out using Mulamba and Mock's (1978) rank sum method with weighted scores. The selection index for each progeny was calculated as:

$$I_i = \sum_{j=1}^n R_{ij} \cdot w_j \cdot x_{ij} \quad (5)$$

Where: I_i represents the index of the i -th progeny; R_{ij} corresponds to the rankings (descending orders of genetic merit) for the characteristics considered (DBH (cm) and GRY (kg tree⁻¹)); x_{ij} refers to the phenotypic or predicted genetic value of the j -th trait for the i -th progeny; w_j refers to the weights assigned to each trait. Three weighting scenarios were considered:

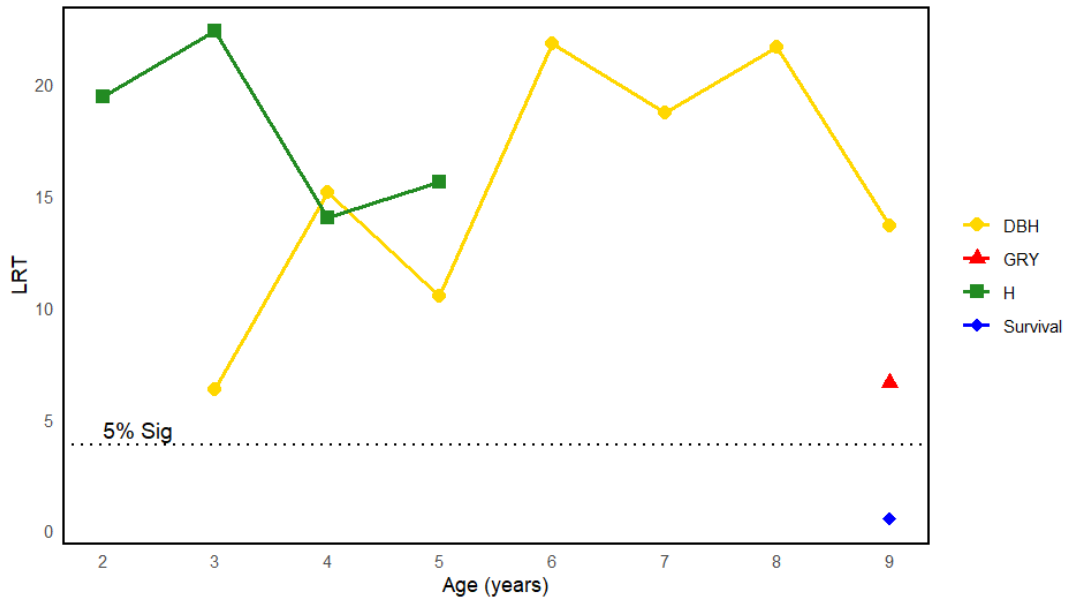
- (i) DBH priority: $w_1 = 0.7, w_2 = 0.3$
- (ii) GRY priority: $w_1 = 0.3, w_2 = 0.7$
- (iii) Equal weighting: $w_1 = w_2 = 0.5$

The four progenies with the lowest combined index values were selected in each case. The graphs were generated using the *ggplot2* (Wickham, 2024) package in the *R* software.

3 RESULTS

The survival rate of *P. elliottii* progenies at nine years of age was 91%, demonstrating the species' potential for adaptation to the study region. Using deviance analysis (ANADEV) by the likelihood ratio test, there is no difference between progenies in terms of survival at the 5% significance level. For the other variables analyzed, the effects of genotypes were significant (Figure 2), allowing us to infer the existence of variability in selecting superior genotypes for the characteristics of DBH (cm), H (m) at different ages, and GRY (kg tree⁻¹) at nine years.

Figure 4 - Analysis of deviance (ANADEV) for DBH (cm), and GRY (kg tree⁻¹), H(m), and survival, for progenies of *P. elliottii* var. *elliottii* in Ijaci-MG state, southeastern Brazil.



Source: From the author (2025).

Individual heritability estimates (h_a^2) for DBH (cm) ranged from 0.23 to 0.56, while for H (m) varied from 0.31 to 0.57, and for GRY (kg tree⁻¹) the estimate was 0.48. The heritability among progeny means (h^2_{mp}) was higher, ranging from 0.65 to 0.83 for DBH (cm), 0.72 to 0.83 for H (m), and 0.80 for GRY (kg tree⁻¹).

The selective accuracy (A_{crop}) remained above 0.70 for all traits and ages, indicating strong reliability in identifying superior individuals. The coefficients of individual genetic variation ($CV_{gi}\%$) ranged from 17.99% to 23.20% for DBH (cm), 16.73% to 18.89% for H (m), and 22.11% for GRY (kg tree⁻¹), reflecting considerable variability available for selection. Within-progeny coefficients of variation ($CV_{gp}\%$) ranged from 9.00% to 11.60% for DBH (cm), 8.37% to 9.45% for H (m), and 11.05% for GRY (kg tree⁻¹) (Table 2), indicating phenotypic differences among individuals within families.

Table 2. Genetic parameters for DBH (cm), H (m), and GRY (kg tree⁻¹), *P. elliottii* var. *elliottii* in Ijaci-MG state, southeastern Brazil.

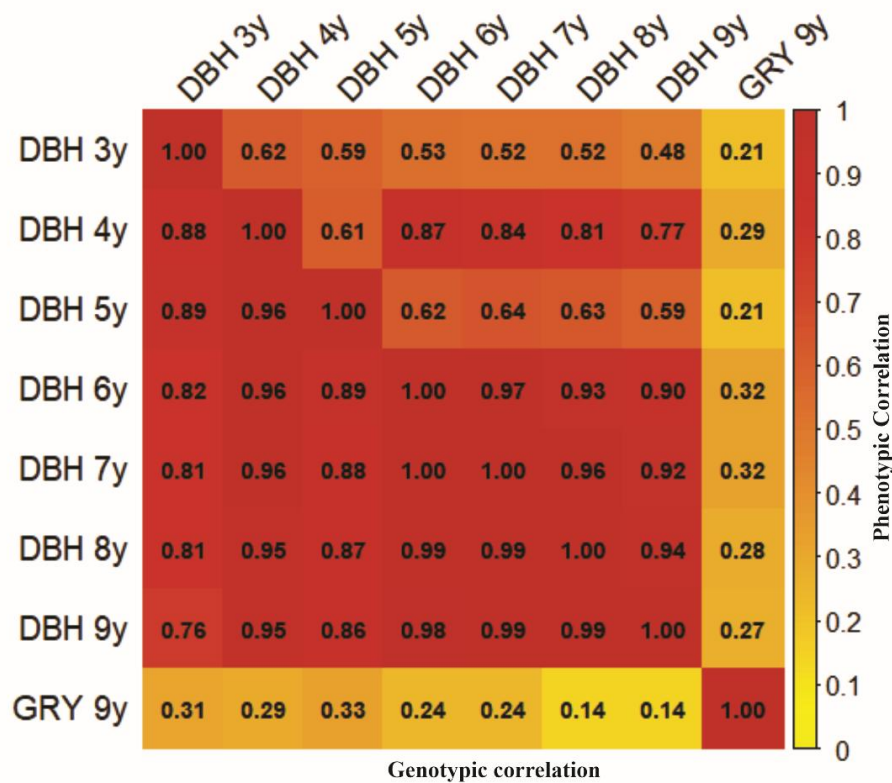
Ages/Parameters	h^2_a	h^2_{mp}	$Acrop$	h^2_{ad}	$CV_{gi}\%$	$CV_{gp}\%$	$CV_e\%$	$CV_r\%$	PEV	SEP	m
DBH 3 years	0.23 +- 0.16	0.65	0.81	0.19	18.95	9.48	37.95	0.25	0.09	0.31	5.49
DBH 4 years	0.43 +- 0.22	0.78	0.89	0.36	20.41	10.20	29.30	0.35	0.16	0.40	8.49
DBH 5 years	0.34 +- 0.20	0.73	0.86	0.28	17.99	9.00	29.68	0.30	0.25	0.50	10.80
DBH 6 years	0.56 +- 0.25	0.83	0.91	0.49	22.09	11.04	27.29	0.40	0.39	0.63	13.84
DBH 7 years	0.51 +- 0.24	0.81	0.90	0.44	21.21	10.60	27.85	0.38	0.46	0.68	14.84
DBH 8 years	0.56 +- 0.25	0.83	0.91	0.49	23.20	11.60	28.80	0.40	0.63	0.79	16.54
DBH 9 years	0.46 +- 0.23	0.79	0.89	0.38	21.25	10.63	29.95	0.35	0.74	0.86	17.74
H 2 years	0.31 +- 0.19	0.72	0.85	0.25	18.05	9.03	30.99	0.29	0.01	0.08	1.66
H 3 years	0.51 +- 0.24	0.81	0.90	0.43	18.89	9.45	24.84	0.38	0.02	0.13	3.14
H 4 years	0.57 +- 0.26	0.83	0.91	0.50	17.61	8.81	21.67	0.41	0.03	0.16	4.54
H 5 years	0.42 +- 0.22	0.78	0.88	0.35	16.73	8.37	24.37	0.34	0.05	0.23	5.79
GRY 9 years	0.48 +- 0.27	0.80	0.90	0.35	22.11	11.05	29.97	0.37	0.01	0.10	1.84

h^2_a - Individual heritability in the narrow sense; h^2_{mp} - Average heritability of the progeny; $Acrop$ - Progeny selection accuracy; h^2_{ad} - Additive heritability within; $CV_{gi}\%$ - Coefficient of individual additive genetic variation; $CV_{gp}\%$ - Coefficient of genetic variation among progenies; $CV_e\%$ - Residual coefficient of variation; $CV_r\%$ - Relative coefficient of variation; PEV - Variance of the prediction error of the genotypic values; SEP - Standard deviation of the predicted genotypic value; m - Overall average.

Source: From the author (2025).

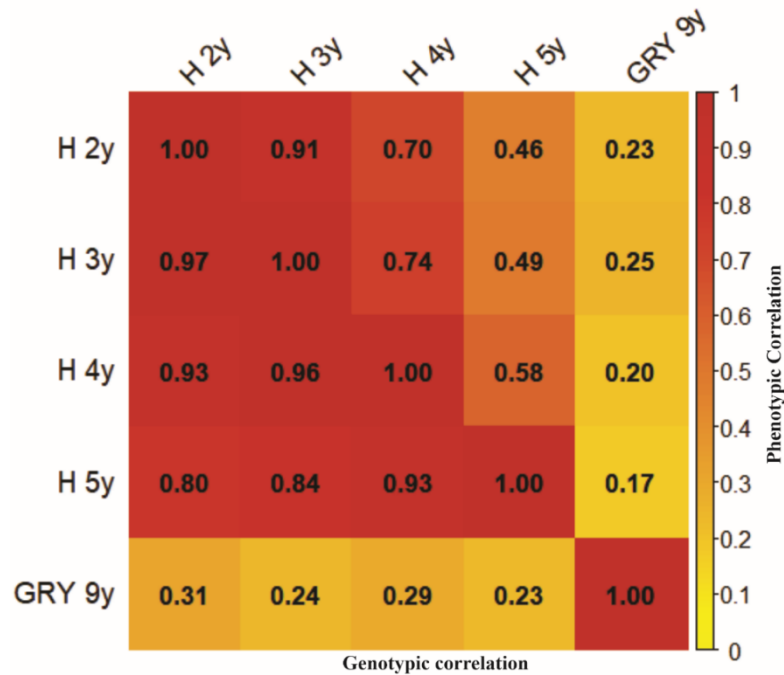
To better understand the consistency of the trait expression over time and their interrelationships, the age-age phenotypic and genotypic correlations were estimated for the traits. Correlations for DBH (cm) and H (m) across different ages were predominantly high and positive. For DBH (cm), phenotypic and genotypic correlations exceeded 0.70 in most comparisons, with genotypic values surpassing 0.95 from age four onwards, indicating strong temporal consistency in the growth performance (Figure 5). Height (m) followed a similar trend, with phenotypic correlations of 0.91 between ages 2 and 3, and 0.74 between ages 3 and 4. The genotypic correlations for height also remained above 0.80 in most age comparisons (Figure 6).

Figure 5 – Phenotypic and genotypic correlations between DBH (cm) at different ages and DBH (cm) at different ages and PGR (kg tree⁻¹) at nine years for the progenies *P. elliottii* var. *elliottii* in Ijaci-MG state, southeastern Brazil.



Source: From the author (2025).

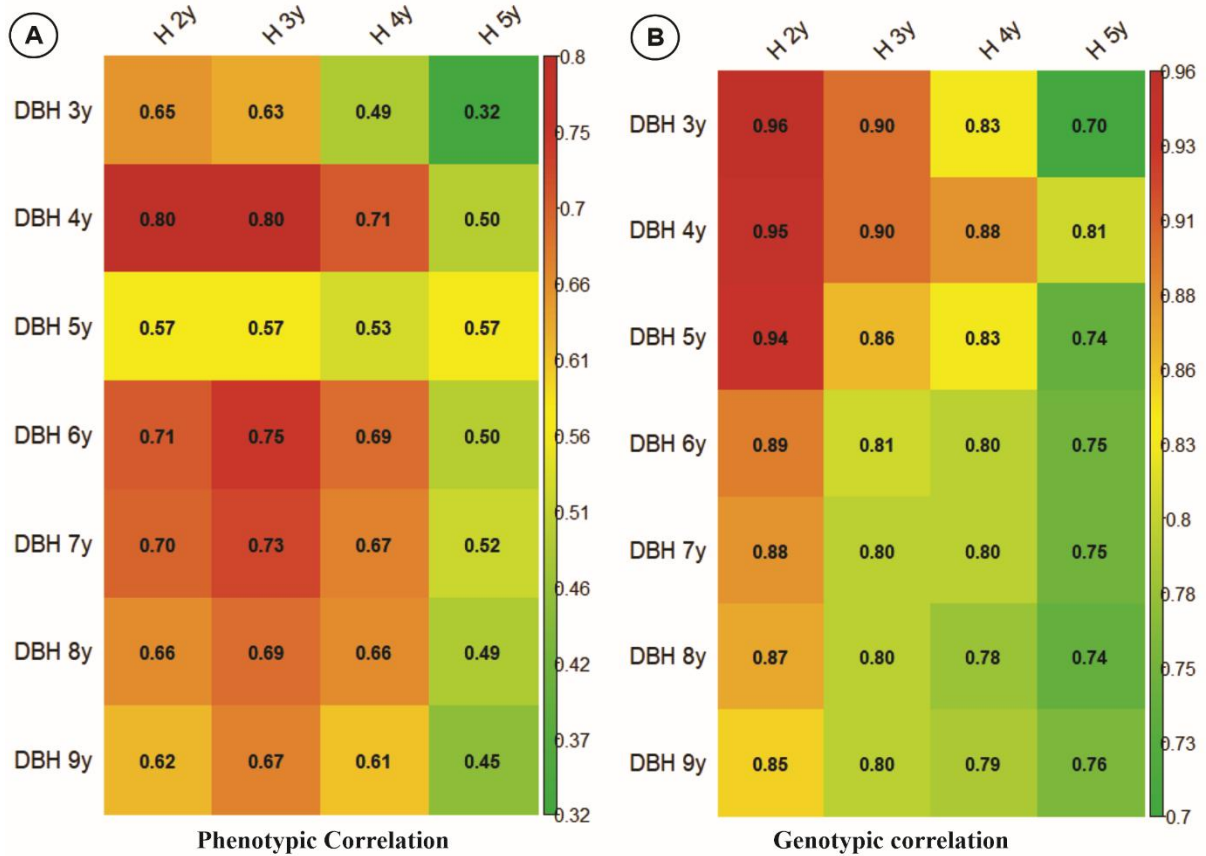
Figure 6 – Phenotypic and genotypic correlations between H (m) at different ages and H (m) at different ages, and GRY (kg tree⁻¹) at nine years for the progenies *P. elliottii* var. *elliottii* in Ijaci-MG state, southeastern Brazil.



Source: From the author (2025).

Notably, correlations between DBH (cm) and H (m) over time revealed consistent associations. Phenotypic correlations ranged from 0.32 to 0.80, with the highest values observed between DBH (cm) at 4 years of age and H (m) at two and three years (0.80), indicating a reliable simultaneous expression of these characteristics in the early stages (Figure 7A). The genotypic correlations were even stronger, ranging from 0.70 to 0.96, with values above 0.80 in almost all age combinations (Figure 7B). In contrast, the correlations between growth traits (DBH–cm and H–m) and GRY (kg tree⁻¹) (Figures 5 and 6) were low at nine years of age. The phenotypic correlations between DBH (cm) and GRY (kg tree⁻¹) ranged from 0.21 to 0.32, and the genotypic correlations ranged from 0.14 to 0.33 (Figures 5). For H (m), they ranged from 0.17 to 0.25, while the genotypic correlations were slightly higher, ranging from 0.23 to 0.31.

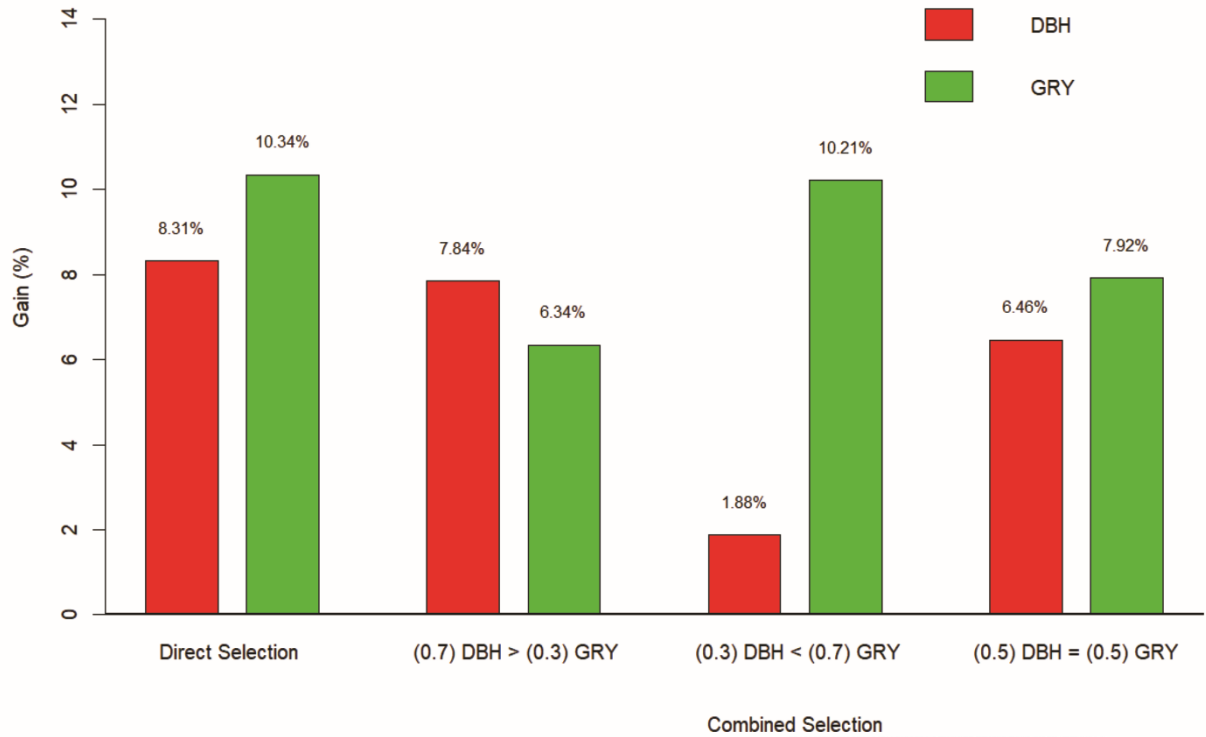
Figure 7 – Correlations between DBH (cm) and H (m) in different ages for the progenies *P. elliottii* var. *elliottii* in Ijaci-MG state, southeastern Brazil. A- Phenotypic correlation; B- Genotypic correlation



Source: From the author (2025).

Genetic gains were estimated in direct and combined scenarios for DBH (cm) and GRY (kg tree⁻¹) at nine years of age to assess selection potential. Direct selection for individual traits produced the highest genetic gains, with DBH (cm) showing 8.31% and GRY (kg tree⁻¹) showing a more significant response of 10.34%. Among the combined selection strategies, the scenario that prioritized DBH (cm) (weights: 0.7 for DBH (cm) and 0.3 for GRY - kg tree⁻¹) resulted in almost equal gains for both traits, slightly favoring DBH (cm). The scenario focusing on GRY (kg tree⁻¹) (weights: 0.3 for DBH-cm and 0.7 for GRY - kg tree⁻¹) maximized GRY (kg tree⁻¹). Meanwhile, the scenario with equal weights (0.5 for each trait) produced balanced gains, supporting its use in genetic improvement programs that aim to improve both growth and gum resin production (Figure 8).

Figure 8 - Gain with selection for DAP (cm) and GRY (kg tree⁻¹) using the direct and combined method - according to Mulamba and Mock (1978), for the progeny of *P. elliottii* var. *elliottii* at nine years of age in Ijaci-MG state, southeastern Brazil.



Source: From the author (2025).

A comparative analysis of selection indices revealed shifts in genotype rankings depending on the weights assigned to each trait. Genotype P72 demonstrated consistent performance, ranking among the top selections across all scenarios, indicating balanced genetic potential for growth and gum resin yield. Progenies P71 and P74 also stood out, with P71 favored under gum resin-prioritized selection and P74 under DBH-focused selection (Table 3).

Table 3 - Ranking of *P. elliottii* var. *elliottii* progenies at nine years of age under different selection scenarios in Ijaci-MG state, southeastern Brazil.

Direct Selection		Combined Selection		
DBH	GRY	(0.7) > (0.3) DBH > GRY	(0.3) < (0.7) DBH < GRY	(0.5) = (0.5) DBH = GRY
<u>P72</u>	P71	<u>P72</u>	P71	<u>P72</u>
<u>P74</u>	P69	<u>P74</u>	<u>P72</u>	P71
P76	<u>P72</u>	P71	<u>P74</u>	<u>P74</u>
P77	<u>P74</u>	P76	P69	P73

Progenies highlighted with underlining were selected in all strategies; Progenies highlighted in brown in the different combined selection scenarios coincide with those selected for DBH by direct selection; Progenies highlighted in blue in the different combined selection scenarios coincide with those selected for GRY by the direct selection method; Progenies highlighted in purple indicate selection by a specific combined selection scenario.

Source: From the author (2025).

4 DISCUSSION

The adaptive potential of a species is mainly assessed through its survival rate (Macedo, 2018). In this study, the average survival rate of the progeny of *P. elliottii* var. *elliottii* was high (91%), demonstrating the species' adaptability to the soil and climate conditions of this new growing region in Minas Gerais state. This result highlights the feasibility of cultivating *P. elliottii* var. *elliottii* under novel environmental conditions and its potential contribution to the regional economy. Similar findings were reported by Belaber *et al.* (2019), who observed a 79% survival rate in progeny trials of *P. elliottii* var. *elliottii* of comparable age in the provinces of Misiones and Corrientes, Argentina, reinforcing the species' broad adaptive plasticity.

However, the species adaptability is not determined by survival alone. The analysis of phenotypic traits - resulting from the interaction between genotype, environment, and their combined effects - also provides valuable insight. Among these traits, DBH and H are commonly used in forest breeding programs, as they allow for the evaluation of variability within populations and stands (Nieri *et al.*, 2022). Moreover, DBH has shown genetic correlations with H and, in some cases, with GRY (kg tree⁻¹), suggesting that individuals with larger DBH values may also present superior performance for these other traits (Liu *et al.*, 2013; Nieri *et al.*, 2022; Sebbenn *et al.*, 2010; Tambarussi *et al.*, 2018).

DBH, H, and GRY have been evaluated individually or in combination with other variables in various studies to estimate genetic parameters. These parameters are essential for quantifying the extent of the genetic variation and supporting the development of selection strategies, controlled crosses, and ultimately the identification of superior genetic material (Ishibashi *et al.*, 2022; Lai *et al.*, 2020; Pires *et al.*, 2013; Vázquez-González *et al.*, 2021). For such studies, deviance analysis is a necessary step, as it allows the assessment of the significance of different factors affecting trait expression (Resende, 2002). In this study, significant differences among progenies for the evaluated variables suggest the existence of relevant genetic variability and potential for gain through selection.

Genetic parameters such as heritability are fundamental in genetic improvement programs. They convey the reliability of phenotypic value as an indicator of gene value, reflecting the prediction of gain. Therefore, they are considered critical tools for decision-making in selection programs (Nieri *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2021; Souza *et al.*, 2017). According to Resende (2022), heritability values below 0.15 are considered low, those between 0.15 and 0.49 are moderate, and values above 0.50 are considered high. The heritability estimates in the present study ranged from moderate to high, indicating that both environmental and genetic factors significantly contribute to phenotypic variation and that artificial selection can effectively improve these traits. A comparison of individual heritability values (h^2a) for DBH, H, and GRY obtained at different ages in *P. elliotii* var. *elliotii* studies shows similar magnitudes (Table 4). Heritability estimates based on progeny means (h^2mp) were higher than h^2a , suggesting that greater genetic gains can be achieved through family selection in *P. elliotii* var. *elliotii* populations. This pattern is supported by previous findings in studies with this and other conifer species (Li *et al.*, 2012; Meng Lai *et al.*, 2017; Weng *et al.*, 2016).

Table 4 - Estimates of restricted individual heritability (h^2_a) in *P. elliottii* var. *elliottii* for the DBH (cm), H(m), GRY (kg tree⁻¹) character at different ages obtained in this and other studies.

Age (years)	h^2_a			Authors	Locations
	DBH	H	GRY		
4	0.36	0.39	0.47	Romanelli (1995)	Itapetininga-SP
5	0.34	0.42	-	-	Ijací-MG
6	0.26	0.23	-	Melchert <i>et al.</i> (2023)	Apiáí - SP
7	0.36	0.35	-	Tao <i>et al.</i> (2021)	Xuancheng - China
8	0.22	0.45	0.57	Romanelli (1995)	Itapetininga-SP
9	0.46	-	0.48	-	Ijací -MG
12	0.22	-	0.33	Romanelli; Sebbenn (2004)	Itapeva - SP
16	0.02	0.1	-	Macedo <i>et al.</i> (2012)	Assis-SP

Source: From the author (2025).

The accuracy of progeny selection (Acrop), defined as the correlation between true and predicted genetic values, expresses the confidence level in predicting the genetic performance and constitutes a key parameter for the effectiveness of breeding programs. According to Resende and Duarte (2007), values above 0.70 are adequate for ensuring an efficient and reliable selection process. The high accuracy levels observed in this study indicate greater precision in identifying superior progenies and, consequently, more reliable selection of individuals with high productive potential, which can lead to significant gains in growth and productivity (Martinez *et al.*, 2012).

The coefficients of genetic variation also confirmed genetic variability among progenies. As highlighted by Nieri *et al.* (2022), the coefficient of genetic variation expresses the magnitude of genetic variability present among progenies, where higher values reflect greater heterogeneity and, therefore, increased potential for identifying superior individuals. In this context, Santos *et al.* (2021) emphasized the importance of estimating both the individual genotypic variation coefficient (CV_{gi}) and the progeny genotypic variation coefficient (CV_{gp}), as these values indicate the genetic diversity available for selection.

The CV_{gi}, represents one of the most relevant components of phenotypic variance, as it refers directly to the additive genetic effects - that is, the heritable portion of phenotypic variation. The values obtained in this study for DBH, H, and GRY were higher than those reported by Romanelli and Sebbenn (2004), who evaluated *P. elliottii* var. *elliottii* in different

environments and at various ages in the state of São Paulo, with average CV_{gi} values of 3.68% for DBH and 6.55% for gum resin yield. Similarly, in a study by Coutinho *et al.* (2017), which assessed the feasibility of selecting *P. taeda* for DBH at eight years of age, CV_{gi} and CV_{gp} values of 7.84% and 3.92%, respectively, were reported.

Furthermore, Nieri *et al.* (2022), in a study conducted in Lavras-MG with tropical pine progenies three years after planting, observed CV_{gi} values of 19.52% for DBH and 15.80% for height. These magnitudes are comparable to those in the present study, even though different species and time scales were considered. These findings reinforce the robustness of the estimated genetic parameters and confirm the presence of significant genetic variability among the evaluated materials, which is fundamental to the success of selection strategies in forest breeding programs.

The results obtained in this study are consistent with patterns widely reported in the literature (Ding *et al.*, 2024; López-Álvarez; Zas; Macedo *et al.*, 2012; Marey-Perez, 2023; Romanelli, 1995; Romanelli; Sebbenn, 2004), demonstrating strong genotypic and phenotypic correlations between DBH and H, as well as stability in these relationships across different ages. The recurrence of such patterns suggests a consistent behaviour of these traits throughout plant development, reinforcing the technical feasibility of early selection strategies. This approach allows for genetic gains comparable to those achieved at more advanced ages (Chauhan *et al.*, 2013; Ding *et al.*, 2024; Romanelli; Sebbenn, 2004).

In this context, the early selection emerges as a promising alternative for breeding programs focused on long-rotation species, as it enables the early identification of superior genotypes, while reducing the operational costs and shortening the selection cycle. Using more accurate criteria during the juvenile phase can accelerate the genetic improvement more efficiently (Araújo *et al.*, 2015; Moreira *et al.*, 2014; Paludzyszyn Filho *et al.*, 2002). The findings of the present study indicate that DBH-based selection from the fourth year onward is technically viable, allowing for early seed harvesting from high-performing progenies and eliminating those with inferior performance.

On the other hand, consistent correlations between growth traits (DBH and H) and GRY were not observed. Both phenotypic and genotypic correlations were weak, in agreement with previous studies that, despite reporting positive associations, found correlation values below 0.5 in *P. elliottii* var. *elliottii* (Romanelli, 1995; Romanelli; Sebbenn, 2004; Vázquez-González *et al.*, 2021). This low association indicates that vegetative vigour alone is not a reliable

predictor of GRY, emphasizing the need for direct selection of this trait when it is a priority in the breeding program (Vázquez-González *et al.*, 2021).

Although some studies have reported moderate correlations between growth (DBH and H) and GRY in other *Pinus* species (Liu *et al.*, 2013; Zas *et al.*, 2020), the present results do not support such a relationship. This discrepancy may reflect the distinct physiological mechanisms underlying each process. While growth (DBH and H) depends on cell expansion and biomass accumulation, GRY involves the formation of resin ducts and allocating resources toward defense. As a result, vigorous individuals do not necessarily exhibit high gum resin output (Vázquez-González *et al.*, 2021).

Classical ecological theories (Coley *et al.*, 1985; Herms; Mattson, 1992) suggest the existence of trade-offs in resource allocation between growth and defense. However, no negative correlations were identified in this study, suggesting that under the environmental conditions of the experimental site, no direct antagonism was evident between vegetative growth and gum resin yield. Factors such as soil fertility, water availability, and ecological uniformity may have mitigated potential trade-off effects between these processes.

Given these findings, it becomes evident that growth and gum resin production should be treated as independent selection criteria in breeding programs. The low correlation between these traits implies that selecting progenies solely for growth (DBH and H) performance does not ensure high GRY. Therefore, to maximize simultaneous genetic progress in both characteristics, it is recommended to adopt selection strategies that explicitly integrate these components, enabling the identification of genotypes with superior performance across multiple objectives.

The genetic diversity observed among the families evaluated in this study highlights the potential for significant gains through selection. Given the low genetic correlation between growth traits (DBH and H) and GRY, it is recommended that breeding programs adopt trait-specific strategies to maximize genetic progress individually (Ding *et al.*, 2023; Romanelli, 1995). In this context, direct selection for GRY stood out, yielding the highest genetic gain (10.34%) and proving to be the most efficient strategy when the main objective is to enhance GRY.

However, considering the multifunctional nature of plants, trade-offs between traits are common, particularly when attributes with distinct physiological bases are expressed concurrently (Mauro; Ghalambor, 2020; Mora *et al.*, 2019). In such cases, combining selection strategies may benefit breeding programs with integrated and long-term objectives, focused on

multiple forest products such as timber and gum resin. This approach enables simultaneous improvement in various traits without compromising performance (Ding *et al.*, 2023; Li *et al.* 2020).

The results obtained in this study confirm the effectiveness of this approach. Using equal weights for DBH and GRY ($0.5 \text{ DBH (cm)} = 0.5 \text{ GRY (kg tree}^{-1})$) resulted in balanced gains for both traits, supporting its suitability in breeding scenarios where dual-purpose improvement is targeted. Scenarios prioritizing growth ($0.7 - \text{DBH (cm)} > 0.3 - \text{GRY (kg tree}^{-1})$) also produced similar gains in both traits, while emphasizing gum resin ($0.7 - \text{GRY (kg tree}^{-1}) > 0.3 - \text{DBH (cm)}$) maximized progress specifically in GRY. This flexibility in assigning weights allows for tailoring the selection strategy according to defined breeding objectives and market demands.

The consistency of genetic gains observed across different selection scenarios – even in the presence of low genetic correlation between growth (DBH and H) and GRY – suggests the existence of favorable trait combinations within the genetic base of *P. elliottii* var. *elliottii*. In this context, families P72, P74, and P71 stand out for their superior performance in both timber production and gum resin yield. In areas dedicated to gum resin production, it is common practice to conduct thinning of the least productive families to concentrate resources on those with the highest potential. Maintaining these superior families in the stand can, over time, increase the percentage of genetic gain and, consequently, overall productivity, combined for both products (Moraes *et al.*, 2007; Zulian *et al.*, 2024). Findings in other *Pinus* species, such as *P. radiata* and *P. yunnanensis*, where selection indices have been successfully applied to combine traits such as growth, wood quality, reproductive capacity, and stress tolerance (Climent *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2025), reinforce the strategy considered in this study, demonstrating that the applicability of integrated breeding strategies in conifers holds great potential to promote genetic improvement across multiple economically important traits.

This study represents the first genetic evaluation of *P. elliottii* var. *elliottii* in terms of growth characteristics and gum resin productivity in Minas Gerais state, contributing valuable information on the species' adaptive potential and prospects for reproduction in new soil and climate conditions. The results provide a solid basis for regional forest expansion initiatives and future reproduction strategies aimed at wood and gum resin production.

5 CONCLUSION

This study represents the first genetic evaluation of *P. elliottii* var. *elliottii* focusing on growth traits (DBH and H) and resin yield (GRY) in Minas Gerais state, southeastern Brazil. The high average survival rate of the progenies (91%) confirms the species adaptability to local edaphoclimatic conditions, reinforcing its potential for commercial plantations.

Moderate to high heritability estimates indicate substantial genetic transmissibility, enabling significant gains through selection and guiding efficient strategies in breeding programs. The substantial genetic variability among progenies allows for considerable improvement, with a strong correlation observed between DBH and H, supporting the feasibility of early selection from four years of age. In contrast, the low genetic correlation between growth and GRY highlights the need for independent selection strategies for these traits.

Direct selection for DBH and GRY yielded the highest gains (8.31% and 10.34%, respectively), while combined selection proved viable for the simultaneous improvement of growth and resin yield, representing a strategic approach for breeding programs with multiple objectives. As this is a preliminary study, continuous monitoring, particularly of GRY in subsequent cycles, is recommended to confirm the consistency of gains and to consolidate long-term production strategies integrating productivity, quality, and economic viability.

REFERENCES

- ARAÚJO, M. J. *et al.* Número de repetições, de plantas por parcela e de avaliações para testes clonais de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, p. 923-931, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015001000008>
- BECK, H. E. *et al.* High-resolution (1 km) Köppen-Geiger maps for 1901–2099 based on constrained CMIP6 projections. *Scientific Data*, v. 10, n. 1, p. 724, 23 out. 2023. DOI: 10.1038/s41597-023-02549-6.
- BELABER E.C. *et al.* (2019). Estimation of genetic parameters using spatial analysis of *Pinus elliottii* Engelm. var. *elliottii* second-generation progeny trials in Argentina. **New Forests**, v. 50, p. 605–627, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-018-9682-0>
- BRANDÃO, M.M. *et al.* Genetic diversity of neotropical tree *Myrcia splendens* (Myrtaceae) in a fragment-corridor system in the Atlantic rainforest. **Flora**, v. 216, p. 35- 41, 2015. DOI: 10.1016/j.flora.2015.07.006.
- CHAUHAN, S. S. *et al.* Methods for the very early selection of *Pinus radiata* D. Don. for solid wood products. **Annals of Forest Science**, v. 70, n. 4, p. 439-449, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0270-3>
- CLIMENT J. M. *et al.* Trade-offs and trait integration in tree phenotypes: consequences for the sustainable use of genetic resources. **Curr for Rep**, v. 10, p.196–222, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40725-024-00217-5>
- COLEY, P. D., BRYANT, J. P., CHAPIN III, F. S. Resource availability and plant antiherbivore defense. **Science**, v. 230, n. 4728, p. 895-899, 1985.
- COUTINHO, R. T. *et al.* Feasibility of early selection of *Pinus taeda* L. in diameter at breast height in a genetic improvement program. **Scientia Forestalis**, v. 45, n.113, p. 205-219, 2017). DOI: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr113/cap21.pdf>
- COVARRUBIAS-PAZARÁN, G. Genome-assisted prediction of quantitative traits using the R package sommer. *PLoS ONE*, [S.l.], v. 11, n. 6, 2016. DOI: 10.1371/journal.pone.0156744. Available at:<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0156744>. Accessed on: May 28, 2025.
- de AGUIAR, A. V. *et al.* Programa de melhoramento de pinus na Embrapa Florestas. Embrapa Florestas, 2011. 83p.
- DE FREITAS, *et al.* Effect of resin tapping system and collection period on resin production and growth traits in 12-year-old *Pinus elliottii* var. *elliottii*. **Scientific Electronic Archives**, v. 16, n. 9, 2023.
- DING, *et al.* Genetic selection for growth, wood quality, and resin traits of potential Slash pine for multiple industrial uses. **Forestry Research**, v. 4, p. e023, 2024.

DUARTE, J. F., CARVALHO, D., VIEIRA, F., A. Genetic conservation of *Ficus bonijesulapensis* R.M. Castro in a dry forest on limestone outcrops. **Biochemical Systematics and Ecology**, v. 59, p. 54-62, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bse.2015.01.008>

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de classificação dos solos. 3. ed. rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p

FRITZSONS, E. *et al.* Grupos climáticos para implantação de experimentos de melhoramento e plantio de *Pinus taeda* no Sul do Brasil. Documento 382. Editora: Embrapa Florestas, Colombo/PR, p. 22, 2022.

HERMS, D. A., MATTSON, W. J. The dilemma of plants: to grow or defend. **The quarterly review of biology**, v. 67, n. 3, p. 283-335, 1992.

INMET- Instituto Nacional de Meteorologia (2024). Boletins agroclimatológicos. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. National Institute of Meteorology (2024). URL: <https://portal.inmet.gov.br/boletinsagro>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção da extração vegetal e da silvicultura: 2023**. Available at: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/16/0>. Accessed on: April 2, 2025.

ISHIBASHI, V. *et al.* Estratégias de seleção genética para silvicultura clonal em *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Scientia Forestalis**, v. 50, p. 1-11, 2022. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v50.30>

LAI, M. *et al.* Genetic variation, heritability, and genotype× environment interactions of resin yield, growth traits, and morphologic traits for *Pinus elliottii* at three progeny trials. **Forests**, v. 8, n. 11, p. 409, 2017.

LAI, M. *et al.* Inheritance of resin yield and main resin components in *Pinus elliottii* Engelm. at three locations in southern China. **Industrial crops and products**, v. 144, p. 112065, 2020.

LAZAROTTO, S., CANDATEN, L., BALBINOT, R. Brazilian Resin Method: Handmade, Sustainable and Profitable. In: Forest Science: Sustainable Processes and Wood Products. Singapore: **Springer Nature Singapore**, p. 183-205, 2023.

LI, Y. *et al.* Inheritance and correlation analysis of pulpwood properties, wood density, and growth traits of slash pine. **Forests**, v. 11, p. 493, 2020. DOI: 10.3390/f11050493

LI, Y.J., JIANG, J.M., LUAN, Q.F. Determination and genetic analysis of resin productivity resin density and turpentine content in half-sib families of slash pine. **J. Beijing For. Univ.**, v. 34, p. 48–51, 2012.

LI, Z. *et al.* Variation in growth traits and early evaluation of the selection of intra and interspecific hybrid progeny of *Pinus yunnanensis*. **New Forests**, v. 56, n. 1, p. 14, 2025.

LIMA, A.B. *et al.* Impactos dendrométricos e econômicos de um povoamento de *Pinus elliottii* submetido à produção de resina. **Advances in Forestry Science**, v.8, p. 475-1487, 2021.

- LIU Q. *et al.* Genetic Variation and Correlation among Resin Yield, Growth, and Morphologic Traits of *Pinus massoniana*. **Silvae Genetica**, v. 62, n. 1, p. 38-43, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1515/sg-2013-0005>
- LÓPEZ-ÁLVAREZ, Ó., ZAS, R., MAREY-PEREZ, M. Resin tapping: A review of the main factors modulating pine resin yield. **Industrial Crops and Products**, v. 202, p. 117105, 2023.
- MACEDO, H. R. *et al.* Parâmetros genéticos para caracteres de crescimento em progênes de *Pinus elliottii* var. *elliottii*. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 9, n. 4, 2012.
- MARTINEZ, D.T. *et al.* Estudo da interação genótipo x ambiente em progênes de *Pinus taeda* por meio da análise de parâmetros genéticos. **Floresta**, v. 42, n. 3, p. 539-552, 2012.
- MAURO, A., GHALAMBOR, C.A. Trade-offs, pleiotropy, and shared molecular pathways: a unified view of constraints on adaptation. **Integr Comp Biol**, v. 60, p. 332–347, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1093/icb/icaa056>
- MELCHERT, G. F. *et al.* Quantitative and molecular analysis of *Pinus elliottii* Engelm. at six years of age using microsatellite markers. **Tree Dimensional Journal**, v. 10, n. e023011, p. 1-9, 2023. DOI: doi.org/10.55746/treed.2023.01.011
- MENG, L. *et al.* Inheritance of resin yield and main resin components in *Pinus elliottii* Engelm at three locations in southern China. **Industrial Crops and Products**, v. 144, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.112065>
- MORA, F. *et al.* Bayesian analysis of growth, stem straightness and branching quality in full-sib families of *Eucalyptus globulus*. **Bragantia**, v. 78, p. 328 - 336, 2019). DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20180317>
- MORAES, M. L.T. *et al.* Efeito do desbaste seletivo nas estimativas de parâmetros genéticos em progênes de *Pinus caribaea* Morelet var. *hondurensis*. **Scientia Forestalis**, n. 74, p. 55-65, 2007.
- MOREIRA, J. P. *et al.* Ganho esperado na seleção de progênes de *Pinus elliottii* var. *elliottii* em idade precoce para produção de madeira. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 34, n. 78, p. 99-109, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4336/2014.pfb.34.78.488>
- MULAMBA, N.N.; MOCK, J.J. Improvement of yield potential of the Eto Blanco maize (*Zea mays* L.) population by breeding for plant traits. **Egyptian journal of genetics and cytology**, v.7, p.40-51, 1978.
- NEIS, F. A. *et al.* Resin exudation profile, chemical composition, and secretory canal characterization in contrasting yield phenotypes of *Pinus elliottii* Engelm. **Industrial Crops and Products**, v. 132, p. 76-83, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.02.013>
- NEIS, F. A. *et al.* Biomass yield of resin in adult *Pinus elliottii* Engelm. trees is differentially regulated by environmental factors and biochemical effectors. **Industrial Crops and Products**, v.118, p. 20-25, 2018. ISSN 0926-6690, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.03.027> .

NIERI, É. M. *et al.* Selection of *Pinus* spp. progenies in Lavras (Minas Gerais, Brazil) at 36 months of age. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 52, 2022.

NILSSON, O. *et al.* Growth and modulus of elasticity of pine species and hybrids three years after planting in South Africa. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 82, n. 4, p. 367-376.2020.

NUNES, S. *et al.* Physiological characterization and true-to-typeness evaluation of *in vitro* and *ex vitro* seedlings of *Pinus elliottii*: A contribution to breeding programs. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 107, p. 222-227. 2016.

PALUDETO, J. G. Z. *et al.* Variabilidade genética em população base de *Eucalyptus viminalis* em idade juvenil. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 126, p.1-9, 2020. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n126.07>

PALUDZYSZYN-FILHO, E. *et al.* Avaliação e seleção precoce para crescimento de *Pinus taeda*. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 37, n. 12, p. 1719-1726, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002001200007>

PIRES, V. C. M. *et al.* Variabilidade genética de caracteres silviculturais em progênies de polinização aberta de *Pinus caribaea* var. *bahamensis*. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 97, p. 113-119, 2013.

R CORE TEAM. *R: a language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Accessed on: May 28, 2025.

RESENDE M.D.V.; ALVES, R.S. Statistical significance, selection accuracy, and experimental precision in plant breeding. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 22, n.3, p. e42712238, 2022. <http://dx.doi.org/10.1590/1984-70332022v22n3a31>

RESENDE, M. D.V. Genética biométrica e estatística no melhoramento de plantas perenes. Editora: Embrapa Informações Tecnológica, Brasília/DF, p.975, 2002.

RESENDE, M. D. V, DUARTE, J. B. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. Pesquisa Agropecuária Tropical v. 37, n. 3, p. 182-194, 2007.

ROMANELLI, R.C. Seleção precoce em progênies de *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm. **Revista do Instituto Florestal**, v.7, n. 1, p. 101-113, 1995.

ROMANELLI, R.C., SEBBENN, A.M. Parâmetros genéticos e ganhos na seleção para produção de resina em *Pinus elliottii* var. *elliottii*, no sul do Estado de São Paulo. **Revista do Instituto Florestal**, v.16, n. 1, p. 11-23, 2004.

SANTOS, H.G. *et al.* Parâmetros genéticos para caracteres silviculturais em cedro australiano. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 130, p. 3467, 2021. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n130.05>

SEBBENN, A. M. *et al.* Estimativa de parâmetros genéticos e ganhos na seleção para caracteres de crescimento em teste de progênies de *Pinus Caribaea* var. *hondurensis* e var.

bahamensis, em Assis-SP. **Revista Instituto Florestal**, v. 22n. 2, p. 279-288, 2010. DOI: <https://doi.org/10.24278/2178-5031.2010222267>

SHIMIZU, J. Y., SPIR, I. H. Z. Selection of slash pine on breeding values for high resin production. 1999.

SHIMIZU, J.Y. Pinus na silvicultura brasileira. Editora: Embrapa Florestas, Colombo/PR, 2008, 226 p.

SOUZA, T.S. *et al.* Variação genética em caracteres quantitativos em *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 113, p. 177- 185, 2017.

TAMBARUSSI, E. V. *et al.* Análise dialélica na avaliação do potencial de híbridos de *Pinus elliottii* x *Pinus caribaea* para a formação de populações de melhoramento. **Scientia Forestalis**, v. 46, n. 119, p. 395- 403, 2018.

TAO, X. *et al.* Heritable variation in tree growth and needle vegetation indices of slash pine (*Pinus elliottii*) using unmanned aerial vehicles (UAVs). **Industrial Crops and Products**, v. 173, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114073>

VÁZQUEZ-GONZÁLEZ, C. *et al.* Genetic variation in resin yield and covariation with tree growth in maritime pine. **Forest Ecology and Management**, v. 482, p. 118843, 2021.

WENG, Y.H. *et al.* Genetic Parameters for Bole Straightness and Branch Angle in Jack Pine Estimated Using Linear and Generalized Linear Mixed Models. **For. Sci.**, v. 1, p. 1-8, 2016.

WICKHAM, H. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. 3.5.1. [S. l.]: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Available at: <https://ggplot2.tidyverse.org>. Accessed on: Sept. 16, 2025.

WICKHAM, H.; BRYAN, J. *readxl: Read Excel Files*. R package version 1.4.0, 2023. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=readxl>. Accessed on: May 28, 2025.

YANG, Y.; LI, C. Photosynthesis and growth adaptation of *Pterocarya stenoptera* and *Pinus elliottii* seedlings to submergence and drought. **Photosynthetica**, v. 54, n. 1, p. 120-129. 2016.

YUAN, T. *et al.* Benefit assessment on early tapping of *Pinus elliottii*. **Asian Agricultural Research**, v. 5, n. 1812-2016-143964, p. 100-102, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.22004/ag.econ.159110>

ZAS, R. *et al.* Resin tapping potential of Atlantic maritime pine forests depends on tree age and the timing of tapping. **Ind. Crops. Prod.**, v. 157, p. 112940, 2020. DOI: 10.1016/j.indcrop.2020.112940.

ZULIAN, D. F. *et al.* Selection methods to optimize the gain and genetic diversity in *Pinus caribaea* var. *caribaea*. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 24, n. 3, p. e47742436, 2024.

APPENDIX

Table 1– The deviance analysis (ANADEV) for H (m), DAP (cm), GRY (kg tree⁻¹), and the survival in progenies of *P. elliotii* var. *elliotii* at different ages in Ijaci-MG state, southeastern Brazil.

H (m)	2 years		3 years		4 years		5 years	
	DEV	LRT	DEV	LRT	DEV	LRT	DEV	LRT
Complete model	-2.43		203.59		318.39		493.07	
(-) genotypes	7.18	9.61*	223.06	19.47*	340.80	22.41*	507.08	14.01*
DBH (cm)	DEV	LRT	DEV	LRT	DEV	LRT	DEV	LRT
Complete model			680.30		770.79		893.32	
(-) genotypes			686.62	6.32*	785.97	15.18*	903.85	10.53*
DBH (cm)	6 years		7 years		8 years		9 years	
	DEV	LRT	DEV	LRT	DEV	LRT	DEV	LRT
Complete model	977.69		1020.83		1091.35		1143.29	
(-) genotypes	999.53	21.84*	1039.54	18.71*	1113.01	21.66*	1158.92	15.63*
GRY (kg tree ⁻¹)	DEV	LRT	DEV	LRT	DEV	LRT	DEV	LRT
Complete model							34.26	
(-) genotypes							47.93	13.67*
SURVIVAL	DEV	LRT	DEV	LRT	DEV	LRT	DEV	LRT
Complete model							-352.27	
(-) genotypes							-351.76	0.51 ^{ns}

DEV – Deviance; LRT – Likelihood Ratio Test, with a distribution with 1 degree of freedom; * significant at the 5% probability level by the chi-square test; ^{ns} not significant at the 5% probability level by the chi-square test; (-) model without the corresponding effect.

Source: From the author (2025).

2 – Predicted genetic gain, Standard error of prediction (SEP), prediction error variance (PEV), and reliability estimates for DBH (cm) and GRY (kg tree⁻¹) in progenies of *P. elliotii* var. *elliotii* at nine years of age, in Ijaci-MG state, southeastern Brazil.

DBH - 9 years					GRY - 9 years				
Family	Genetic gain	SEP	PEV	Reliability	Family	Genetic gain	SEP	PEV	Reliability
P72	2.58	0.87	0.75	0.95	P71	0.28	0.09	0.01	0.95
P74	1.64	0.92	0.84	0.94	P69	0.17	0.12	0.01	0.91
P76	1.13	0.88	0.77	0.95	P72	0.17	0.09	0.01	0.95
P77	0.57	0.87	0.75	0.95	P74	0.14	0.12	0.01	0.92
P71	0.23	0.89	0.80	0.94	P73	0.00	0.10	0.01	0.94
P73	0.11	0.92	0.84	0.94	P70	-0.05	0.10	0.01	0.94
P70	-0.78	0.87	0.75	0.95	P78	-0.07	0.09	0.01	0.95
P75	-1.16	0.90	0.82	0.94	P76	-0.12	0.09	0.01	0.95
P78	-1.22	0.86	0.73	0.95	P77	-0.24	0.10	0.01	0.94
P69	-3.11	0.89	0.80	0.94	P75	-0.26	0.10	0.01	0.94
<i>m</i>		0.89	0.79	0.94	<i>m</i>		0.10	0.01	0.94

The genetic gains represent the estimated genetic performance of each family for the respective trait and are used for selection purposes. The reliability reflects the accuracy of the genetic prediction. The line “m” refers to the average values of the parameters presented.

Source: From the author (2025).

Table 3 – The predicted genetic gain for DBH (cm) and GRY (kg tree⁻¹) under different combined selection scenarios in progenies of *Pinus elliottii* var. *elliottii* at nine years of age, in Ijaci-MG state, southeastern Brazil.

Combined selection scenarios					
0.7 - DBH > 0.3 - GRY	Family	P72	P74	P71	P76
	Gain DBH	2.58	1.64	0.23	1.13
	Gain GRY	0.17	0.14	0.28	-0.12
	MM Index - DBH	1.60	2.60	3.80	4.50
	Absolute gain DBH				1.40
	Absolute gain GRY				0.12
0.3 - DBH < 0.7- GRY	Family	P71	P72	P74	P69
	Gain DBH	0.23	2.58	1.64	-3.11
	Gain GRY	0.28	0.17	0.14	0.17
	MM Index - GRY	2.20	2.40	3.40	4.40
	Absolute gain DBH				0.33
	Absolute gain GRY				0.19
0.5 - DBH: 0.5 - GRY	Family	P72	P71	P74	P73
	Gain DBH	2.58	0.23	1.64	0.11
	Gain GRY	0.17	0.28	0.14	0.00
	MM - DBH:GRY	2.00	3.00	3.00	5.50
	Absolute gain DBH				1.14
	Absolute gain GRY				0.15

The scenarios consider different weights assigned to DBH and gum resin yield: (i) 0.7 for DBH and 0.3 for the gum resin; (ii) 0.3 for DBH and 0.7 for the gum resin; and (iii) equal weights of 0.5 for both traits. The selection was based on the index proposed by Mulamba and Mock (1978), which ranks progenies using the sum of trait rankings weighted according to the specified proportions. The variable MM Index represents this weighted rank sum for each family. The absolute gains refer to the difference between the average genetic gains of the four selected families and the overall average of the progeny for each trait.

Source: From the author (2025).

ARTIGO 2 – DIÂMETRO, CANAIS RESINÍFEROS E PRODUTIVIDADE DE GOMA-RESINA EM *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. & Golf.

RESUMO

O gênero *Pinus* possui ampla relevância econômica no Brasil, tanto para produção de madeira quanto para extração de goma-resina, atividade em que o país se destaca como um dos principais produtores mundiais. *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. & Golf. é uma das espécies tropicais com maior potencial para uso múltiplo, destacando-se pelo crescimento vigoroso e viabilidade resinífera. Este estudo teve como objetivo avaliar o crescimento em diâmetro à altura do peito (DAP), o número de canais resiníferos (NCR) e a produtividade de goma-resina (PGR) em 31 progênies de meios-irmãos dessa espécie, visando identificar materiais com potencial para programas de melhoramento. O experimento foi instalado em delineamento de blocos completos casualizados, com trinta repetições e uma planta por parcela, em Lavras, estado de Minas Gerais. Para a avaliação do DAP (cm), do NCR e da PGR (kg árvore⁻¹) neste estudo, foram consideradas apenas três repetições, sendo DAP e NCR avaliados aos 8 anos e PGR aos 9 anos após o plantio. Os dados foram submetidos à ANAVA e ao teste de Scott-Knott ($p < 0,10$), além da análise de correlação de *Pearson*. Os resultados revelaram variabilidade fenotípica significativa entre as progênies para todas as características analisadas. Foram identificadas progênies superiores para DAP, NCR e PGR, destacando o potencial para ganhos genéticos. A correlação entre DAP e NCR foi moderada (0,74), enquanto as correlações com PGR foram baixas (<0,32), indicando seu caráter multifatorial. O estudo aponta variabilidade fenotípica entre as progênies e baixa correlação entre as variáveis em estudo, demonstrando a necessidade de estratégias de seleção independentes para maximização de ganhos com a seleção em um programa de melhoramento.

Palavras-chave: melhoramento florestal; avaliação de progênies; variabilidade fenotípica.

ABSTRACT

The genus *Pinus* holds broad economic significance in Brazil, both for timber production and for gum-resin extraction, an activity in which the country is one of the world's leading producers. *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. & Golf is one of the tropical species with the greatest potential for multiple uses, notable for its vigorous growth and resin yield feasibility. This study aimed to evaluate diameter at breast height (DBH), number of resin canals (NCR), and gum-resin yield (GRY) in 31 half-sib progenies of this species, to identify materials with potential for breeding programs. The experiment was established in a randomized complete block design, with thirty replications and one plant per plot, in Lavras, Minas Gerais state. For the evaluation of DBH (cm), NCR, and GRY (kg tree⁻¹) in this study, only three replications were considered, with DBH and NCR assessed at 8 years and GRY at 9 years after planting. The data were subjected to ANOVA and the Scott-Knott test ($p < 0.10$), as well as Pearson correlation analysis. The results revealed significant phenotypic variability among progenies for all traits analyzed. The superior progenies were identified for DBH, NCR, and GRY, highlighting the potential for genetic gains. The correlation between DBH and NCR was moderate (0.74), whereas correlations with GRY were low (<0.32), indicating its multifactorial nature. The study demonstrates phenotypic variability among progenies and low correlations among the traits evaluated, evidencing the need for independent selection strategies to maximize gains in a breeding program.

Keywords: forest breeding; progeny testing; phenotypic variability.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o cultivo de espécies do gênero *Pinus* ficou em evidência a partir da segunda metade do século 20, impulsionado por políticas públicas de reflorestamento e incentivos fiscais voltados ao setor florestal (SFB, 2020). Entre os principais fatores que contribuíram para a ampla adoção dessas espécies, destacam-se: o crescimento rápido, a elevada produtividade de madeira e a capacidade de adaptação a diferentes condições edafoclimáticas (Santos; Araujo; Silva, 2021).

Na atualidade, as espécies do gênero *Pinus* são amplamente utilizadas em setores madeireiros e de celulose e papel, refletindo sua relevância econômica consolidada no país. Paralelamente a esses usos, algumas espécies também demonstram potencial para a extração de goma-resina, uma atividade tida como secundária, mas que coloca o Brasil como maior exportador e segundo maior produtor, perdendo apenas para a China (ARESB, 2024; Candaten *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2022). A espécie *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. & Golf. é uma das mais cultivadas em regiões tropicais, valorizada comercialmente pela combinação entre alto rendimento em madeira e viabilidade resinífera (de Lima *et al.*, 2021; Santos; Araujo; Silva, 2021). Sua goma-resina é empregada na produção de breu, terebintina e outros insumos das indústrias química, farmacêutica e de biocombustíveis (Andrade *et al.*, 1992; ARESB, 2024).

O crescimento diamétrico de *P. caribaea* var. *hondurensis* é influenciado por fatores genéticos, climáticos e de manejo, podendo alcançar incrementos anuais entre 2 e 3 cm no diâmetro à altura do peito (Lisboa *et al.*, 2019; Oliveira *et al.*, 2024). Esse crescimento reflete diretamente na atividade cambial e está associado ao vigor da árvore, favorecendo, por exemplo, a formação das estruturas resiníferas - canais resiníferos - responsáveis pela condução e exsudação da goma-resina (mecanismo de defesa das coníferas). Estudos apontam que o crescimento em diâmetro pode correlacionar-se positivamente à densidade dos canais e à quantidade de goma-resina (Ferreira; Tomazello-Filho, 2012; Leggate *et al.*, 2020; López-Álvarez *et al.*, 2023).

Apesar do reconhecimento sobre a importância econômica e biológica dessa espécie, ainda são escassos os estudos que integram, de forma simultânea, variáveis morfológicas, anatômicas e produtivas em nível de progênies sob condições tropicais. O desenvolvimento de pesquisas que analisem essas variáveis é relevante para a silvicultura tropical, pois a identificação de progênies com melhor desempenho morfológico, anatômico e produtivo pode

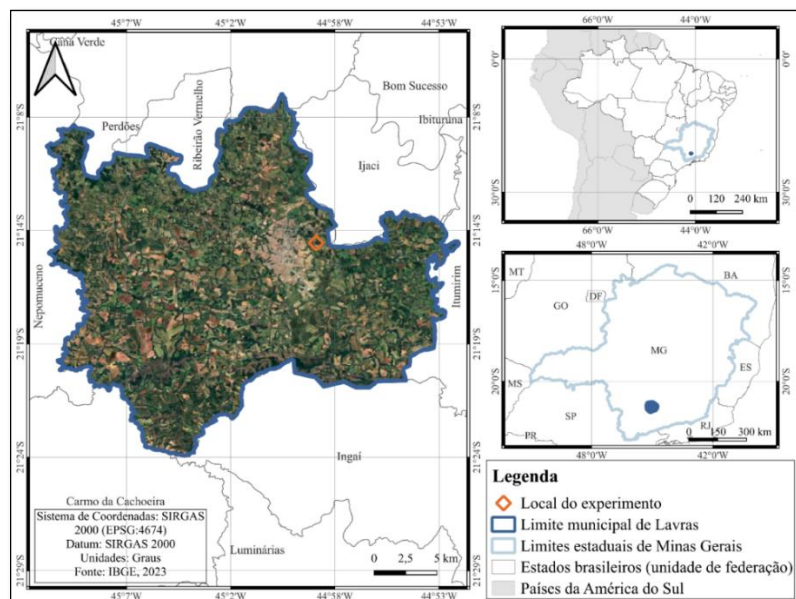
subsidiar a seleção de materiais mais adequados à exploração resinífera em plantios comerciais. Diante disso, objetivou-se avaliar o crescimento em diâmetro à altura do peito (DAP – cm), o número de canais resiníferos e a produtividade de goma-resina (kg árvore^{-1}) em trinta e uma progênies de *P. caribaea* var. *hondurensis* em condições de campo, no município de Lavras-MG.

2. METODOLOGIA

2.1 Caracterização do experimento

O experimento foi instalado em setembro de 2015 em área localizada na Universidade Federal de Lavras – UFLA, Lavras, mesorregião do Campo das Vertentes, estado de Minas Gerais, Brasil ($21^{\circ}14'19,6''\text{S}$; $44^{\circ}58'28,5''\text{W}$) (Figura 1). A área encontra-se em uma região de ecótono entre o Cerrado e a Mata Atlântica e possui solo do tipo Cambissolo Háplico distrófico (Embrapa, 2018). Possui clima tropical de altitude com verões suaves Cwb, segundo a classificação de Köppen-Geiger, temperatura média anual de $19,6^{\circ}\text{C}$, precipitação média anual de 1511 mm (INMET, 2024).

Figura 1 - Mapa da área experimental com as progênies de meios-irmãos de *P. caribaea* var. *hondurensis*, em Lavras - MG.



Fonte: Da autora (2025).

As progênies de *P. caribaea* var. *hondurensis* foram obtidas de matrizes com polinização livre, localizadas em plantios comerciais da Empresa Resineves Agronegócios, Itapeva - SP. As mudas foram produzidas pela própria empresa em tubetes de 55 cm³, preenchidos com substrato comercial. O teste de progênies foi implantado seguindo metodologia descrita por Nieri *et al.* (2022) em delineamento de blocos completos casualizados, compostos por trinta e uma progênies de meios-irmãos de *P. caribaea* var. *hondurensis* (P18, P19, P20, P21, P22, P24, P25, P26, P28, P30, P33, P34, P35, P37, P39, P40, P41, P43, P44, P46, P49, P50, P52, P54, P55, P57, P58, P59, P61, P63, P68) em trinta repetições contendo uma planta por parcela. No entanto, devido a questões operacionais, considerou-se para as avaliações deste estudo, informações de apenas três repetições.

2.2 Avaliação do DAP, número de canais e da produção de goma-resina

O diâmetro à altura do peito (DAP) e o número de canais resiníferos (NCR) foram avaliados aos oito anos após o plantio. Para a medição do DAP (cm), utilizou-se uma suta. O NCR por mm² foi determinado pelo seguinte procedimento:

Etapa 1 - Coleta das amostras - Em cada árvore foram coletadas quatro amostras de partes do tronco à altura do peito (1,30 m). As amostras cilíndricas com dimensões de 0,5 cm de diâmetro × 6 cm de comprimento, foram retiradas com o auxílio de um trado de incremento, inserido perpendicular ao eixo principal do tronco. Para a retirada de cada amostra no tronco da árvore, foram consideradas as posições norte, sul, leste e oeste, mantendo a padronização em todas as árvores utilizadas no experimento. As amostras coletadas foram acondicionadas em recipiente permeável devidamente identificado e mantidas imersas em água destilada até o momento do processamento em laboratório (Figura 2A)

Etapa 2 - Processamento das amostras - As amostras foram processadas no Laboratório de Anatomia da Madeira da Universidade Federal de Lavras - MG. Fragmentos de 1 cm foram retirados de cada amostra cilíndrica (no primeiro centímetro imediatamente após a casca) e submetidas a cortes com 10 µm de espessura em seções transversais com auxílio de um micrótomo deslizante Leica SM 2010R (Leica Biosystems, Wetzlar, Alemanha). Para caracterizar uma árvore, foram dispostas em uma lâmina quatro fragmentos (cada um de uma posição - norte, sul, leste e oeste) de 0,5 cm × 1 cm (Figura 2B).

Coloração das seções - As seções foram clareadas com uma solução de hipoclorito de sódio, coradas com safranina, desidratadas com uma série de etanol (20%, 50%, 70%, 80% e

100%) combinada com acetato de n-butila (25%, 50%, 75% e 100%) (Johansen, 1940) e montadas com resina sintética Entellan ®.

Captura das imagens - As imagens foram obtidas e analisadas com um microscópio de luz Zeiss Primo Star HAL/LED (Carl Zeiss, Oberkochen, Alemanha) acoplado a uma câmera digital Opton com ampliação de 4×.

Fotografias - Imagens vetorizadas foram produzidas no software Corel Draw 3.0 para ilustrar os canais resiníferos nas seções obtidas.

Quantificação dos canais - Nas fotografias, o número de canais por mm² foi quantificado de forma aleatória no fragmento sem que houvesse sobreposição com o auxílio de um gabarito de 1 mm x 1 mm. Para cada árvore, foram realizadas 30 amostragens, ao final obteve-se o número médio de canais por mm².

O número médio de canais por mm² foi extrapolado considerando a área seccional do primeiro centímetro que circunda o tronco da árvore imediatamente após a casca (Figura 3), dada por:

$$Ac = \pi(R^2 - r^2) \quad (1)$$

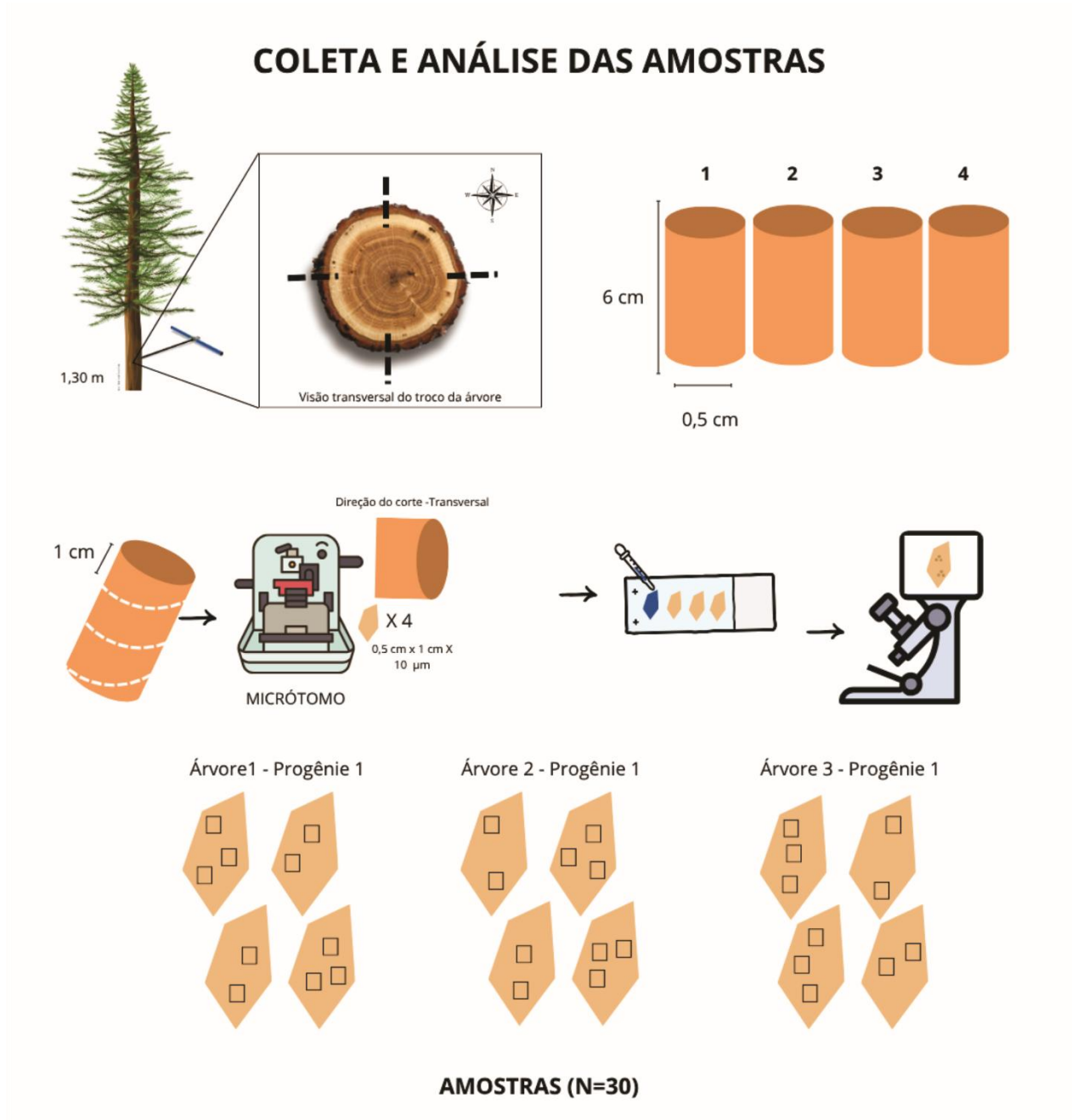
Em que: Ac: área seccional do anel (mm²); π : 3,1416; R: raio externo; r: raio interno

Em seguida obteve-se o número de canais (NCR) para a área seccional em questão pela seguinte equação:

$$\text{Área seccional (mm}^2\text{)} \times N^{\circ} \text{ médio de canais por mm}^2 \quad (2)$$

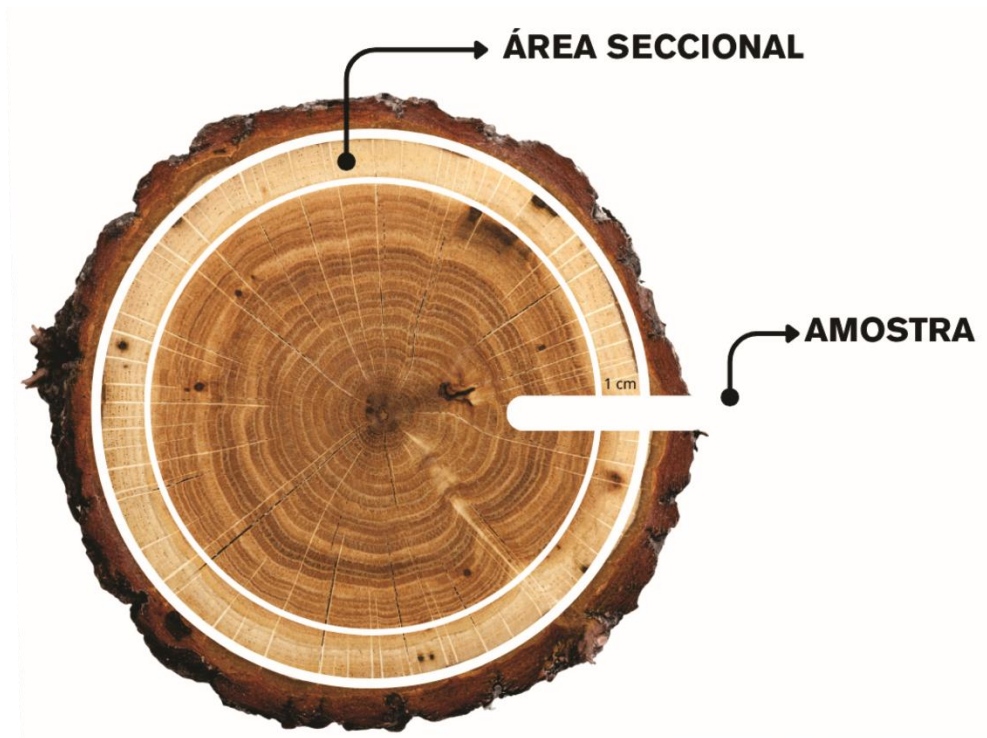
A avaliação da produtividade de goma-resina (PGR - kg árvore⁻¹) se deu aos nove anos. Foram selecionadas as árvores com diâmetro igual ou superior a 15 cm, para a exploração de uma das faces do tronco conforme metodologia descrita no capítulo 1.

Figura 2 – Caracterização das etapas de coleta e processamento das amostras de *P. caribabae* var. *hondurensis* para quantificação do número de canais resiníferos. A - Coleta das amostras em campo. B - Processamento das amostras e preparo das lâminas.



Fonte: Da autora (2025).

Figura 3 – Caracterização da área seccional do primeiro centímetro que circunda o tronco da árvore, imediatamente após a casca, para quantificação do número de canais resiníferos em *P. caribaea* var. *hondurensis*.



Fonte: (Da autora, 2025).

2.3 Análises estatísticas

Após a obtenção dos dados, realizou-se a análise de variância (ANAVA) e, na sequência, quando esta apontou diferença entre as progênes, executou-se o teste de média pelo método proposto por Scott-Knott ($p < 0.10$).

O percentual de coincidência entre as progênes (considerando as variáveis produção de goma-resina e DAP; produção de goma-resina e número de canais resiníferos) do melhor grupo (a) foi determinado por meio da equação abaixo:

$$\left(\frac{\text{Número de progênes coincidentes entre as variáveis no grupo (a)}}{\text{Número total de progênes do grupo (a)}} \right) \times 100$$

A correlação de *Pearson* (1985) foi determinada para as variáveis em estudo. Todos os procedimentos estatísticos foram realizados com o auxílio software R (R Development Core Team, 2024), sendo os gráficos obtidos com o auxílio do pacote *ggplot2* (Wickham, 2024).

3. RESULTADOS

A análise de variância demonstrou diferenças estatisticamente significativas entre as progênes de *P. caribaea* var. *hondurensis* nas características analisadas: DAP (cm), NCR, PGR (kg árvore⁻¹). A significância observada ($p < 0,05$ para DAP e NCR; $p < 0,10$ para PGR) aponta para a presença de variabilidade fenotípica relevante entre as progênes, o que destaca o potencial para ganhos por meio da seleção no melhoramento genético. O DAP (Tabela 2) apresentou média de 22,9 cm, NCR de 14582,12 e a PGR de 1,03 kg árvore⁻¹ (Tabela 1).

Tabela 1 - Resumo da análise de variância para o DAP (cm), NCR (em área seccional) e PGR (kg árvore⁻¹) de progênes de *P. caribaea* var. *hondurensis*, em Lavras – MG.

Fonte de variação	GL	Quadrados Médios		
		DAP (cm)	NCR -	PGR kg árvore ⁻¹
Blocos	2	17,985 ^{ns}	3769,686 ^{ns}	0,100 ^{ns}
Progênes	30	41,953*	33168,823*	0,350**
Resíduos	60	22,603	14159,393	0,228
Total	92	-	-	-
Média	-	22,90	14582,12	1,03
CV (%)	-	20,77	25,80	46,42

GL = graus de liberdade; CV (%) = coeficiente de variação; * = significativo ao nível de 5% de probabilidade de erro pelo teste F; ** = significativo ao nível de 10% de probabilidade de erro pelo teste F; ns= não significativo.

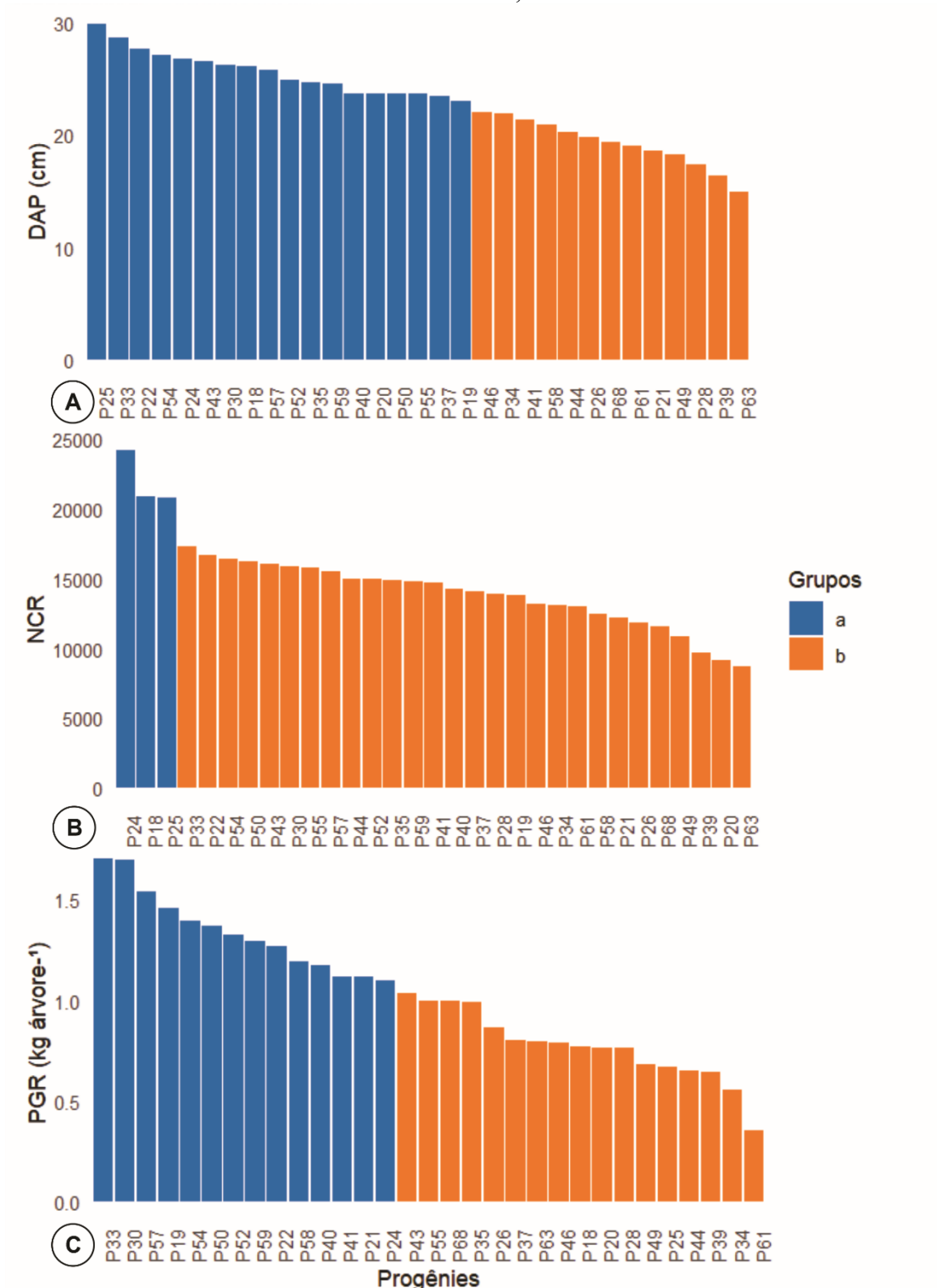
Fonte: Da autora (2025).

Com base nas diferenças encontradas, foi possível a formação de dois grupos homogêneos entre as 31 progênes de *P. caribaea* var. *hondurensis* avaliadas quanto ao DAP

(cm), NCR e PGR (kg árvore^{-1}). Para o DAP (Figura 4A), as médias variaram de 17 cm a 30 cm aproximadamente, com destaque para as progênies P18, P19, P20, P22, P24, P25, P30, P33, P35, P37, P40, P43, P50, P52, P54, P55, P57, P59 que integraram o grupo superior (grupo “a”), evidenciando o potencial dessas famílias para incremento em crescimento.

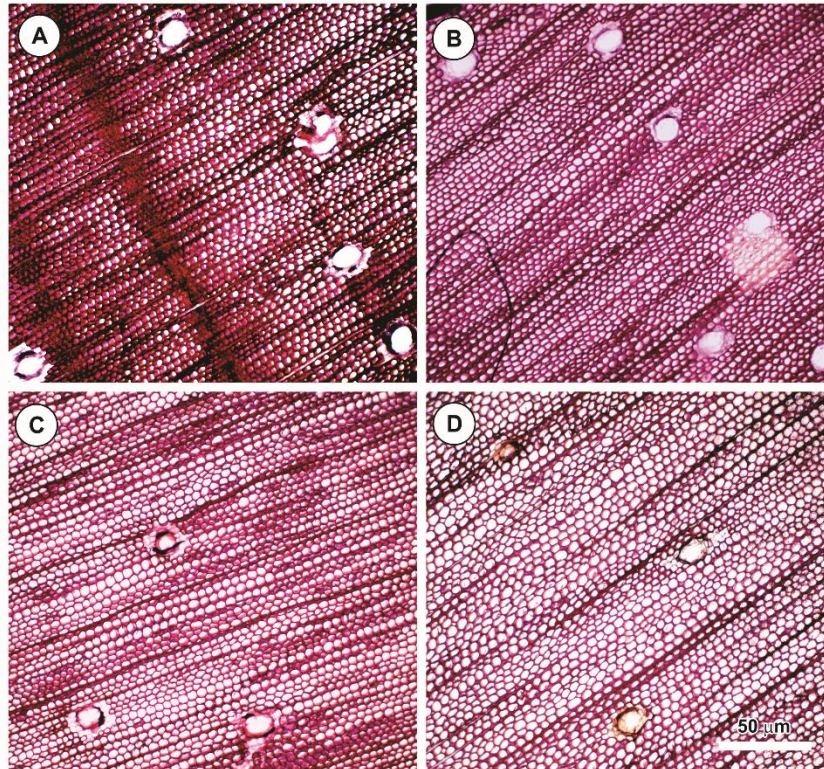
No que se refere ao NCR (Figura 4B e 5), as médias também apresentaram ampla variação, com as progênies P18, P24 e P25 compondo o grupo superior, com valores superiores a 20 000 canais, reforçando a existência de variabilidade anatômica com relevância funcional para a produção de goma-resina. Já para a PGR (Figura 4C), observou-se expressiva amplitude de resposta, com médias variando de menos de $0,5 \text{ kg árvore}^{-1}$ a mais de $1,5 \text{ kg árvore}^{-1}$, em seis meses. As progênies P19, P21, P22, P24, P30, P33, P40, P41, P50, P52, P54, P57, P58, P59 integraram o grupo com maior rendimento resinífero, evidenciando sua superioridade produtiva.

Figura 4 - Valores médios do DAP (cm), NCR e PGR (kg árvore⁻¹) das progênies de *P. caribaea* var. *hondurensis*, em Lavras - MG.



Fonte: Da autora (2025).

Figura 5 - Caracterização anatômica dos canais resiníferos em seção transversal das progênes de *P. caribaea* var. *hondurensis*, em Lavras - MG. A e B: distribuição dos canais nas progênes P24 e P18, respectivamente, alocadas no grupo “a”. C e D: distribuição dos canais nas progênes P35 e P63, respectivamente, alocadas no grupo “b”.



Fonte: Da autora (2025).

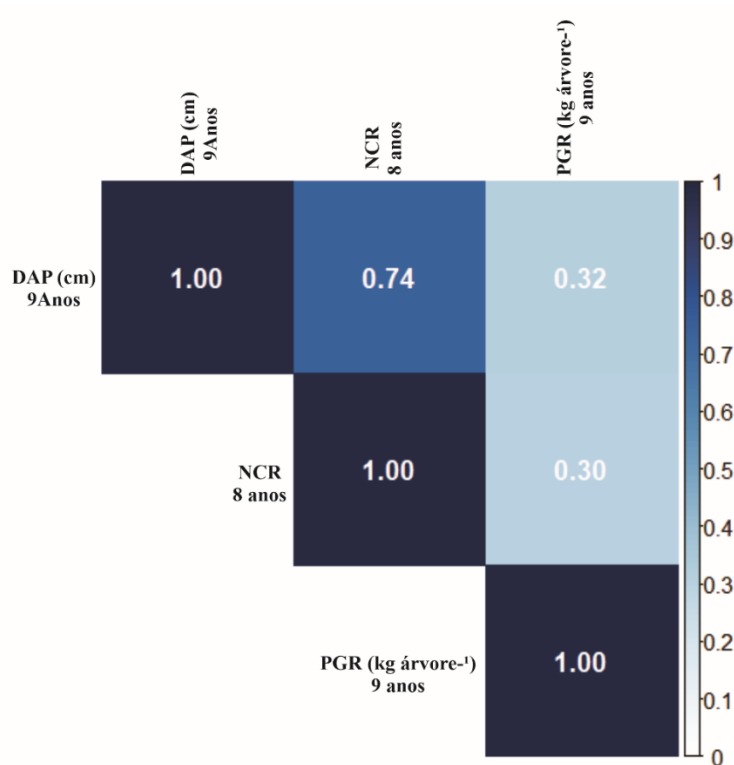
A análise de coincidência entre as progênes classificadas no grupo superior (“a”) para as diferentes características avaliadas evidenciou distintos níveis de sobreposição entre os grupos, os quais são complementares aos resultados obtidos por meio da correlação de *Pearson*. Observou-se que 100% das progênes com maior NCR também apresentaram os maiores DAPs (cm), resultado coerente com a correlação positiva e moderadamente alta entre essas variáveis (0,74) (Figura 6). No entanto, apenas 16,67% das progênes com maior DAP (cm) coincidiram com as de maior NCR, sugerindo que, embora a alta densidade de canais possa ocorrer em indivíduos com bom crescimento, ela não é uma condição obrigatória.

Em relação à PGR (kg árvore⁻¹), 61,11% das progênes com maior DAP (cm) também estiveram entre as mais produtivas em resina, e 78,57% das progênes com maior PGR (kg árvore⁻¹) coincidiram com aquelas de maior DAP (cm), o que reflete uma tendência de associação positiva entre crescimento e produção, embora a correlação entre essas variáveis tenha sido de baixa magnitude (0,32) (Figura 6). Já a relação entre NCR e PGR (kg árvore⁻¹) apresentou coincidência ainda mais limitada: apenas 33,33% das progênes com maior NCR

estiveram entre as mais produtivas e apenas 7,14% das mais produtivas coincidiram com aquelas de maior NCR. Essa baixa coincidência é compatível com a fraca correlação observada entre NCR e PGR (kg árvore^{-1}) (0,30) (Figura 6).

Esses resultados indicam variabilidade fenotípica significativa entre as progênies para todas as características analisadas, o que justifica a adoção de estratégias de seleção específicas ou combinadas, dependendo dos objetivos dos programas de melhoramento, seja para crescimento, produção de goma-resina ou uso múltiplo.

Figura 6 - Correlação de *Pearson* (1985) para DAP (cm), NCR e PGR (kg árvore^{-1}) das progênies de *P. caribaea* var. *hondurensis*, em Lavras - MG.



Fonte: Da autora (2025).

4. DISCUSSÃO

A análise de variância evidenciou diferenças estatisticamente significativas entre as progênies de *P. caribaea* var. *hondurensis* para todas as características avaliadas, confirmando a existência de variabilidade fenotípica nos materiais genéticos estudados. A aplicação do teste de *Scott-Knott* permitiu agrupar as progênies em classes homogêneas, facilitando a

identificação de materiais superiores. Este método é amplamente reconhecido pela sua eficiência na segmentação em grupos estatisticamente distintos, sendo particularmente eficaz em experimentos com grande número de genótipos, como testes de progênies florestais (Bhering *et al.*, 2008; Conrado *et al.*, 2017; Jelihovschi; Faria; Allaman *et al.*, 2014).

Entre os atributos avaliados, o DAP se destaca por sua fácil mensuração e por ser um indicador indireto do vigor da planta. A associação moderadamente alta entre DAP e o NCR (0,74), aliada ao fato de 100% das progênies com maior NCR estarem entre as de maior DAP, indica que indivíduos com maior crescimento diamétrico podem apresentar maior densidade de estruturas anatômicas potencialmente relacionadas à exsudação resinífera. Esse padrão já foi relatado na literatura, apontando para a relevância do DAP, como indicador anatômico secundário em programas de seleção voltados para a produção de goma-resina (López-Alvarez; Zas; Marey-Perez. 2023; Neis *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2016).

Por outro lado, a baixa correlação observada entre o NCR e a PGR (0,30) associada a baixa coincidência entre elas (33,33% das progênies com maior NCR estiveram entre as mais produtivas - 7,14% das progênies mais produtivas coincidiram com as de maior NCR, indica que, embora tais estruturas sejam necessárias para o transporte e exsudação, sua quantidade absoluta não garante altos rendimentos. Esse resultado é coerente com estudos que destacam que a eficiência resinífera está mais associada ao diâmetro, à área total da copa e ao fluxo dos canais, do que à sua densidade numérica (Garcia-Forner *et al.*, 2021; Neis *et al.*, 2019). Assim, o número de canais não deve ser interpretado como uma variável complementar no processo de seleção.

Em relação à PGR, 61,11% das progênies com maior DAP estiveram entre as mais produtivas, e 78,57% das progênies com maior PGR coincidiram com aquelas de maior DAP, refletindo uma tendência de associação positiva entre crescimento e produção. No entanto, a correlação entre essas variáveis foi de baixa magnitude (0,32), indicando que esse padrão não é absoluto. Tal comportamento pode ser atribuído à natureza complexa e multifatorial da PGR, a qual é influenciada por uma interação de fatores genéticos, fisiológicos, ambientais e silviculturais (Vázquez-González *et al.*, 2021). A variabilidade fenotípica identificada no presente estudo indica um potencial para ganhos por meio de seleção, especialmente considerando que a produção de goma-resina é altamente dependente do genótipo e da sua interação com o ambiente (Li *et al.*, 2022; Tsaktsira *et al.*, 2023). Árvores com maior número e tamanho de estômatos, teor nutricional elevado e idade mais avançada tendem a produzir maiores volumes de goma-resina, ainda que essas características estejam sujeitas à modulação

por aspectos como clima, disponibilidade hídrica, competição e técnicas de extração (Lema *et al.*, 2024; López-Alvarez, Zas, Marey-Perez, 2023; Moura *et al.*, 2025). Portanto, este estudo reforça a importância de estratégias de seleção integradas, que combinem variáveis de crescimento e produtivas, visando o desenvolvimento de materiais genéticos superiores para exploração resinífera em condições tropicais.

5. CONCLUSÕES

Os resultados demonstraram variabilidade entre as progênes de *P. caribaea* var. *hondurensis* quanto ao DAP, NCR e PGR, indicando o potencial do experimento para programas de melhoramento voltados à produção de goma-resina em regiões tropicais. Foi possível identificar progênes com desempenho superior em cada característica, ressaltando a utilidade da seleção multivariada para ganhos combinados em crescimento e produtividade.

A correlação moderadamente alta entre DAP e NCR sugere que o crescimento pode contribuir indiretamente para a maior densidade de canais resiníferos, oferecendo um indicativo anatômico complementar na seleção de materiais mais produtivos. Contudo, a baixa associação entre essas variáveis e a produção de goma-resina evidencia o caráter multifatorial dessa característica, influenciada por fatores genéticos, anatômicos, fisiológicos e ambientais. Recomendam-se investigações futuras para aumentar a confiabilidade dos critérios de seleção e aprofundar o entendimento dos determinantes sobre a produtividade resinífera em *P. caribaea* var. *hondurensis*.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, J. A. A. *et al.* Qualidade do breu e terebintina de pinheiros tropicais. **Scientia Forestalis**, n. 21, p. 55–63, 1992.
- ASSOCIAÇÃO DOS RESINADORES DO BRASIL-ARESB. **Estatísticas**. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://www.aresb.com.br/portal/estatisticas/> Acesso em: 03 de abril de 2025.
- BHERING, L. *et al.* Alternative methodology for Scott-Knott test. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v.8, p. 9-16, 2008.
- BUKATSCH F. Bemerkungen zur doppelfärbung astrablausafranin. **Mikrokosmos**, v. 6, p. 33–36., 1972.
- CANDATEN, L. *et al.* Resinagem de Pinus no Brasil: aspectos gerais, métodos empregados e mercado. Produtos Florestais Não Madeireiros: **Tecnologia, Mercado, Pesquisas e Atualidades**, p. 44–58, 2021.
- CONRADO, T. *et al.* Ajustando as análises de agrupamento de Scott-Knott para delineamentos desbalanceados. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 17, p. 1-9, 2017. DOI: doi.org/10.1590/1984-70332017V17N1A1.
- DE LIMA, *et al.* Variação em propriedades da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e *Pinus tecunumanii*. **Advances in Forestry Science**, v. 7, n. 4, p. 1231-1240, 2020.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de classificação dos solos. 3. ed. rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.
- FERREIRA, A. T. B.; TOMAZELLO-FILHO, M. Aspectos anatômicos dos canais de resina e produção de óleo-resina em árvores de pinus. **Pine Resin: Biology, Chemistry and Applications**, p. 9–24, 2012.
- GARCIA-FORNER, N. *et al.* Growth-defence trade-offs in tapped pines on anatomical and resin production. **Forest Ecology and Management**, v. 496, p. 119406, 2021.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. Boletins agroclimatológicos. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. 2023. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/boletinsagro>. Acesso em: 17 de maio de 2025.
- JELIHOVSCHI, E., FARIA, J., ALLAMAN, I. ScottKnott: A Package for Performing the Scott-Knott Clustering Algorithm in R. **Trends in Applied and Computational Mathematics**, v.15, p. 003-017, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.5540/TEMA.2014.015.01.0003>.
- JOHANSEN, D.A. Microtécnica vegetal. 1940.
- LEGGATE, W. *et al.* Influence of Wood's Anatomical and Resin Traits on the Radial Permeability of the Hybrid Pine (*Pinus elliottii* × *Pinus caribaea*) Wood in Australia. **BioResources**, v. 15, n. 3, p. 6851–6873, 2020.

- LEMA, M. *et al.* Resin tapping of Atlantic pine forests: towards an optimized use of stimulant pastes over the season. **Eur. J. Forest. Res.**, v. 143, p. 1213–1224, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-024-01684-y>
- LI, Z. *et al.* Identification of Genes and Metabolic Pathways Involved in Resin Yield in Masson Pine by Integrative Analysis of Transcriptome, Proteome, and Biochemical Characteristics. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 23, 2022.
- LISBOA, A. C. *et al.* Produtividade de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e suas relações com atributos químicos dos solos em região de Cerrado brasileiro. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 47, n. 122, p. 289–298, 2019.
- LÓPEZ-ÁLVAREZ, Ó., ZAS, R., MAREY-PEREZ, M. Resin tapping: A review of the main factors modulating pine resin yield. **Industrial Crops and Products**, v. 202, p. 117105, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117105>.
- NEIS, F. A. *et al.* Resin exudation profile, chemical composition, and secretory canal characterization in contrasting yield phenotypes of *Pinus elliottii* Engelm. **Industrial Crops and Products**, v. 132, p. 76-83, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.02.013>
- NIERI É., M. *et al.* Selection of *Pinus spp.* progenies in Lavras (Minas Gerais, Brazil) at 36 months of age. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 52, 2022 - doi: <https://doi.org/10.33494/nzjfs522022x116x>
- OLIVEIRA, R. F. da S. *et al.* Crescimento e produção de um plantio jovem de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* na Amazônia Ocidental. **Scientia Naturalis**, Rio Branco, v. 6, n. 2, p. 862–874, 2024. DOI: <https://doi.org/10.29327/269504.6.2-20>.
- PEARSON, K. Notes on regression and inheritance in the case of two parents. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. 58, p. 240–242, 1895.
- SANTOS, M. P.; ARAUJO, M. J.; SILVA, P. H. M. da. Natural establishment of *Pinus spp.* around seed production areas and orchards. **Forest Ecology and Management**, v. 494, 2021. ISSN 0378-1127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119333>.
- SANTOS, W. *et al.* Genetic parameters and correlations between growth and resin production in *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. Colombo: Embrapa Florestas, 2016.
- SASS, J., E. Microtécnica botânica. 1958.
- SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO (SFB). Sistema Nacional de Informações Florestais (SNIF). **As florestas plantadas**. Disponível em: <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/florestas-plantadas/405-as-florestas-plantadas>. Acesso em: 1 abr. 2025.
- TSAKTSIRA, M. *et al.* Mitigação das Mudanças Climáticas Globais por meio do Melhoramento Genético da Produção de resina de Pinheiros Resinosos: O Caso do *Pinus halepensis* na Grécia. **Sustentabilidade**, 2023.
- VÁZQUEZ-GONZÁLEZ, C. *et al.* Genetic variation in resin yield and covariation with tree growth in maritime pine. **Forest Ecology and Management**, v. 482, p. 118843, 2021.

ZHANG, G. *et al.* Novel insights on genes and pathways involved in *Pinus elliottii* response to resinosis, **Tree Physiology**, v. 43, n. 2, p. 351-362, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1093/treephys/tpac118>

ARTIGO 3 - SELEÇÃO GENÉTICA E RELAÇÕES ENTRE CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DE GOMA-RESINA EM *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. & Golf.

RESUMO

Pinus caribaea var. *hondurensis* Barr. & Golf. destaca-se como uma alternativa promissora para o cultivo em regiões tropicais do Brasil, devido à sua elevada produtividade e versatilidade de usos para produção madeireira e resinífera. Diante disso, objetivou-se estimar os parâmetros genéticos, correlações e estratégias de seleção para crescimento e produção de goma-resina em *P. caribaea* var. *hondurensis*. O experimento foi conduzido com 31 progênies da espécie em delineamento de blocos completos casualizados, com 30 repetições e uma planta por parcela. Foram mensurados DAP (cm), H (m) e PGR (kg árvore⁻¹), e estimados parâmetros genéticos por meio de modelos mistos no software R, utilizando o pacote *Sommer*. O percentual de sobrevivência foi de 95%, evidenciando boa adaptação à região. As herdabilidades individuais foram moderadas (0,20 – 0,41), enquanto as médias entre progênies foram altas (0,57 – 0,78), indicando bom potencial de seleção entre famílias. As correlações genéticas entre idade-idade para DAP foram elevadas, sugerindo viabilidade de seleção precoce. Em contrapartida, a PGR apresentou correlações genotípicas negativas com o crescimento, indicando associação genética negativa. A seleção direta para cada característica avaliada mostrou-se mais eficaz para ganhos individuais, com 5,55% para DAP e 11,14% para PGR, enquanto índices ponderados permitiram ganhos simultâneos, ainda que mais modestos. Conclui-se que *P. caribaea* var. *hondurensis* possui elevado potencial para uso em programas de melhoramento na região de estudo, sendo recomendada a utilização de estratégias seletivas distintas para crescimento e PGR, conforme os objetivos de uso final.

Palavras-chave: melhoramento florestal; ganho genético; Resinagem.

ABSTRACT

Pinus caribaea var. *hondurensis* Barr. & Golf. stands out as a promising alternative for cultivation in tropical regions of Brazil due to its high productivity and versatility for both timber and resin production. Therefore, this study aimed to estimate genetic parameters, correlations, and selection strategies for growth and gum-resin yield in *P. caribaea* var. *hondurensis*. The experiment was conducted with 31 progenies of the species in a randomized complete block design, with 30 replications and one plant per plot. DBH (cm), height (m), and resin yield (kg tree⁻¹) were measured, and genetic parameters were estimated using mixed models in R software with the Sommer package. The survival rate was 95%, indicating good adaptation to the region. Individual heritabilities were moderate (0.20 - 0.41), while progeny mean heritabilities were high (0.57–0.78), demonstrating strong potential for family-based selection. Genetic age–age correlations for DBH were high, suggesting the feasibility of early selection. In contrast, resin yield showed negative genotypic correlations with growth traits, indicating an unfavorable genetic association. Direct selection for each trait proved more efficient for individual gains, with 5.55% for DBH and 11.14% for resin yield, while weighted selection indices allowed simultaneous gains, though more modest ones. It is concluded that *P. caribaea* var. *hondurensis* has high potential for use in breeding programs in the studied region, with distinct selection strategies recommended for growth and resin yield depending on final objectives.

Keywords: forest breeding; genetic gain; resin tapping.

1 INTRODUÇÃO

Espécies exóticas dos gêneros *Pinus spp.* e *Eucalyptus spp.* vêm sendo amplamente cultivadas no Brasil para garantir o fornecimento de produtos madeireiros e não madeireiros às indústrias florestais (IBÁ, 2024). Tradicionalmente, os plantios de *Pinus* concentram-se na Região Sul e parte do Sudeste do país, especialmente nos estados do Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e São Paulo, sendo voltados majoritariamente para os setores madeireiro e de celulose e papel. No entanto, observa-se uma tendência recente de expansão para áreas tropicais, impulsionada tanto pelas condições edafoclimáticas favoráveis quanto pela crescente demanda do mercado resinífero (ARESB, 2025; IBÁ, 2024).

Dentre as espécies tropicais com maior destaque, *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. & Golf., considerada a mais plantada no mundo em regiões tropicais, vem sendo amplamente cultivada no Brasil, especialmente nas regiões Sudeste e Centro-Oeste. A espécie também apresenta aptidão para o cultivo em áreas das regiões Norte e Nordeste, com exceção do Semiárido (Aguiar; Souza; Shimizu, 2014). Seu sucesso se deve à ampla adaptação ambiental, elevada produtividade, bom formato de fuste e expressiva capacidade de produção resinífera (Munhoz *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2021; Schimleck *et al.*, 2018).

Minas Gerais destaca-se como uma das novas fronteiras para o cultivo de *Pinus* tropicais, com 47 152 hectares destinados quase exclusivamente a essas espécies, com predominância de *P. caribaea* var. *hondurensis*. A produção está concentrada principalmente na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, onde as condições edafoclimáticas têm se mostrado altamente favoráveis ao desenvolvimento da espécie (IBGE, 2025; Ishibashi *et al.*, 2022). A produtividade média estadual é de 4 095 toneladas por ano, o que representa cerca de 2,9% da produção nacional (142 171 t ano⁻¹). Considerando o preço médio da tonelada de goma-resina de pinus tropicais no primeiro semestre de 2025 (R\$ 4.361,43), a atividade pode gerar uma receita anual estimada de R\$ 17.860.055,85 para o Estado (ARESB, 2025).

No entanto, apesar do crescente interesse e potencial produtivo da espécie, ainda são escassos os estudos voltados ao seu melhoramento genético em Minas Gerais, especialmente aqueles que integram simultaneamente características de crescimento e produtividade de goma-resina em condições tropicais (Ishibashi *et al.*, 2022; Niere *et al.*, 2022). Essa lacuna limita o desenvolvimento de materiais geneticamente superiores, adaptados e de alto desempenho, reforçando a necessidade de pesquisas regionais que subsidiem programas de melhoramento florestal mais eficazes.

Considerando sua versatilidade e importância econômica, o desenvolvimento de genótipos superiores é essencial para ampliar o uso comercial da espécie e fortalecer cadeias produtivas regionais. Nesse contexto, os programas de melhoramento em novas áreas de plantio tornam-se indispensáveis e, para isso, os testes de progênes são componentes centrais desses programas, pois possibilitam a avaliação do desempenho dos descendentes e a seleção de indivíduos superiores para gerações futuras (Bragg, 2011; Rweyongeza, 2016).

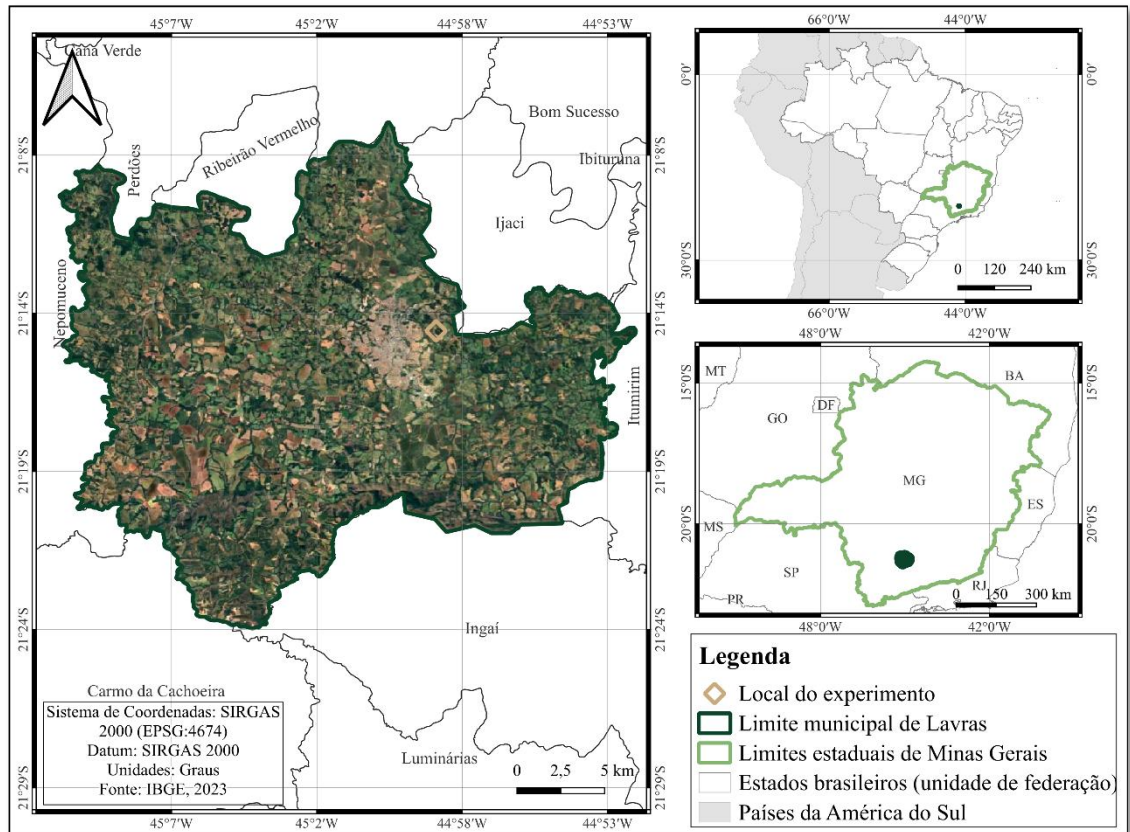
Estimativas de parâmetros genéticos, como herdabilidade e coeficientes de variação genética, fornecem subsídios valiosos para orientar estratégias de seleção mais eficientes (Martins *et al.*, 2018), contribuindo para o aumento dos ganhos em produtividade, especialmente quando se avaliam características silviculturais de interesse econômico (Miranda *et al.*, 2019). Portanto, os objetivos deste estudo foram: (i) estimar os parâmetros genéticos para as características diâmetro à altura do peito (DAP), altura (H) e produtividade de goma-resina (PGR); (ii) analisar as correlações fenotípicas e genotípicas entre essas variáveis; e (iii) selecionar as progênes mais promissoras para futuros programas de melhoramento em *P. caribaea* var. *hondurensis* em Lavras - MG.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local e condições experimentais

A instalação do experimento ocorreu em setembro de 2015, em uma área experimental da Universidade Federal de Lavras (UFLA), situada no município de Lavras, mesorregião do Campo das Vertentes, estado de Minas Gerais, Brasil - região não tradicional de cultivo para a espécie - nas coordenadas 21°14'15.63"S e 44°58'27.86"O (Figura 1). O local está inserido em uma zona de transição entre os biomas Cerrado e Mata Atlântica, apresentando predominantemente o Cambissolo Háptico distrófico, conforme classificação da Embrapa (2013). O clima é classificado como tropical de altitude (Cwb) segundo Köppen-Geiger, com verões moderadamente amenos, temperatura média anual de 19,6 °C e precipitação anual em torno de 1511 mm (INMET, 2024).

Figura 1. Mapa da área experimental, estabelecida como um teste de progênies de *P. caribaea* var. *hondurensis*, em Lavras - MG.



Fonte: Da autora (2025).

2.2 Material genético e delineamento experimental

Foram avaliadas 31 progênies de meios-irmãos de *P. caribaea* var. *hondurensis* (P18, P19, P20, P21, P22, P24, P25, P26, P28, P30, P33, P34, P35, P37, P39, P40, P41, P43, P44, P46, P49, P50, P52, P54, P55, P57, P58, P59, P61, P63, P68), originadas de matrizes de polinização aberta, localizadas em plantios comerciais da Empresa Resineves Agronegócios, Itapeva - SP. As mudas foram produzidas em tubetes de 55 cm³ com substrato comercial. O experimento foi implantado em delineamento de blocos completos casualizados (DBC), com 30 repetições e uma planta por parcela, conforme descrito por Nieri *et al.* (2022).

2.3 Coleta de dados

A sobrevivência (S) foi avaliada aos nove anos, sendo atribuído 0 para plantas mortas e 1 para plantas vivas. Dos três aos nove anos, foi medida anualmente o diâmetro à altura do peito (DAP - cm) com o auxílio de uma suta. A altura (H - m) das árvores foi mensurada dos dois aos cinco anos com régua graduada, sendo a medição suspensa posteriormente devido à dificuldade técnica imposta pelo aumento do porte das árvores e pelo fechamento das copas. A avaliação da produtividade de goma-resina (PGR - kg árvore⁻¹) se deu aos nove anos, no qual, foram selecionadas as árvores com diâmetro igual ou superior a 15 cm, para a exploração de uma das faces do tronco conforme metodologia descrita no artigo 1.

2.4 Análises estatísticas

Todas as análises foram realizadas no R (R Core Team, 2024). A importação dos dados foi efetuada utilizando o pacote *readxl* (Wickham; Bryan, 2023). Componentes de variância e parâmetros genéticos foram estimados por meio de modelos mistos utilizando o pacote *Sommer* (Covarrubias-Pazaran, 2016) (Tabela 1), com base no seguinte modelo:

$$y = Xb + Za + e \quad (1)$$

Em que: y é o vetor de observações; b é o vetor dos efeitos de repetição (fixos); a é o vetor dos efeitos genéticos (aleatórios); e é o vetor dos resíduos (aleatório). X e Z representam as matrizes de incidência para os efeitos citados.

O teste de razão de verossimilhança (LRT) com nível de significância de 5%, as correlações fenotípicas (Equação 11) (Tabela 1), genotípicas (Equação 12) (Tabela 1) e o ganho genético (Equação 13) (Tabela 1) também foram estimados utilizando o pacote *Sommer* (Covarrubias-Pazaran, 2016). O ganho genético para DAP (cm) e PGR (kg árvore⁻¹) aos nove anos de idade foi calculado considerando os valores genéticos positivos das progênies avaliadas. A acurácia foi determinada utilizando 100 reamostragens *bootstrap*.

Tabela 1 – Equações para estimativa dos parâmetros genéticos em progênies de *P. caribaea var. hondurensis*, em Lavras - MG.

(Continua)

Ordem	Parâmetros	Equações	Componentes
1	Herdabilidade genética aditiva individual - h_a^2	$h_a^2 = \frac{\sigma_a^2}{\sigma_p^2}$	Variância aditiva - σ_a^2 Variância fenotípica - σ_p^2
2	Herdabilidade media de progênie- h_m^2	$h_m^2 = \frac{\sigma_g^2}{\sigma_g^2 + \frac{\sigma_e^2}{n}}$	Variância genética - σ_g^2 Variância residual - σ_e^2 Número de plantas por progênie - n
3	Herdabilidade aditiva dentro de progênie - h_{ad}^2	$h_{ad}^2 = \frac{\sigma_a^2}{\sigma_a^2 + \sigma_e^2}$	Variância aditiva - σ_a^2 Variância residual - σ_e^2
4	Acuracia de seleção de progênies - Acrop	$Acrop = \sqrt{h_m^2}$	Herdabilidade media de progênie - h_m^2
5	Coefficiente de variação genética individual - $CV_i\%$	$CV_i = \frac{\sqrt{\sigma_a^2}}{m} \cdot 100$	Variância aditiva - σ_a^2 Média geral - m
6	Coefficiente de variação genética entre progenies - $CV_{gp}\%$	$CV_{gp} = \frac{\sqrt{\sigma_g^2}}{m} \cdot 100$	Variância genotípica - σ_g^2 Média geral - m

Tabela 1 – Equações para estimativa dos parâmetros genéticos em progênies de *P. caribaea var. hondurensis*, em Lavras - MG.

(Continuação)

Ordem	Parâmetros	Equações	Componentes
7	Coefficiente de variação residual - $CV_e\%$	$CV_e = \frac{\sqrt{\sigma_e^2}}{m} \cdot 100$	Residual variance Variância residual - σ_e^2 Média geral - m
8	Variância do erro de predição dos valores genotípicos - PEV	$PEV = (1 - Acrop^2)\sigma_a^2$	Variância aditiva - σ_a^2 Acuracia de seleção de progênies - $Acrop$
9	Desvio-padrão dos valores genotípicos preditos - SEP	$SEP = \sqrt{PEV}$	Variância do erro de predição dos valores genotípicos - PEV
10	Coefficiente de variação experimental - CV_r	$CV_r = \frac{CV_i}{CV_e}$	Coefficiente de variação genética individual - $CV_i\%$ Coefficiente de variação residual - $CV_e\%$
11	Correlação fenotípica - r_p	$r_p = \frac{Cov(xy)}{\sigma_x \sigma_y}$	Covariância entre os caracteres X e Y - $Cov(xy)$ Desvio-padrão dos caracteres X e Y - σ
12	Correlação genotípica - r_{gxy}	$r_{gxy} = \frac{cov_a(xy)}{\sqrt{\sigma_{ax}^2 \cdot \sigma_{ay}^2}}$	Covariância genética aditiva entre os caracteres X e Y - cov_a Variância genética aditiva para as variáveis X e Y - σ_a^2

Tabela 1 – Equações para estimativa dos parâmetros genéticos em progênies de *P. caribaea var. hondurensis*, em Lavras - MG.

(Conclusão)

Ordem	Parâmetros	Equações	Componentes
13	Ganho genético - ΔG	$\Delta G = X_s - X_o$	Valores genéticos médios das progênies selecionadas - X_s Valores genéticos médios gerais das progênies - X_o

Fonte: Da autora (2025).

A seleção combinada para DAP (cm) e PGR (kg árvore⁻¹) foi realizada por meio do método de ordenamento por soma de postos com ponderações, conforme descrito por Mulamba e Mock (1978). O índice de seleção de cada progênie foi obtido a partir da soma dos postos atribuídos às características, considerando os respectivos pesos definidos para cada variável, seguindo a equação abaixo:

$$I_i = \sum_{j=1}^n R_{ij} \cdot w_j \cdot x_{ij} \quad (5)$$

Em que: I_i representa o índice da i -ésima progênie; R_{iJ} corresponde às classificações (ordens decrescentes de mérito genético) para as características consideradas (DAP (cm) e PGR (kg árvore⁻¹)); x_{ij} refere-se ao valor fenotípico ou genético predito da j -ésima característica para a i -ésima progênie; w_j refere-se aos pesos atribuídos a cada característica. Foram considerados três cenários de ponderação:

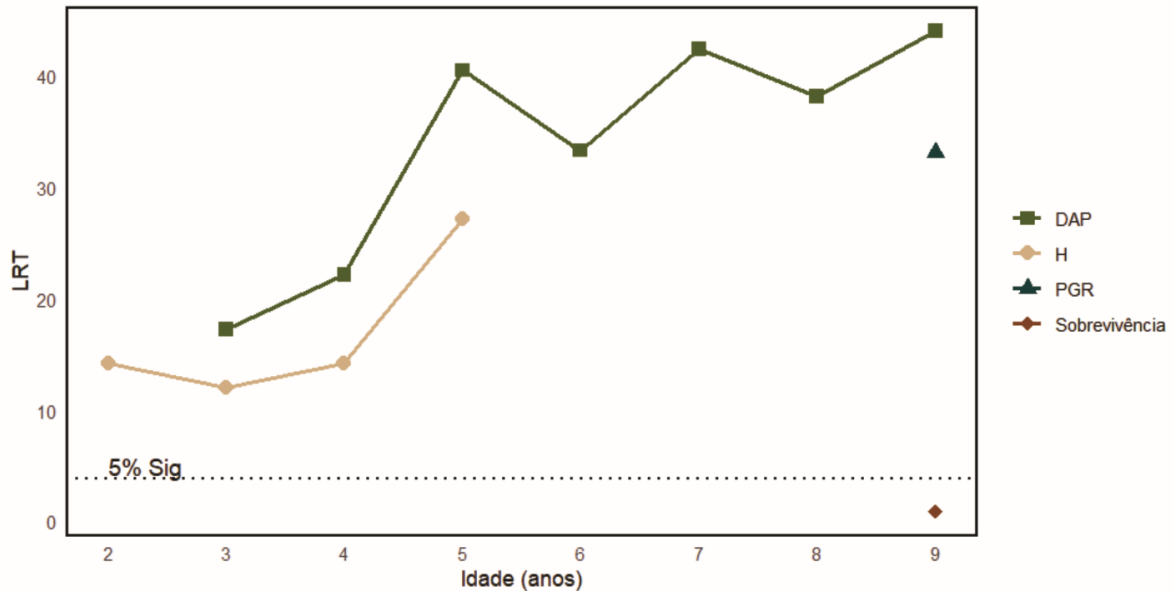
- (i) Maior peso para DAP ($w_1 = 0,7$, $w_2 = 0,3$);
- (ii) Maior peso para PGR ($w_1 = 0,3$, $w_2 = 0,7$);
- (iii) Peso igual para ambas as variáveis ($w_1 = w_2 = 0,5$).

As quatro progênies com os menores valores de índice combinado foram selecionadas em cada caso. Os gráficos foram gerados utilizando o pacote *ggplot2* (Wickham, 2024) no software R.

3 RESULTADOS

O percentual de sobrevivência médio das progênies de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* aos nove anos em Lavras-MG foi de 95%, demonstrando o potencial de adaptação da espécie para a região de estudo. Mediante análise de *deviance* (ANADEV), pelo teste de razão da verossimilhança não há diferença entre as progênies quanto à sobrevivência ao nível de 5% de significância, enquanto para as demais variáveis analisadas, observou-se significância dos efeitos dos genótipos (Figura 2). Portanto, infere-se a existência de variabilidade para a seleção de genótipos superiores para as características de DAP (cm), H (m) nas diferentes idades e PGR (kg árvore⁻¹) aos nove anos.

Figura 2 – Análise de deviance (*ANADEV*) para DAP (cm), H (m), PGR (kg árvore⁻¹) e sobrevivência para as progênes de *P. caribaea* var. *hondurensis*, em Lavras - MG.



5% Sig: significância ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de qui-quadrado.

Fonte: Da autora (2025).

As estimativas de herdabilidade individual no sentido restrito (h^2a) para o DAP (cm) variaram entre 0,20 e 0,41, enquanto para a H (m) oscilaram de 0,17 a 0,30. Para a PGR (kg árvore⁻¹) avaliada aos nove anos, o valor observado foi de 0,33. Já as estimativas de herdabilidade média entre progênes (h^2mp) foram mais elevadas, situando-se entre 0,62 e 0,78 para o DAP (cm), 0,57 a 0,71 para a H (m), e 0,73 para a PGR (kg árvore⁻¹). As herdabilidades aumentaram com a idade para as variáveis DAP (cm) e H (m), e, para todas as características avaliadas, os valores foram classificados como moderados a altos, evidenciando um bom potencial para ganhos genéticos por meio da seleção de famílias.

A acurácia da seleção entre progênes (rgg) manteve-se elevada ao longo de todas as idades e características avaliadas, com valores superiores a 0,76, atingindo 0,88 para o DAP (cm) aos nove anos. Isso reforça a eficiência na identificação de indivíduos geneticamente superiores. Os coeficientes de variação genética aditiva individual ($CV_{gi}\%$) para o DAP (cm) apresentaram aumento com a idade, variando de 10,16% a 15,57%. Para a H (m), os valores oscilaram entre 9,70% e 12,26%, enquanto a PGR (kg árvore⁻¹) alcançou 27,25%, indicando ampla variabilidade genética disponível para seleção.

Os coeficientes de variação entre progênes ($CV_{gp}\%$) para o DAP (cm) estiveram entre 5,08% e 7,78%; para a H (m), variaram de 4,85% a 6,13%. A PGR (kg árvore⁻¹) apresentou

13,62%, o que evidencia diferenças fenotípicas significativas entre famílias (Tabela 4). De forma geral, os dados obtidos demonstram um alto potencial de resposta à seleção genética para as três características analisadas.

Tabela 4 – Estimativas dos parâmetros genéticos para DAP (cm), H (m) e PGR (kg árvore⁻¹) para as progênes de *P. caribaea var. hondurensis*, em Lavras - MG.

Idade/Parâmetros	h^2_a	h^2_{mp}	r_{gg}	h^2_{ad}	$CV_{gi}\%$	$CV_{gp}\%$	$CV_{\epsilon}\%$	$CV_r\%$	PEV	SEP	m
DAP 3 anos	0,20 +- 0,08	0,62	0,79	0,17	15,85	7,92	33,75	0,23	0,11	0,33	6,81
DAP 4 anos	0,24 +- 0,09	0,66	0,81	0,19	13,22	6,61	26,01	0,25	0,21	0,46	11,96
DAP 5 anos	0,37+- 0,11	0,76	0,87	0,31	13,78	6,89	21,38	0,32	0,31	0,56	16,36
DAP 6 anos	0,33 +- 0,11	0,74	0,86	0,28	13,24	6,62	21,76	0,30	0,47	0,69	20,21
DAP 7 anos	0,39 +- 0,12	0,76	0,87	0,33	14,33	7,17	21,76	0,33	0,55	0,74	21,44
DAP 8 anos	0,37+- 0,11	0,75	0,87	0,30	14,40	7,20	22,58	0,32	0,67	0,82	22,93
DAP 9 anos	0,41+- 0,12	0,78	0,88	0,31	15,53	7,76	22,84	0,34	0,92	0,95	24,42
H 2 anos	0,19 +- 0,08	0,60	0,78	0,15	12,26	6,13	27,28	0,22	0,01	0,09	2,43
H 3 anos	0,17 +- 0,08	0,57	0,76	0,13	11,78	5,89	27,87	0,21	0,03	0,17	4,41
H 4 anos	0,20 +- 0,08	0,61	0,78	0,16	11,97	5,98	26,07	0,23	0,06	0,25	6,73
H 5 anos	0,30+- 0,10	0,71	0,84	0,25	9,70	4,85	16,81	0,29	0,06	0,25	9,48
PGR 9 anos	0,33 +- 0,11	0,73	0,85	0,27	27,23	13,62	45,39	0,30	0,01	0,08	1,05

h^2_a – Herdabilidade individual no sentido restrito; h^2_{mp} – Herdabilidade média das progênes; r_{gg} – Acurácia da seleção entre progênes; h^2_{ad} – Herdabilidade aditiva dentro das progênes; $CV_{gi}\%$ – Coeficiente de variação genética aditiva individual (%); $CV_{gp}\%$ – Coeficiente de variação genética entre progênes (%); $CV_{\epsilon}\%$ – Coeficiente de variação residual (%); $CV_r\%$ – Coeficiente de variação relativa (%); PEV – Variância do erro de predição dos valores genotípicos; SEP – Desvio padrão do valor genotípico predito; m – Média geral.

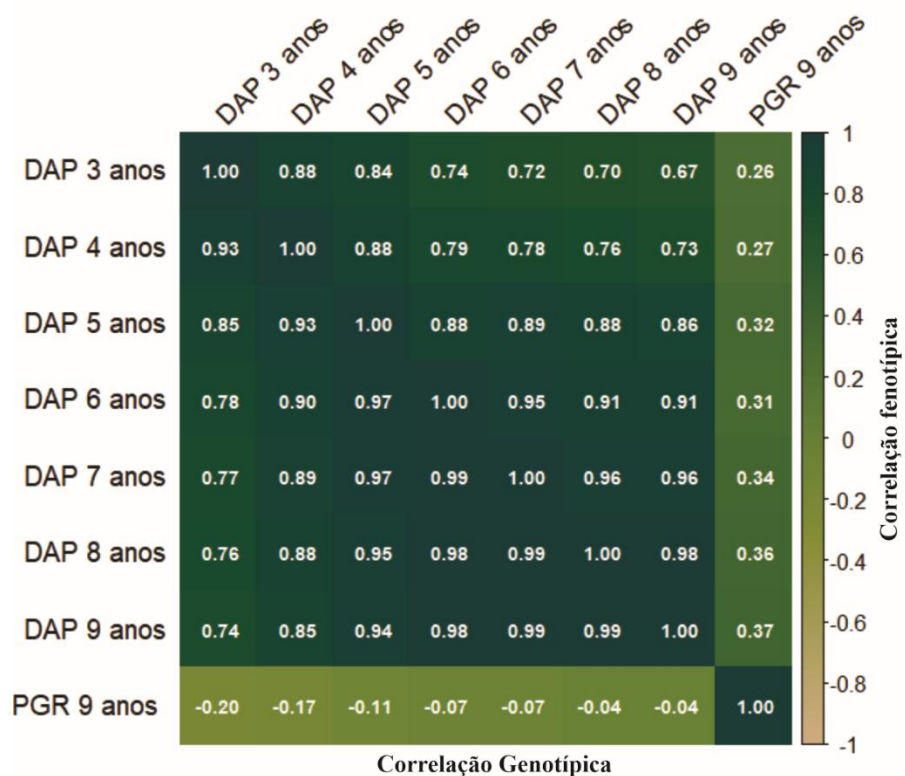
Fonte: Da autora (2025).

A avaliação das correlações entre as características de crescimento (DAP – cm e H – m) e PGR (kg árvore^{-1}) demonstrou padrões distintos ao longo do tempo. As correlações fenotípicas e genotípicas para DAP (cm) entre diferentes idades foram altas e consistentes, com valores fenotípicos variando de 0,67 a 0,98 e genotípicos de 0,74 a 0,99, refletindo estabilidade temporal alta para o crescimento em diâmetro (Figura 3). A H (m) apresentou comportamento semelhante, com correlações fenotípicas entre idades variando de 0,55 a 0,85, e genotípicas de 0,69 a 0,92, evidenciando também a contínua expressão dessa característica ao longo do tempo (Figura 4).

As correlações entre DAP (cm) e H (m) ao longo do tempo foram positivas e elevadas, confirmando a relação conjunta dessas características. As correlações fenotípicas oscilaram entre 0,57 e 0,89, com maiores valores nas fases iniciais (Figura 5A). As correlações genotípicas variaram de 0,64 a 0,90, com destaque para as combinações entre as idades mais avançadas, como DAP (cm) de 9 anos \times H (m) de 5 anos (0,90) (Figura 5B).

Por outro lado, as correlações entre as características de crescimento (DAP – cm e H – m) e a PGR (kg árvore^{-1}) aos nove anos de idade foram baixas (Figuras 3 e 4). As correlações fenotípicas entre DAP (cm) e PGR (kg árvore^{-1}) variaram de 0,26 a 0,37, enquanto as correlações genotípicas foram negativas, variando de -0,20 a -0,04. No caso da H (m), as correlações fenotípicas com a PGR (kg árvore^{-1}) oscilaram de 0,22 a 0,30, e as genotípicas, de -0,14 a -0,01.

Figura 3 – Correlações fenotípicas e genotípicas entre DAP (cm) nas diferentes idades e DAP (cm) nas diferentes idades e PGR (kg árvore⁻¹) aos nove anos para as progênie de *P. caribaea* var. *hondurensis*, em Lavras - MG.



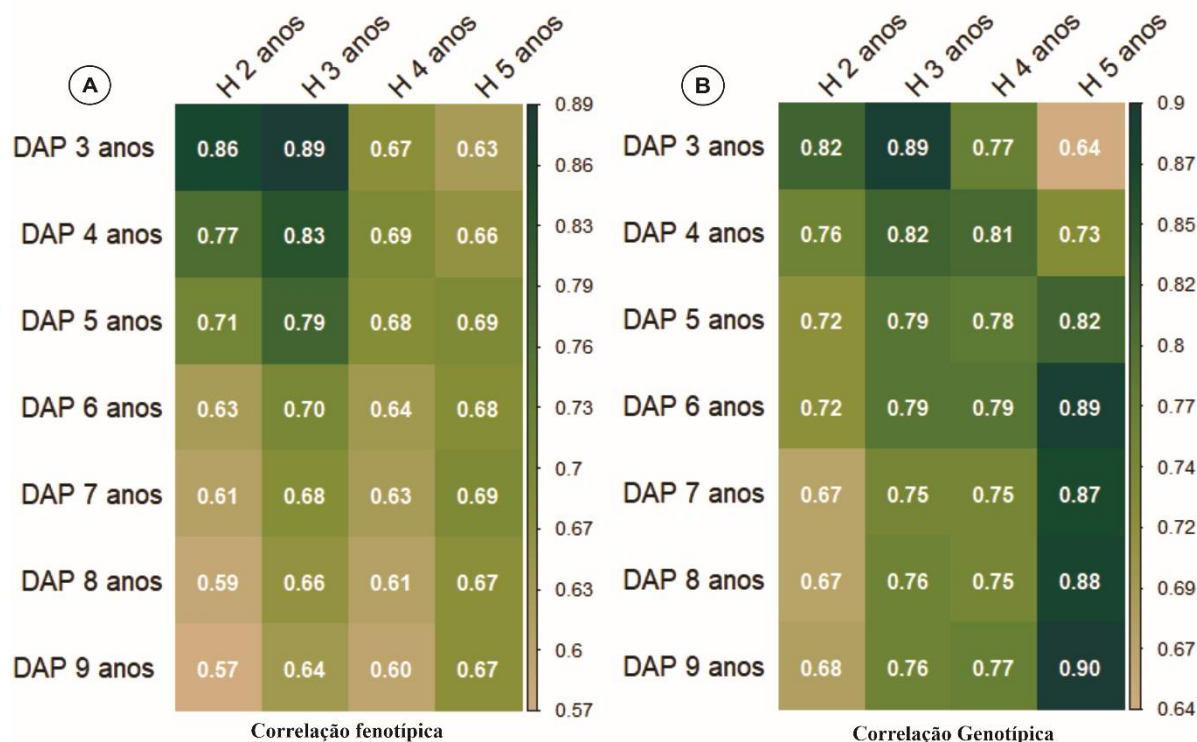
Fonte: Da autora (2025).

Figura 4 – Correlações fenotípicas e genotípicas entre H (m) nas diferentes idades e H (m) nas diferentes idades e PGR (kg árvore⁻¹) aos nove anos para as progênies de *P. caribaea* var. *hondurensis*, em Lavras - MG.



Correlação Genotípica
Fonte: Da autora (2025).

Figura 5 – Correlações entre DAP (cm) e H (m) em diferentes idades para as progênes de *P. caribaea* var. *hondurensis* em Lavras - MG. A- Correlações fenotípicas; B - Correlações genotípicas.



Fonte: Da autora (2025).

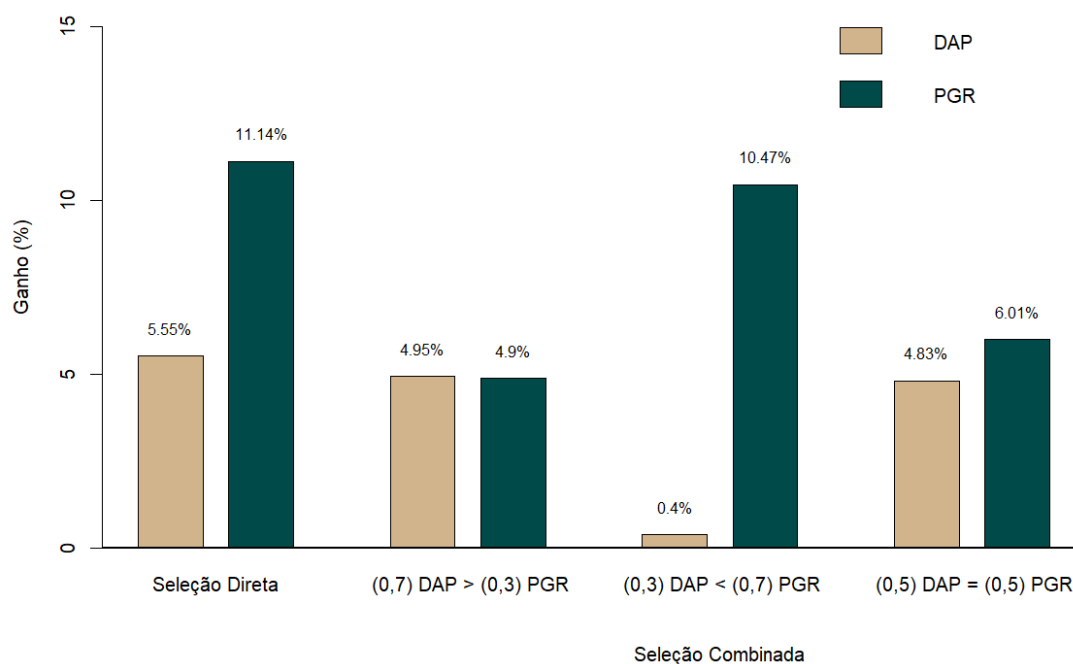
Os ganhos genéticos obtidos por seleção direta e combinada para DAP (cm) e PGR (kg árvore⁻¹) aos nove anos evidenciaram diferenças em função dos cenários adotados (Figura 6). A seleção direta resultou em ganhos de 5,55% para DAP (cm) e 11,14% para PGR (kg árvore⁻¹), sendo, portanto, a mais eficiente na melhoria individual de cada característica, com destaque para a PGR (kg árvore⁻¹).

Nos cenários de seleção combinada, os ganhos foram influenciados pelas ponderações atribuídas a cada caráter. Quando a seleção priorizou DAP (cm) (peso 0,7 para DAP – cm e 0,3 para PGR - kg árvore⁻¹), o ganho para DAP (cm) foi de 4,95%, enquanto o ganho para PGR (kg árvore⁻¹) foi de 4,90%, indicando uma resposta moderada e equilibrada. Por outro lado, ao priorizar a PGR (kg árvore⁻¹) (peso 0,3 para DAP- cm e 0,7 para PGR - kg árvore⁻¹), o ganho para PGR (kg árvore⁻¹) foi expressivo, 10,47%, enquanto o ganho para DAP (cm) reduziu para 0,40%, evidenciando a pouca eficiência dessa ponderação para ganhos em crescimento.

No cenário de ponderações iguais (0,5 para cada variável), observou-se ganho de 4,83% para DAP (cm) e 6,01% para de PGR (kg árvore⁻¹), sugerindo que a seleção balanceada pode

proporcionar ganhos simultâneos, embora mais modestos do que a seleção direta em cada característica, revelando-se uma alternativa viável para sistemas de uso múltiplo, onde o objetivo é conciliar crescimento (DAP – cm e H – m) e PGR (kg árvore⁻¹).

Figura 6 - Ganhos com a seleção para DAP (cm) e PGR (kg árvore⁻¹) utilizando o método direto e combinado - segundo Mulamba e Mock (1978), para as progênie de *P. caribaea* var. *hondurensis* aos nove anos em Lavras - MG.



Fonte: Da autora (2025).

Com base nas diferentes estratégias de seleção aplicadas, o ranking formado por 40% das progênie com maiores BLUPs na seleção direta e menores valores totais no índice combinado, apresentou variações consideráveis (Tabela 4), destacando o impacto das escolhas metodológicas sobre a composição genética dos materiais selecionados.

Na seleção direta, que considera cada característica isoladamente, observou-se maior divergência entre os conjuntos de progênie superiores para DAP (cm) e PGR (kg árvore⁻¹), onde 58% das progênie selecionadas foram distintas entre os dois caracteres. As demais (42%) corresponderam às mesmas progênie, embora posicionadas de forma diferente no ranking.

Já na seleção combinada, utilizando o índice de Mulamba e Mock (1978) com diferentes ponderações, houve maior sobreposição entre os conjuntos selecionados, no qual, 67% das progênie foram comuns entre os cenários, ainda que ranqueadas em posições distintas. Os 33% restantes diferiram de acordo com o caráter favorecido pela ponderação adotada em cada

cenário. Esses resultados evidenciam que as escolhas metodológicas exercem influência direta sobre a constituição genética dos genótipos selecionados. É importante observar que as progênies P24, P30, P33 e P52 mantêm desempenho superior, posicionando-se entre os quatro primeiros lugares em ambos os métodos de seleção: direta e combinada.

Tabela 4 - Ranking das progênies de *P. caribaea* var. *hondurensis* aos nove anos em Lavras – MG sob diferentes cenários de seleção.

Seleção Direta		Seleção Combinada		
DAP	PGR	(0,7) > (0,3)	(0,3) < (0,7)	(0,5) = (0,5)
		DAP > PGR	DAP < PGR	DAP = PGR
P22	<u>P30</u>	<u>P33</u>	<u>P30</u>	<u>P30</u>
P57	<u>P52</u>	<u>P52</u>	<u>P52</u>	<u>P52</u>
<u>P24</u>	P26	<u>P24</u>	<u>P33</u>	<u>P33</u>
<u>P33</u>	P54	<u>P30</u>	P26	<u>P24</u>
P25	P21	P57	P54	P57
<u>P52</u>	<u>P33</u>	P22	<u>P24</u>	P26
<u>P30</u>	P28	<u>P43</u>	P57	<u>P43</u>
P55	P46	P25	<u>P43</u>	P54
P34	P41	P34	P21	P34
<u>P43</u>	<u>P24</u>	P54	P46	P40
P63	<u>P43</u>	P55	P28	P25
P44	P68	P26	P40	P22

As progênies sublinhadas foram selecionadas em todas as estratégias; As progênies destacadas em marrom nos diferentes cenários de seleção combinada coincidem com as selecionadas para DAP pela seleção direta; As progênies destacadas em azul nos diferentes cenários de seleção combinada, coincidem com as selecionadas para a PGR pelo método de seleção direta; As progênies destacadas em roxo indicam seleção por um cenário específico da seleção combinada.

Fonte: da autora (2025).

4 DISCUSSÃO

O elevado percentual de sobrevivência (95%), analisado aos nove anos de idade no experimento conduzido em Lavras - MG, demonstra o bom desempenho adaptativo das diferentes progênies de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* em condições tropicais. Este resultado

evidencia o potencial de uso da espécie em novas regiões de plantio, fora do eixo tradicional de cultivo do gênero *Pinus*, que se concentra principalmente no Sul e parte do Sudeste do Brasil (Aguiar; Souza; Shimizu, 2014; IBÁ, 2024; Zulian *et al.*, 2024). Essa performance está em consonância com os resultados obtidos por Niere *et al.* (2022) na avaliação precoce realizada aos três anos no mesmo experimento, bem como com os dados de Ishibashi *et al.* (2022), que apontam bom desempenho da espécie na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, área que concentra a maior extensão plantada com essa variedade em Minas Gerais. Esses achados confirmam a adaptabilidade previamente relatada por Munhoz *et al.* (2021) e Schimleck *et al.* (2018).

Uma vez comprovada a adaptação da espécie às condições edafoclimáticas locais, a análise de *deviance* (teste *LRT* a 5% de significância) confirmou a existência de variabilidade genética entre os materiais avaliados. De acordo com Resende (2002) essa variabilidade genética é essencial para o progresso genético por meio da seleção, pois constitui a base para identificar e explorar indivíduos superiores, possibilitando a formação de populações melhoradas, mais produtivas e adaptadas às condições específicas de cultivo.

As estimativas de herdabilidade individual (h^2a) foram classificadas como moderadas para as três características, indicando potencial de resposta à seleção. Já a herdabilidade média entre progênies (h^2mp) foi considerada alta, o que reforça a recomendação da seleção entre famílias como estratégia eficiente para obtenção de ganhos genéticos (Lai *et al.*, 2020; Resende, 2022).

A acurácia da seleção entre progênies (*rgg*) apresentou valores superiores a 0,70, indicando elevada confiabilidade nas predições genéticas, conforme os critérios estabelecidos por Resende e Duarte (2007). Esse nível de acurácia está em concordância com os padrões esperados para programas de melhoramento florestal baseados em BLUPs, garantindo maior precisão na identificação de genótipos superiores (Martins *et al.*, 2018; Miranda *et al.*, 2019) e contribuindo para o avanço genético em produtividade (Martinez *et al.*, 2012).

Os coeficientes de variação genética reforçaram a presença de diversidade entre as progênies. O *CVgi*, diretamente ligado à variância aditiva, reflete o componente herdável da variação fenotípica, enquanto o *CVgp* representa a variação entre médias familiares. Altos valores desses parâmetros favorecem a seleção de genótipos superiores (Nieri *et al.*, 2022; Santos *et al.*, 2021). Neste estudo, os valores de *CVgi* para DAP, H e PGR foram superiores aos de *CVgp*, o que indica ampla variabilidade dentro das famílias, podendo ser explorada em etapas futuras do programa, como a seleção dentro de famílias.

Esses achados estão de acordo com os de Nieri *et al.* (2022), que, em avaliação precoce com progênies de pinus tropicais em Lavras-MG, também observaram maior CV_{gi} em relação ao CV_{gp} . Resultados semelhantes foram relatados por Souza *et al.* (2017) ao analisarem diferentes procedências de *P. caribaea* var. *hondurensis*, demonstrando que essa relação é comum e útil para justificar abordagens complementares de seleção.

Por fim, os valores observados neste estudo superaram aqueles registrados em pesquisas com a mesma espécie e com outros representantes do gênero *Pinus* (Moreira *et al.*, 2014; Souza *et al.*, 2022; Tambarussi *et al.*, 2010; Zulian *et al.*, 2024). Esses resultados validam os parâmetros genéticos estimados e reafirmam a presença de variabilidade genética significativa, elemento fundamental para o sucesso de estratégias de melhoramento genético.

A compreensão das correlações fenotípicas e genotípicas entre características é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de melhoramento mais eficientes (Li *et al.*, 2020). As altas correlações observadas entre idades para o DAP e a H indicam estabilidade temporal dessas características, especialmente a partir dos quatro anos. Esse padrão sugere que a seleção precoce para crescimento é viável, permitindo antecipar decisões no programa de melhoramento e reduzir a duração dos ciclos seletivos (Hong, Fries, Wu, 2015; Wu, 1999). Além disso, as correlações elevadas entre DAP e H reforçam o potencial de ganhos simultâneos por meio de seleção indireta, possivelmente devido a um controle genético compartilhado, seja por pleiotropia (Du *et al.*, 2019; Valenzuela *et al.*, 2019), ou por desequilíbrio de ligação, decorrente da proximidade entre os genes envolvidos (Kelleher *et al.*, 2012), o que torna a seleção indireta via DAP uma estratégia eficaz e operacionalmente simples.

As correlações entre características de crescimento (DAP e H) e PGR revelaram padrões distintos nos níveis fenotípicos e genotípicos. Enquanto as correlações fenotípicas foram positivas, ainda que de baixa magnitude, as correlações genotípicas apresentaram valores negativos, também de baixa magnitude. Essa discrepância pode ser interpretada a partir da compreensão de que correlações fenotípicas refletem a interação do genótipo com o ambiente, enquanto as genotípicas isolam o efeito aditivo dos genes (Li *et al.*, 2020).

A correlação fenotípica positiva, embora baixa, sugere que indivíduos com maior crescimento tendem, em termos observacionais, a apresentar PGR ligeiramente superior. Isso pode estar associado ao maior número e volume de dutos resiníferos em árvores de maior porte (Hood; Sala, 2015; Rodriguez-García *et al.*, 2014), uma vez que o crescimento favorece a formação de estruturas anatômicas relacionadas à defesa e exsudação.

Por outro lado, a correlação genotípica negativa entre crescimento (DAP e H) e PGR sugere uma possível associação genética negativa entre essas características. Essa relação já foi documentada em outros estudos com espécies do gênero *Pinus* (Vázquez-González *et al.*, 2021; Zas *et al.*, 2020), sendo interpretada como um reflexo de *trade-offs* fisiológicos. A PGR é um processo metabolicamente custoso, altamente dependente de carbono, e compete com funções como crescimento (DAP e H) e reprodução (Rissanen *et al.*, 2021; Wu; Hu, 1997). Em situações onde os recursos são limitados, plantas podem priorizar a alocação para defesa química em detrimento do crescimento estrutural, conforme previsto por modelos ecológicos de alocação (Coley; Bryant; Chapin, 1985; Herms; Mattson, 1992).

Além disso, a magnitude e direção das correlações entre crescimento (DAP e H) e PGR são altamente influenciadas por fatores ambientais e genéticos, podendo variar entre populações e condições de cultivo (Sampedro; Moreira; Zas, 2011; Vázquez-González *et al.*, 2020). Neste estudo, conduzido em ambiente tropical com baixa pressão de estresse hídrico, a manifestação desses antagonismos pode ter sido mais acentuada no componente genético, enquanto os efeitos fenotípicos positivos refletem apenas a influência do maior vigor vegetativo na capacidade de produção resinífera, sem necessariamente indicar relação hereditária direta.

Portanto, os resultados obtidos indicam que a seleção indireta para PGR com base em características de crescimento (DAP e H) pode não ser eficaz, o que reforça a necessidade do uso de índices de seleção multicaracterísticos, com pesos específicos para cada atributo (Suárez-Vidal *et al.*, 2021; Wu, 1999). Estratégias de melhoramento para PGR devem considerar a seleção direta como prioridade, a fim de evitar possíveis efeitos correlacionados indesejáveis sobre o crescimento.

A seleção direta foi a estratégia mais eficiente para maximizar os ganhos genéticos para o DAP (5,55%) e especialmente para PGR (11,14%), sendo indicada quando o objetivo é aumentar cada característica individualmente. Esse resultado é consistente com estudos que relatam baixa ou negativa correlação genética entre crescimento (DAP e H) e PGR, recomendando a seleção direta em tais casos (Tadesse *et al.*, 2002; Vázquez-González *et al.*, 2021; Zas *et al.*, 2020).

A seleção combinada mostrou-se viável para objetivos de uso múltiplo. O cenário com maior peso para DAP proporcionou ganhos equilibrados (4,95% e 4,90%, respectivamente), e o de ponderação igual resultou em ganhos intermediários (4,83% DAP; 6,01% PGR). Já a ênfase em resina elevou o ganho em resina (10,47%), mas reduziu o de DAP (cm) (0,40%), sendo pouco eficiente para fins integrados. Esses achados estão de acordo com Bhering *et al.*

(2012), que destacam o potencial de índices como o de Mulamba e Mock (1978) para seleção simultânea de características com correlação baixa ou negativa.

A composição genética das progênies foi impactada pelas estratégias de seleção adotadas. Na seleção direta, considerando 40% das progênies selecionadas, apenas 42% coincidiram entre os caracteres avaliados, refletindo a baixa correlação genética entre eles. Por outro lado, nos três cenários de seleção combinada, a coincidência aumentou para 67%, indicando maior estabilidade na seleção e reforçando a utilidade de índices ponderados em programas com múltiplos objetivos (Behering *et al.*, 2012; Niere *et al.*, 2022). O desempenho consistente das progênies P24, P30, P33 e P52, que ocuparam as primeiras posições em diferentes cenários de seleção combinada e direta, destaca sua estabilidade genética e potencial para múltiplos usos, seja em plantios comerciais ou como base para ciclos subsequentes de seleção. Em áreas destinadas à produção de goma-resina, é prática comum realizar o desbaste das progênies menos produtivas, visando concentrar os recursos naquelas com maior potencial. A manutenção dessas progênies superiores no plantio pode, ao longo do tempo, aumentar o percentual de ganho genético e, conseqüentemente, a produtividade combinada para ambos os produtos (Moraes *et al.*, 2007; Zulian *et al.*, 2024).

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos evidenciam o elevado potencial de *P. caribaea* var. *hondurensis* para o cultivo em Lavras - MG. Os altos percentuais de sobrevivência das progênies (95%) confirmam a adaptabilidade da espécie às condições edafoclimáticas locais. As estimativas de herdabilidade indicam moderada transmissibilidade genética que, atrelada à alta acurácia, indicaram variabilidade genética expressiva entre as progênies avaliadas, confirmando a viabilidade da seleção para as características de crescimento (DAP e H) e para PGR.

A alta correlação idade-idade para DAP e H reforça a possibilidade de seleção precoce para crescimento, contribuindo para o encurtamento dos ciclos de melhoramento. As correlações entre crescimento (DAP e H) e PGR foram de baixa magnitude, indicando que estratégias de seleção devem ser definidas conforme os objetivos específicos do programa.

A seleção direta mostrou-se eficaz para ganhos em DAP e PGR, enquanto a seleção combinada pode ser uma alternativa viável quando se busca atender simultaneamente múltiplos usos (produção de madeira e resina). Este estudo representa uma etapa inicial na avaliação da PGR em *P. caribaea* var. *hondurensis* em Lavras - MG, avaliações contínuas ao longo dos

próximos anos serão essenciais para fortalecer os resultados obtidos, contribuindo para a consolidação de programas de melhoramento voltados à produção de goma-resina e a outros usos da espécie na região.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, A.V.; SOUZA, V. A.; SHIMIZU, J.Y. Cultivo do pínus, Embrapa Florestas: Sistema de Produção. 2014.

BATES, D. *et al.* Fitting linear mixed-effects models using lme4. **Journal of Statistical Software**, v. 67, n. 1, p. 1–48, 2015. DOI: 10.18637/jss.v067.i01. Disponível em: <https://www.jstatsoft.org/article/view/v067i01>. Acesso em: 28 maio 2025.

BHERING, L. L. *et al.* Genetic gains in physic nut using selection indexes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 402-408, 2012.

BRAGG, D. C. A reevaluation of superior tree performance after 48 years for a loblolly pine progeny test in Southern Arkansas. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 4, p. 716443, 2021.

COLEY, P. D.; BRYANT, J. P.; CHAPIN III, F. S. Resource availability and plant antiherbivore defense. **Science**, v. 230, n. 4728, p. 895-899, 1985.

COVARRUBIAS-PAZARAN, G. Genome-assisted prediction of quantitative traits using the R package sommer. **PloS one**, v. 11, n. 6, p. e0156744, 2016.

DU, Q. *et al.* Time-specific and pleiotropic quantitative trait loci coordinately modulate stem growth in *Populus*. **Plant Biotechnology Journal**, v. 17, n. 3, p. 608-624, 2019.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos, 3 ed. Brasília: Embrapa, 2013, 353p.

HERMS, D. A.; MATTSON, W. J. The dilemma of plants: to grow or defend. **The quarterly review of biology**, v. 67, n. 3, p. 283-335, 1992.

HONG, Z.; FRIES, A.; WU, H. X. Age trend of heritability, genetic correlation, and efficiency of early selection for wood quality traits in Scots pine. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 45, n. 7, p. 817-825, 2015.

HOOD, S.; SALA, A. Ponderosa pine resin defenses and growth: metrics matter. **Tree Physiology**, v. 35, n. 11, p. 1223-1235, 2015.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório anual 2024 do setor florestal brasileiro de árvores plantadas**, São Paulo, 2024. Disponível em: <<chrome-extension://efaidnbmninnibpcjpcglclefindmkaj/https://iba.org/relatorio2024.pdf>> Acesso em: 13 de abril de 2025.

INMET- Instituto Nacional de Meteorologia (2024). **Boletins agroclimatológicos, Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento**, 2024. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/boletinsagro>. Acesso em: 04 de março de 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção da extração vegetal e da silvicultura: 2023**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/16/0> . Acesso em: 02 de abril de 2025.

ISHIBASHI, V. *et al.* Estratégias de seleção genética para silvicultura clonal em *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Scientia Forestalis**, v. 50, p. e3858, 2022. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v50.30>

KELLEHER, C.T. *et al.* SNP discovery, gene diversity, and linkage disequilibrium in wild populations of *Populus tremuloides*. **Tree Genetics & Genomes**, v. 8, p. 821-829, 2012.

LAI, M. *et al.* Inheritance of resin yield and main resin components in *Pinus elliottii* Engelm. at three locations in southern China. **Industrial crops and products**, v. 144, p. 112065, 2020.

LAZAROTTO, S., CANDATEN, L., BALBINOT, R. Brazilian Resin Method: Handmade, Sustainable and Profitable. In: Forest Science: Sustainable Processes and Wood Products. Singapore: **Springer Nature Singapore**, p. 183-205, 2023.

LI, Y. *et al.* Inheritance and correlation analysis of pulpwood properties, wood density, and growth traits of slash pine. **Forests**, v. 11, n. 5, p. 493, 2020.

MARTINEZ, D.T. *et al.* Estudo da interação genótipo x ambiente em progênies de *Pinus taeda* por meio da análise de parâmetros genéticos. **Floresta**, v. 42, n. 3, p. 539-552, 2012.

MARTINS, K. *et al.* Genetic variation and effective population size of a *Myracrodruon urundeuva* (Engler) Fr. Allem. provenance and progeny test. **Journal of Forest Research**, v. 23, n. 4, p. 228-236, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/13416979.2018.1483130>

MIRANDA, A. C. *et al.* Investigating the origin and genetic diversity of improved *Eucalyptus grandis* populations in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 448, p. 130-138, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.071>

MORAES, *et al.* Efeito do desbaste seletivo nas estimativas de parâmetros genéticos em progênies de *Pinus caribaea* Morelet var. *hondurensis*. **Scientia Forestalis**, n. 74, p. 55-65, 2007

MOREIRA, J. P. *et al.* Expected gain in selection of *Pinus elliottii* var. *elliottii* for timber production at an early age. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, p. 99-109, 2014.

MULAMBA, N. N.; MOCK, J. J. Improvement of yield potential of the Eto Blanco maize (*Zea mays* L.) population by breeding for plant traits. **Egyptian journal of genetics and cytology**, v.7, p. 40-51, 1978.

MUNHOZ, L.V. *et al.* Predicted genetic gains for growth traits and Genotype x Environment interaction in *Pinus greggii*: new perspectives for genetic improvement in Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, p. e20201486, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765202120201486>.

NIERI, É. M. *et al.* Selection of *Pinus* spp, progenies in Lavras (Minas Gerais, Brazil) at 36 months of age. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 52, 2022.

R CORE TEAM, *R: a language and environment for statistical computing*, Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 28 maio 2025.

RESENDE, M, D.V. Genética biométrica e estatística no melhoramento de plantas perenes, Editora: Embrapa Informações Tecnológica, Brasília/DF, p. 975, 2002.

RESENDE, M. D. V.; DUARTE, J. B. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 37, n. 3, p. 182-194, 2007.

RESENDE M.D.V.; ALVES, R.S. Statistical significance, selection accuracy, and experimental precision in plant breeding. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 22, n.3, p. e42712238, 2022. <http://dx.doi.org/10.1590/1984-70332022v22n3a31>

RISSANEN, K. *et al.* Drought effects on carbon allocation to resin defences and on resin dynamics in old-grown Scots pine. **Environmental and Experimental Botany**, v. 185, p. 104410, 2021. DOI: [10.1016/j.envexpbot.2021.104410](https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104410)

RODRÍGUEZ-GARCÍA, A. *et al.* Resin yield in *Pinus pinaster* is related to tree dendrometry, stand density and tapping-induced systemic changes in xylem anatomy. **Forest Ecology and Management**, v. 313, p. 47-54, 2014.

RWEYONGEZA, D. M. A new approach to prediction of the age-age correlation for use in tree breeding. **Annals of Forest Science**, v. 73, p. 1099-1111, 2016.

SAMPEDRO, L.; MOREIRA, X.; ZAS, R. Costs of constitutive and herbivore-induced chemical defences in pine trees emerge only under low nutrient availability. **Journal of Ecology**, v. 99, n. 3, p. 818-827, 2011.

SANTOS, M. P.; ARAUJO, M.J.; SILVA, P. H. M. Natural establishment of *Pinus* spp. around seed production areas and orchards. **Forest Ecology and Management**, v. 494, p. 119333, 2021.

SCHIMLECK, L. R. *et al.* Comparison of methods for estimating mechanical properties of wood by NIR spectroscopy. **Journal of Spectroscopy**, v. 2018, n. 1, p. 4823285, 2018.

SOUZA, B. M. *et al.* Effects of previous land use on genotype-by-environment interactions in two loblolly pine progeny tests. **Forest Ecology and Management**, v. 503, p. 119762, 2022.

SOUZA, T. S. *et al.* Variação genética em caracteres quantitativos em *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Scientia Forestalis**, v.45. n. 113, p. 177-185, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v45n113.18>.

SUÁREZ-VIDAL, E. *et al.* Direct and correlated responses to artificial selection for growth and water-use efficiency in a Mediterranean pine. **American journal of botany**, v. 108, n. 1, p. 102-112, 2021. DOI: [10.1002/AJB2.1599](https://doi.org/10.1002/AJB2.1599).

TADESSE, W. *et al.* Evaluación precoz de la producción de miera en *Pinus pinaster* Ait. **Investigación Agraria: Sistema y Recursos Forestales**, v. 10, n. 1, p. 141-150, 2001. DOI: [10,5424/717](https://doi.org/10.5424/717)

TAMBARUSSI, E.V. *et al.* Estimative of genetic parameters in progeny test of *Pinus caribaea* Morelet var. *hondurensis* Barret & Golfari by quantitative traits and microsatellite markers. **Bragantia**, v. 69, p. 39-47, 2010.

VALENZUELA, C. E. *et al.* Bayesian mapping reveals large-effect pleiotropic QTLs for wood density and slenderness index in 17-year-old trees of *Eucalyptus cladocalyx*. **Forests**, v. 10, n. 3, p. 241, 2019.

VÁZQUEZ-GONZÁLEZ, C. *et al.* Climate drives intraspecific differentiation in the expression of growth-defence trade-offs in a long-lived pine species. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 10584, 2020.

VÁZQUEZ-GONZÁLEZ, C. *et al.* Genetic variation in resin yield and covariation with tree growth in maritime pine. **Forest Ecology and Management**, v. 482, p. 118843, 2021. DOI: [10,1016/j.foreco,2020,118843](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118843).

WICKHAM, H.; BRYAN, J. *readxl: Read Excel Files*. R package version 1.4.0, 2023. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=readxl>. Acesso em: 28 maio 2025.

WU, H.; HU, Z. Comparative anatomy of resin ducts of the Pinaceae. **Trees**, v. 11, p. 135-143, 1997. DOI: [10,1007/s004680050069](https://doi.org/10.1007/s004680050069)

WU, H. X. Study of early selection in tree breeding. 2. Advantage of early selection through shortening the breeding cycle. **Silvae Genet**, V. 48, n. 2, p. 79–83, 1999.

ZANELLA, L. B. *et al.* Initiation of somatic embryogenesis in *Pinus caribaea* var. *hondurensis* using mature female gametophytes as explants. **South African Journal of Botany**, v.149, p.124-133, 2022.

ZAS, R. *et al.* Variation in resin flow among Maritime pine populations: Relationship with growth potential and climatic responses. **Forest Ecology and Management**, v. 474, p. 118351, 2020. DOI: [10,1016/j.foreco,2020,118351](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118351).

ZULIAN, D. F. *et al.* Selection methods to optimize the gain and genetic diversity in *Pinus caribaea* var. *caribaea*. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 24, n. 3, p. e47742436, 2024.

APÊNDICE

Tabela 1 – Análise da deviance (ANADEV) para H (m), DAP (cm), PGR (kg árvore⁻¹) e sobrevivência em progênies de *P. caribaea* var. *hondurensis* em Lavras – MG.

(Continua)

H (m)	2 anos		3 anos		4 anos		5 anos	
	DEV	LRT	DEV	LRT	DEV	LRT	DEV	LRT
Modelo completo	275,30		1294,74		1886,75		1738,40	
(-) genótipos	289,53	14,23*	1306,75	12,01*	1900,94	14,19*	1765,54	27,14*
DAP (cm)	DEV	LRT	DEV	LRT	DEV	LRT	DEV	LRT
Modelo completo			2335,32		2842,32		3045,72	
(-) genótipos			2352,62	17,30*	2864,48	22,16*	3086,26	40,54*
DAP (cm)	6 anos		7 anos		8 anos		9 anos	
	DEV	LRT	DEV	LRT	DEV	LRT	DEV	LRT
Modelo completo	3421,95		3524,00		3694,93		3826,68	
(-) genótipos	3455,39	33,44*	3566,47	42,47*	3733,09	38,16*	3870,80	44,12*
PGR (kg árvore ⁻¹)	DEV	LRT	DEV	LRT	DEV	LRT	DEV	LRT
Modelo completo							-236,27	
(-) genótipos							-203,12	33,15*

Tabela 1 – Análise da deviance (ANADEV) para H (m), DAP (cm), PGR (kg árvore⁻¹) e sobrevivência em progênies de *P. caribaea* var. *hondurensis* em Lavras – MG.

(Conclusão)

SOBREVIVÊNCIA	6 anos		7 anos		8 anos		9 anos	
	DEV	LRT	DEV	LRT	DEV	LRT	DEV	LRT
Modelo completo							-1778,34	
(-) genótipos							-1777,41	0,93 ^{ns}

DEV – *Deviance*, LRT - Teste da razão da verossimilhança, com distribuição com 1 grau de liberdade; * significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de qui-quadrado; ^{ns} não significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de qui-quadrado; (-) modelo sem o referido efeito.

Fonte: Da autora (2025).

Tabela 2 – Valores genéticos preditos (BLUPs), erros padrão da predição (SEP), variância do erro de predição (PEV) e estimativas de acurácia (AC) para DAP (cm) e PGR (kg árvore⁻¹) em progênies de *P.caribaea* var. *hondurensis* aos nove anos de idade, em Lavras – MG.

(Continua)

Ordem	DAP (cm) - 9 anos					PGR (kg árvore ⁻¹) - 9 anos				
	Progênie	Ganho genético	SEP	PEV	AC	Progênie	Ganho genético	SEP	PEV	AC
1	P22	2,06	0,91	0,83	0,94	P30	0,26	0,07	0,00	0,94
2	P57	1,80	0,91	0,83	0,94	P52	0,22	0,08	0,01	0,93
3	P24	1,77	0,84	0,70	0,95	P26	0,15	0,08	0,01	0,93
4	P33	1,69	0,91	0,83	0,94	P54	0,12	0,08	0,01	0,93
5	P25	1,65	1,11	1,22	0,92	P21	0,11	0,10	0,01	0,88
6	P52	1,57	0,93	0,86	0,94	P33	0,09	0,08	0,01	0,93
7	P30	1,10	0,83	0,69	0,95	P28	0,09	0,07	0,01	0,93
8	P55	1,07	0,77	0,60	0,96	P46	0,09	0,08	0,01	0,93
9	P34	0,92	0,91	0,83	0,94	P41	0,09	0,08	0,01	0,92
10	P43	0,91	0,91	0,83	0,94	P24	0,07	0,07	0,00	0,94
11	P63	0,85	0,90	0,81	0,94	P43	0,06	0,08	0,01	0,93
12	P44	0,85	0,94	0,88	0,94	P68	0,05	0,08	0,01	0,92
13	P20	0,83	1,05	1,09	0,92	P40	0,03	0,08	0,01	0,92
14	P40	0,72	0,91	0,83	0,94	P57	0,03	0,08	0,01	0,93
15	P61	0,36	0,91	0,83	0,94	P19	-0,01	0,08	0,01	0,93
16	P59	0,19	0,90	0,81	0,94	P34	-0,02	0,07	0,01	0,93
17	P54	0,14	0,90	0,81	0,94	P49	-0,02	0,12	0,01	0,82
18	P26	-0,19	0,89	0,79	0,95	P58	-0,02	0,08	0,01	0,93
19	P68	-0,19	0,94	0,88	0,94	P59	-0,04	0,08	0,01	0,93
20	P50	-0,40	0,90	0,81	0,94	P39	-0,05	0,10	0,01	0,88
21	P35	-0,47	0,91	0,83	0,94	P20	-0,06	0,08	0,01	0,91

Tabela 2 – Valores genéticos preditos (BLUPs), erros padrão da predição (SEP), variância do erro de predição (PEV) e estimativas de acurácia (AC) para DAP (cm) e PGR (kg árvore⁻¹) em progênies de *P.caribaea* var. *hondurensis* aos nove anos de idade, em Lavras – MG.

(Conclusão)

Ordem	DAP (cm) - 9 anos					PGR (kg árvore ⁻¹) - 9 anos				
	Progênie	Ganho genético	SEP	PEV	AC	Progênie	Ganho genético	SEP	PEV	AC
21	P35	-0,47	0,91	0,83	0,94	P20	-0,06	0,08	0,01	0,91
22	P49	-0,48	1,57	2,47	0,83	P63	-0,06	0,07	0,01	0,93
23	P58	-0,84	0,93	0,86	0,94	P50	-0,08	0,08	0,01	0,93
24	P18	-0,86	0,93	0,86	0,94	P44	-0,09	0,08	0,01	0,93
25	P46	-0,98	0,91	0,83	0,94	P25	-0,10	0,09	0,01	0,89
26	P39	-1,04	1,23	1,52	0,90	P55	-0,11	0,06	0,00	0,95
27	P19	-1,08	0,93	0,86	0,94	P37	-0,13	0,08	0,01	0,92
28	P28	-1,23	0,90	0,81	0,94	P35	-0,15	0,08	0,01	0,93
29	P37	-2,26	0,95	0,90	0,94	P18	-0,15	0,08	0,01	0,93
30	P41	-2,34	0,90	0,81	0,94	P22	-0,16	0,08	0,01	0,93
31	P21	-6,14	0,97	0,93	0,94	P61	-0,20	0,07	0,01	0,93
	<i>m</i>		0,95	0,92	0,94	<i>M</i>		0,08	0,01	0,92

O ganho genético representa o desempenho genético estimado de cada progênie para a característica avaliada, sendo utilizado para fins de seleção. A confiabilidade reflete a precisão da predição genética. A linha *m* refere-se aos valores médios dos parâmetros apresentados.

Fonte: Da autora (2025).

Tabela 3 – Ganhos genéticos preditos para o DAP (cm) e a PGR (kg árvore⁻¹) sob diferentes cenários de seleção combinada em progênie de *P. caribaea* var. *hondurensis* aos nove anos, em Lavras – MG.

		Cenários de seleção combinada											
0,7 - DAP > 0,3 - PGR	Progênie	P33	P52	P24	P30	P57	P22	P43	P25	P34	P54	P55	P26
	Ganho DAP	1,69	1,57	1,77	1,10	1,80	2,06	0,91	1,65	0,92	0,14	1,07	-0,19
	Ganho PGR	0,09	0,22	0,07	0,26	0,03	-0,16	0,06	-0,10	-0,02	0,12	-0,11	0,15
	IMM - DAP	4,6	4,8	5,1	5,2	5,6	9,7	10,3	11	11,1	13,1	13,4	13,5
	Ganho absoluto DAP												1,21
Ganho absoluto PGR												0,52	
0,3 - DAP < 0,7 - PGR	Progênie	P30	P52	P33	P26	P54	P24	P57	P43	P21	P46	P28	P40
	Ganho DAP	1,10	1,57	1,69	-0,19	0,14	1,77	1,80	0,91	-6,14	-0,98	-1,23	0,72
	Ganho PGR	0,26	0,22	0,09	0,15	0,12	0,07	0,03	0,06	0,11	0,09	0,09	0,03
	IMM - PGR	2,80	3,20	5,40	7,50	7,90	7,90	10,40	10,70	12,80	13,10	13,30	13,30
	Ganho absoluto DAP												0,98
Ganho absoluto PGR												0,11	
0,5 - DAP: 0,5 - PGR	Progênie	P30	P52	P33	P24	P57	P26	P43	P54	P34	P40	P25	P22
	Ganho DAP	1,10	1,57	1,69	1,77	1,80	-0,19	0,91	0,14	0,92	0,72	1,65	2,06
	Ganho PGR	0,26	0,22	0,09	0,07	0,03	0,15	0,06	0,12	-0,02	0,03	-0,10	-0,16
	IMM - DAP: PGR	4,00	4,00	5,00	6,50	8,00	10,50	10,50	10,50	12,50	13,50	15,00	15,50
	Ganho absoluto DAP												1,18
Ganho absoluto PGR												0,63	

Os cenários consideram diferentes pesos atribuídos ao DAP (cm) e à PGR (kg árvore⁻¹): (i) 0,7 para DAP (cm) e 0,3 para PGR (kg árvore⁻¹); (ii) 0,3 para DAP (cm) e 0,7 para PGR (kg árvore⁻¹); e (iii) pesos iguais de 0,5 para ambas as características. A seleção foi realizada com base no índice proposto por Mulamba e Mock (1978), que classifica as progênie utilizando a soma das posições relativas das características, ponderadas conforme as proporções especificadas. A variável IMM representa essa soma ponderada das classificações para cada progênie. Os ganhos absolutos referem-se à diferença entre a média dos ganhos das doze progênie selecionadas (40% das progênie com maior ganho) e a média geral das progênie para cada característica.

Fonte: Da autora (2025).

TERCEIRA PARTE

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam o elevado potencial genético tanto de *P. elliottii* var. *elliottii* quanto de *P. caribaea* var. *hondurensis* para o cultivo em nova região do estado de Minas Gerais. As estimativas expressivas de variabilidade genética, herdabilidade e acurácia nas características de crescimento (DAP e H) e PGR confirmam a viabilidade da seleção e melhoramento genético dessas espécies na região.

A correlação moderadamente alta entre DAP e NCR sugere que o crescimento pode contribuir indiretamente para o aumento da capacidade produtiva, ao passo que a baixa correlação entre essas variáveis e a PGR reforça o caráter multifatorial desta característica, influenciada por fatores genéticos, anatômicos, fisiológicos e ambientais.

A forte correlação observada entre as idades para DAP e H sustenta a possibilidade de seleção precoce para crescimento, o que pode contribuir significativamente para o encurtamento dos ciclos de melhoramento. Por outro lado, a baixa correlação entre crescimento (DAP e H) e PGR reforça a necessidade de estratégias específicas e, possivelmente, independentes para otimizar ganhos genéticos em cada traço. Enquanto a seleção direta mostrou-se eficaz para melhorias individuais em crescimento (DAP) e PGR, a seleção combinada revelou-se uma alternativa promissora para programas que busquem ganhos simultâneos e balanceados em múltiplos objetivos econômicos.

Considerando o caráter preliminar da pesquisa, recomenda-se o monitoramento e a avaliação contínua ao longo de ciclos subsequentes, visando consolidar estratégias de melhoramento sustentáveis que promovam a produtividade, a qualidade e a viabilidade econômica do cultivo dessas espécies no estado de Minas Gerais, no sudeste brasileiro.