

**“UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

ARNALDO PATRÍCIO PINHONI SILVA

**VARIABILIDADE GENÉTICA EM PROGÊNIES DE *Pinus caribaea* Morelet var.
bahamensis PARA CARACTERES DE CRESCIMENTO**

Ilha Solteira

2024

ARNALDO PATRÍCIO PINHONI SILVA

**VARIABILIDADE GENÉTICA EM PROGÊNIES DE *Pinus caribaea* Morelet var.
bahamensis PARA CARACTERES DE CRESCIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP
como parte dos requisitos para obtenção do título
de Engenheiro Agrônomo.

Prof. Dr. Mario Luiz Teixeira de Moraes
Orientador

Profa. M.Sc. Francieli Alves Caldeira Saul
Coorientadora

Ilha Solteira

2024

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S586v Silva, Arnaldo Patricio Pinhoni.
Variabilidade genética em progênies de *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis* para caracteres de crescimento / Arnaldo Patricio Pinhoni Silva. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
36 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2024

Orientador: Mario Luiz Teixeira de Moraes
Coorientador: Francieli Alves Caldeira Saul Inclui
bibliografia

1. Melhoramento florestal. 2. Parâmetros genéticos. 3. Pinheiros tropicais.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente ao meu orientador Prof. Dr. Mario Luiz Teixeira de Moraes, pela confiança e por ser fundamental na minha formação universitária.

A todos os funcionários e técnicos da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da UNESP de Ilha Solteira, pelo auxílio nas pesquisas. Sem vocês, este trabalho não seria possível. Um agradecimento especial para José Cambuim e Alonso Ângelo da Silva, que sempre estiveram presentes nas coletas e deram o suporte necessário para meu aprendizado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Instituto de Pesquisas Ambientais (IPA) pelo apoio financeiro, por meio do Processo nº 127043/2021-7 e pela bolsa de Iniciação Científica PIBIC-CNPq, sob a orientação do Dr. Miguel Luiz Menezes Freitas a quem muito admiro e pela sua valiosa participação na minha formação técnica.

Ao Laboratório de Genética de Populações e Silvicultura - LGPS e toda a sua equipe, um agradecimento em especial para professora Selma Maria Bozzite de Moraes, Daniele Fernanda Zulian, José Carlos de Oliveira Júnior, Darlin Gonzalez Zaruma, Francieli Alves Caldeira Saul, Juliana Correa, Keller Lima, Lara Comar e Marília Gabriela Pereira por compartilharem o conhecimento e por me auxiliarem nas pesquisas. A Mariana Aparecida de Moraes pelo apoio nas estimativas do R^2 das equações de volume, utilizando o Matlab.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão à banca examinadora do meu Trabalho de Conclusão de Curso pela dedicação, atenção e contribuições valiosas ao longo do processo de revisão do meu trabalho.

RESUMO

O setor florestal desempenha um papel crucial na economia e na sustentabilidade ambiental, fornecendo não apenas madeira, mas também produtos não-madeireiros e serviços ecossistêmicos. A exploração eficiente e sustentável desses recursos é impulsionada por avanços em ciências como a genética florestal, que busca otimizar características desejáveis em árvores. Nesse contexto, o melhoramento genético de espécies como o *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis* é de grande relevância. O objetivo da pesquisa foi estimar a variabilidade genética para caracteres de crescimento em um teste de progênies de *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis*, estabelecido em Selvíria-MS, em 1990. O teste foi instalado com sementes de polinização aberta provenientes de árvores matrizes do Centro de Conservação Genética e Melhoramento de Pinheiros Tropicais (CCGMPT), oriundas Aracruz – ES. O delineamento experimental utilizado é o de látice quadrado 11 x 11, sêxtuplo, parcialmente balanceado, tendo 119 progênies (tratamentos) e duas testemunhas comerciais. O ensaio foi mensurado aos 31 anos de idade para diâmetro a altura do peito (DAP, cm), Altura (ALT, m) sobrevivência (SOB, %), volume (VOL, m³), velocidade de onda acústica (VAS, m.s⁻¹) através do *FAKOPP Tree Sonic* e módulo de elasticidade (MOEd-MPa). As estimativas de componentes de variância e parâmetros genéticos foram obtidos pelo método REML/BLUP. O resultado para sobrevivência foi de 57,35 % indicando uma alta mortalidade no ensaio. Os valores médios para os caracteres de crescimento, DAP, altura, volume, velocidade de onda acústica e módulo de elasticidade foram 30,54 cm, 29,34 m, 1,45 m³. árvore⁻¹, 4754,03 m.s⁻¹ e 2,41 MPa, respectivamente. Houve diferença significativa entre as progênies e parcela para DAP e VOL, a um grau de liberdade (p<0,01) pelo teste LRT, indicando que existe diferença entre os tratamentos. A partir do valor aditivo individual, foi estimado o ganho genético para a seleção dentro de progênies onde o ganho genético, para o DAP foi (0,75 %) adotando uma intensidade de seleção de 85,5%.

Palavras-chave: Melhoramento florestal, Parâmetros genéticos, Pinheiros tropicais.

ABSTRACT

The forestry sector plays a crucial role in the economy and environmental sustainability, providing not only timber but also non-timber products and ecosystem services. The efficient and sustainable exploitation of these resources is driven by advances in sciences such as forest genetics, which seeks to optimize desirable traits in trees. In this context, the genetic improvement of species such as *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis* is of great relevance. The objective of the research was to estimate the genetic variability for growth traits in a progeny test of *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis*, established in Selvíria-MS, in 1990. The test was installed with open-pollinated seeds from parent trees from the Center for Genetic Conservation and Improvement of Tropical Pines (CCGMPT), originating from Aracruz – ES. The experimental design used is an 11 x 11 quadruple lattice, sextuple, partially balanced, with 119 progenies (treatments) and two commercial controls. The trial was measured at 31 years of age for diameter at breast height (DBH, cm), height (HT, m), survival (SUR, %), volume (VOL, m³), acoustic wave speed (AWS, m.s⁻¹) using the FAKOPP Tree Sonic, and modulus of elasticity (MOE, MPa). Estimates of variance components and genetic parameters were obtained using the REML/BLUP method. The result for survival was 57.35%, indicating high mortality in the trial. The average values for the growth traits, DBH, height, volume, acoustic wave speed, and modulus of elasticity were 30.54 cm, 29.34 m, 1.45 m³ per tree, 4754.03 m.s⁻¹, and 2.41 MPa, respectively. There was a significant difference between progenies and plot for DBH and VOL, at a degree of freedom ($p < 0.01$) by the LRT test, indicating that there is a difference between the treatments. From the individual additive value, the genetic gain for selection within progenies was estimated, where the genetic gain for DBH was (0.75%) adopting a selection intensity of 85.5%.

Keywords: Tropical pine trees; genetic parameters; Tree breeding.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Áreas de árvores plantadas em 2021 (milhões de hectares).	9
Figura 2. Pomar de Sementes Por Mudadas de <i>Pinus caribaea</i> Morelet var. <i>bahamensis</i> , Selvíria – MS aos 31 anos de idade.	10
Figura 3 . Distribuição da espécie <i>Pinus caribaea</i> Morelet var. <i>bahamensis</i> nas Ilhas Bahamas.	12
Figura 4. Distribuição da espécie <i>Pinus caribaea</i> Morelet var. <i>bahamensis</i> no Brasil.	13
Figura 5. Vista aérea do local de instalação do teste de progênies de <i>Pinus caribaea</i> Morelet var. <i>bahamensis</i> localizados em Selvíria-MS. 20° 20'30"S 51° 23'59"W. Data de acesso: 25/02/2022.....	18
Figura 6. Utilização do <i>Treesonic</i> para a coleta de dados da velocidade de onda acústica em um teste de progênies de <i>Pinus caribaea</i> Morelet var. <i>bahamensis</i> , aos 31 anos, em Selvíria, MS.....	20
Figura 7. <i>Hipsômetro vertex</i> utilizado nas estimativas de altura em um teste de progênies de <i>Pinus caribaea</i> Morelet var. <i>bahamensis</i> , aos 31 anos, em Selvíria, MS.	22
Figura 8. Média anual de temperatura média e precipitação na cidade de Selvíria-MS, no período de 1992 a 2022.	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Equações de Estimativa de Volume.....	27
Tabela 2. Desempenho para dos caracteres: DAP (diâmetro a altura do peito), VAS (Velocidade acústica do som), ALT (altura total), MOEd (Módulo de elasticidade) e VOL (volume por árvore) em um teste de progênies de <i>Pinus caribaea</i> Morelet var. <i>bahamensis</i> , aos 31 anos, em Selvíria-MS.	28
Tabela 3. Estimativa de parâmetros genéticos para os caracteres: DAP (diâmetro a altura do peito), VAS (velocidade de onda acústica), ALT (altura total), MOEd (módulo de elasticidade da madeira) e VOL (volume por árvore) em um teste de progênies de <i>Pinus caribaea</i> Morelet var. <i>bahamensis</i> , aos 31 anos, em Selvíria-MS.	30

SUMÁRIO

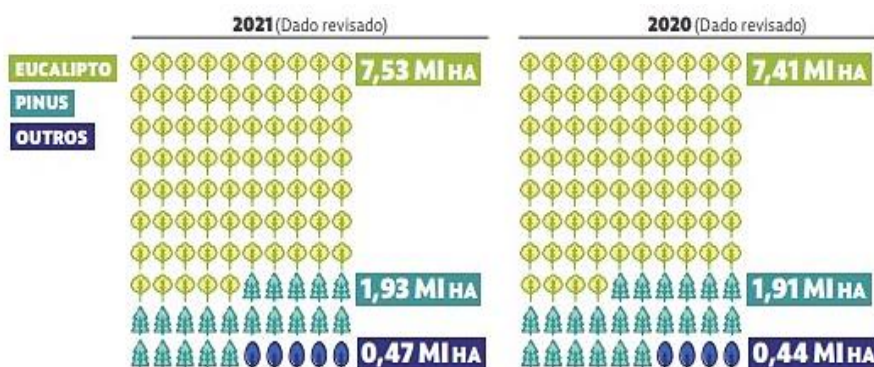
1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVO	11
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	12
3.1	Descrição da espécie <i>Pinus caribaea</i> Morelet var. <i>bahamensis</i>	12
3.2	Melhoramento genético de <i>Pinus</i>	14
3.3	Pomar de Sementes por Mudanças no melhoramento Genético de <i>Pinus</i>	15
3.4	Caracterização da Qualidade da Madeira Através de Métodos de Amostragem Não Destrutiva.	16
3.5	Parâmetros Genéticos	16
4	MATERIAL E MÉTODOS	18
4.1	Material	18
4.2	Métodos.....	19
4.2.1	Instalação e caracteres avaliados	19
4.2.2	Delineamento estatístico e estimativa de parâmetros genéticos.	22
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5.1	Sobrevivência.....	26
5.2	Escolha da equação de volume.....	27
5.3	Análise de deviance e parâmetros genéticos.....	27
5.4	Ganho de seleção pela estratégia dentro de progênies	30
6.	CONCLUSÕES	32
	REFERÊNCIAS	33
	APÊNDICE 1. CROQUI DE CAMPO.....	37
	APÊNDICE 2. Estimativas das variâncias: genética aditiva ($\hat{\sigma}_a^2$), ambiental entre parcelas ($\hat{\sigma}_c^2$), residual (ambiental + não aditiva) ($\hat{\sigma}_e^2$) e fenotípica individual ($\hat{\sigma}_f^2$) em um teste de progênies de <i>Pinus caribaea</i> var. <i>bahamensis</i> , aos 31 anos em Selvíria-MS.	39

1 INTRODUÇÃO

As espécies de *Pinus*, economicamente importantes para o Brasil, são nativas principalmente da América do Norte e América Central, sendo introduzidas no Brasil por volta de 1936 (FIER e KIKUTI, 1993). Desde então, elas têm desempenhado um papel significativo na silvicultura brasileira, contribuindo notavelmente para a economia e os esforços de conservação ambiental.

No ano de 2019, as florestas plantadas no Brasil abrangiam 9 milhões de hectares, representando um crescimento de 2,4% em comparação ao ano anterior. Dentre estas, os *pinus* ocupavam 18% da área total, equivalentes a 1,64 milhão de hectares. A expansão observada nos plantios de *pinus* foi de 31,3 metros cúbicos por hectare, impulsionada por avanços em programas de melhoramento genético e aprimoramento das técnicas de manejo e fertilidade do solo, incluindo cuidados nutricionais mais eficazes em viveiros e a introdução de mecanização em processos anteriormente semimecanizados. (IBÁ, 2022).

Figura 1. Áreas de árvores plantadas em 2021 (milhões de hectares).



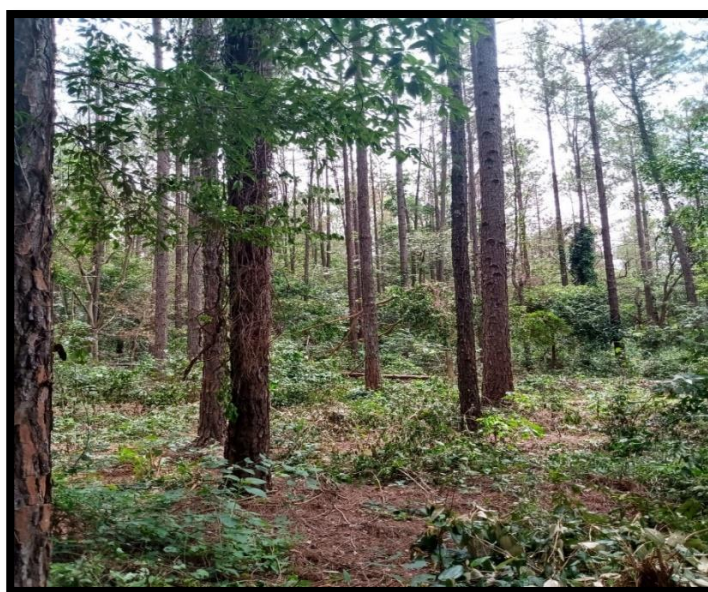
Fonte: Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ (2022).

No que se refere aos produtos florestais não madeireiros procedentes dos *Pinus*, destaca-se a resina de onde se obtém o bréu e a terebintina, sendo que o Brasil ocupa o segundo lugar na produção mundial de resina (IBÁ, 2023). Isso se deve ao investimento na seleção de progênies mais produtivas. A espécie que produz mais resina é o *Pinus elliottii* var. *elliottii*, que entra na categoria dos *Pinus* temperados aqui no Brasil. No que se refere às espécies tropicais, destacam-se *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis* e *P. caribaea* var. *hondurensis*. (MENDES, 2021).

O melhoramento florestal no Brasil apresentou maiores desenvolvimentos a partir de 1967, devido à implantação da lei dos incentivos fiscais ao reflorestamento (FERREIRA, 1983). Com convênios estabelecidos entre empresas florestais e universidades, surgiram várias cooperativas renomadas na pesquisa florestal, dentre elas pode-se citar o IPEF (Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – associado à Universidade de São Paulo/ESALQ), SIF (Sociedade de Investigações Florestais – associado à Universidade Federal de Viçosa/UFV) e FUPEF (Fundação de Pesquisa e Estudos Florestais – associado à Universidade Federal do Paraná/UFPR). Em 1977, a EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), juntamente com o governo federal, lançou o PNPF (Programa Nacional de Pesquisa Florestal), que na atualidade é conhecido como Centro Nacional de Pesquisas de Florestas (CNPQ).

As estratégias de melhoramento, que consistem basicamente nos testes de procedências e progênies, visam à escolha de origens mais adequadas das sementes para estabelecimento, tanto de plantios comerciais como população base adequada para continuidade do programa de melhoramento genético das espécies (MISSIO et al., 2004). O teste de progênies de polinização livre é o mais utilizado em espécies florestais, devido ao baixo custo de instalação e à facilidade de produzir sementes em relação aos testes de progênies que exigem polinização controlada, pois também permite obter estimativas, tanto da capacidade geral de combinação como de parâmetros genéticos (SHIMIZU et al., 1982).

Figura 2. Pomar de Sementes Por Mudas de *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis*, Selvíria – MS aos 31 anos de idade.



Fonte: Próprio autor.

2 OBJETIVO

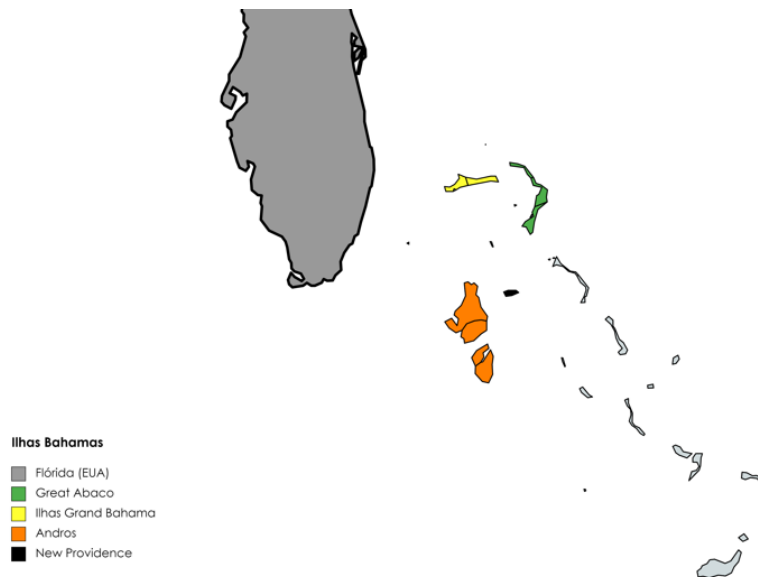
O objetivo deste trabalho foi avaliar a variação genética para os caracteres relacionados ao crescimento (altura, diâmetro a altura do peito, volume e módulo de elasticidade da madeira) e adaptativos (sobrevivência) em um teste de progênies de *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis*, determinar o potencial de ganho genético através da seleção dentro de progênies, e investigar o impacto das condições climáticas, incluindo regime hídrico e térmico, na sobrevivência e crescimento das progênies.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Descrição da espécie *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis*

Nativa da América Central, o *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis* pertence à família Pinaceae e tem sua origem em duas áreas localizadas nas Ilhas Bahamas, entre as latitudes 21°50'N e 27°00'N. A primeira inclui as Ilhas Grand Bahama, Great Ábaco, Andros e New Providence, enquanto a segunda área abrange as Ilhas Caicos (AGUDELO, 1990).

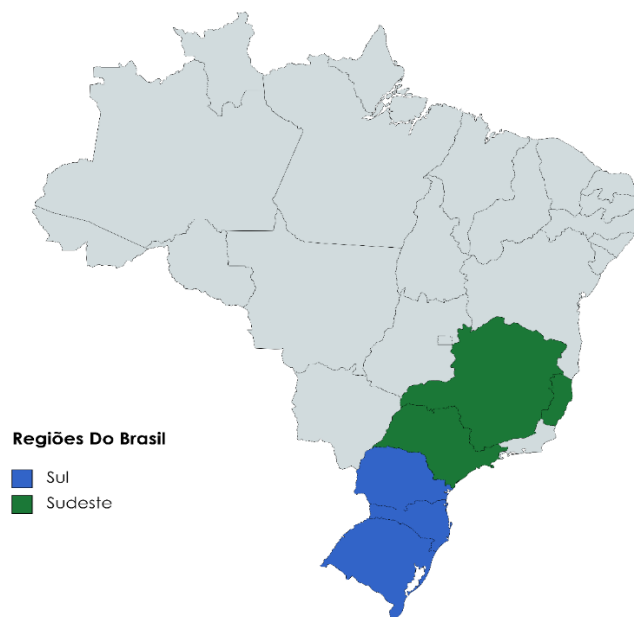
Figura 3 . Distribuição da espécie *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis* nas Ilhas Bahamas.



Fonte: (AGUDELO, 1990)

No Brasil, a espécie encontra-se distribuída principalmente nas regiões Sudeste e Sul, sendo cultivada em áreas de reflorestamento, com destaque para os estados do Espírito Santo, Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. A introdução dessa espécie no Brasil ocorreu no início do século XX, visando a diversificação das espécies de *pinus* no país, e atender à demanda crescente por madeira e resina (SILVA et al., 2020).

Figura 4. Distribuição da espécie *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis* no Brasil.



Fonte: (SILVA et al., 2020).

Esta espécie pode ser encontrada em altitudes que variam do nível do mar até 30 metros. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Am, tropical subúmido, com precipitação anual de 750 a 1300 mm. Os solos da região são alcalinos, com pH entre 7,5 e 8,5 (GURGEL GARRIDO et al., 1996).

O *P. caribaea* é uma espécie monoica (flores masculinas e femininas na mesma árvore), com polinização por anemofilia e predominância de fecundação cruzada. Seus estróbilos masculinos medem aproximadamente 2,5 cm de comprimento, possuem coloração roxa e são estreitos e cilíndricos. Os cones femininos podem ser encontrados nos ramos superiores da copa, agrupados de 3 a 5. Quando polinizados, os cones apresentam aproximadamente 1,3 cm de comprimento, 1,9 cm ao final do segundo ano e de 5 a 12 cm quando maduros (PLUMPTRE, 1984).

A variedade *bahamensis* é uma das mais importantes na produção de madeira e resina na região sudeste, demonstrando adaptabilidade mesmo em áreas de solo ácido e podendo suportar geadas em regiões subtropicais, apresentando um crescimento satisfatório. Sua madeira, por ser mais densa, possui melhor qualidade física e mecânica do que a variedade *hondurensis*. Contudo, a limitada produção de sementes é um dos elementos que dificultam a popularização desta variedade em cultivos comerciais. (AGUIAR et al., 2014).

3.2 Melhoramento genético de *Pinus*

O gênero *Pinus* apresenta amplo material genético apresentando espécies e variedades que se comportam de maneira distinta de acordo com as condições edafoclimáticas de cada região em que são estabelecidas. Esta distinção dentro do gênero, leva as interações genótipo-ambiente substanciais, as quais, irão influenciar no sucesso de um empreendimento florestal. (SEBBENN et al. 2008).

No Brasil, o melhoramento genético do *Pinus* foi implementado por empresas florestais, principalmente indústrias de celulose e papel, instituições públicas federais e estaduais, como a Embrapa, IBAMA, IFSP e as universidades UNESP, ESALQ/USP, UFPR, UFV e UFLA (AGUIAR et al., 2011). Os principais objetivos do melhoramento de espécies florestais são: o aumento da produtividade, a obtenção de matéria-prima de maior qualidade, a melhoria nas condições adaptativas das espécies, a tolerância a pragas e doenças e ainda a manutenção da variabilidade genética, requisito fundamental para a obtenção de ganhos genéticos em longo prazo (FURLAN et al., 2007).

Amplamente utilizada dentro de um programa de melhoramento de plantas, a seleção recorrente, é uma estratégia que busca a concentração de alelos desejáveis por meio de ciclos repetidos de seleção. De forma que a variabilidade genética dentro de uma população não seja reduzida drasticamente. Esta estratégia é formada pelas etapas: i) Obtenção de progênies; ii) Avaliação de progênies e seleção; iii) Recombinação de progênies. As duas estratégias conhecidas dentro da seleção recorrente são a intrapopulacional, quando o objetivo está na melhora de uma população a partir das unidades de seleção indivíduo ou progênie. Já a seleção recorrente interpopulacional, visa melhorar duas populações, buscando a heterose entre elas (MOREIRA, 2013).

Os testes de progênies são comumente utilizados na identificação de genótipos com características desejáveis (NAVASCUES; EMERSON, 2008). São plantios estabelecidos em delineamento experimental a partir de sementes (progênies) procedentes de árvores matrizes distintas de uma determinada região. Uma das finalidades dos testes de progênies é avaliar o desempenho dos pais de seus descendentes e, com base nos valores genéticos, selecionar os indivíduos geneticamente superiores (HOUCHMANDZADEH, 2013; NAVASCUÉS; EMERSON, 2009). Como todas as progênies estão crescendo sob a mesma condição ambiental, é possível identificar e selecionar os genótipos superiores, fornecendo informações sobre as diferenças entre indivíduos para cada local, além de permitir conhecer a variabilidade genética da espécie, essa variabilidade é a matéria prima para realizar o melhoramento da espécie, sendo

fundamental conhecer sua distribuição entre e dentro das progênies e o grau de controle genético dos caracteres de interesse (PIRES et al., 2013).

3.3 Pomar de Sementes por Mudas no melhoramento Genético de *Pinus*

O pomar de sementes por mudas é um ensaio de árvores selecionadas geneticamente, isoladas para reduzir a polinização de fontes externas geneticamente inferiores. Essas árvores são intensamente manejadas para produzir safras frequentes, abundantes e de fácil coleta. Através de seleção massal, os indivíduos fenotipicamente superiores são selecionados e implantados de modo a permitir um inter cruzamento eficiente (MORI, 1988).

A aplicação de técnicas de melhoramento genético tem permitido um contínuo aumento da produtividade florestal. Estão sendo selecionadas árvores superiores com caracteres de rápido crescimento, boa forma, propriedades físicas e mecânicas apropriadas, resistência a pragas e doenças e boa DAP

acididade de adaptação a diversos ambientes ou a ambientes específicos (MORI, 1988). Além disso, a silvicultura moderna não tem apenas a finalidade de produzir madeira, mas também serviços e bens. Esta ciência busca definir o momento e forma como será feita a intervenção na floresta, para que se obtenha rendimentos elevados, sem prejudicar o equilíbrio ecológico (EMBRAPA, 2021.).

A produção de sementes geneticamente superiores é uma etapa de suma importância e o estabelecimento de pomares de sementes florestais, provavelmente é a melhor alternativa para suprir as necessidades comerciais. As principais características que vêm sendo melhoradas estão ligadas à produção de biomassa, alteração na composição de lignina, resistência a pragas, tolerância a herbicidas, macho-esterilidade e fitorremediação (CIÊNCIA FLORESTAL, 2009). A coleta de sementes deve ser feita de árvores selecionadas, considerando os objetivos do plantio florestal que será formado, chamadas de árvores matrizes (EMBRAPA, 2021).

Em resumo, o pomar de sementes por mudas na silvicultura é uma prática essencial para a produção de sementes de alta qualidade. Ele permite a seleção de árvores com características desejáveis, contribuindo para o aumento da produtividade florestal e a sustentabilidade do setor (CIÊNCIA FLORESTAL, 2009). A produção de sementes de espécies florestais ganhou grande importância para a formação de mudas a serem utilizadas em programa de reposição florestal, reflorestamento, recuperação de áreas degradadas, arborização urbana e a preservação das espécies florestais nativas em extinção (EMBRAPA, 2021).

3.4 Caracterização da Qualidade da Madeira Através de Métodos de Amostragem Não Destrutiva.

A avaliação não destrutiva da qualidade da madeira é uma prática cada vez mais comum no campo do manejo florestal e do melhoramento genético de espécies como o *Pinus*. Estes métodos permitem a determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira sem a necessidade de danificar a amostra, representando um avanço significativo para práticas sustentáveis e economicamente eficientes (BUCUR, 2006).

Tradicionalmente, os programas de melhoramento de *Pinus* ssp. visam a seleção de material genético superior para a qualidade da madeira com base no volume da árvore. Entretanto, esse método de seleção gera um problema visto que para diversas espécies de *Pinus* verificaram que existe uma correlação negativa entre volume da madeira e características de qualidade da madeira (FRIES, 2002; HONG; FRIES; WU, 2014; POT ET AL., 2002; WU; SANCHEZ, 2011). A rigidez e a resistência são importantes propriedades de qualidade da madeira que pré-determinam a adequação da madeira serrada para fins de construção. A possibilidade de sua avaliação não destrutiva oferece uma oportunidade de selecionar árvores para melhor qualidade da madeira, e consequentemente otimizar as práticas silviculturais em uma direção a uma madeira de melhor qualidade para diferentes requisitos de uso final. (AMORIM, 2024)

Entre as técnicas amplamente utilizadas, o ultrassom, particularmente dispositivos como o Tree Sonic Fakopp, destaca-se por sua eficiência em medir a rigidez das toras ou árvores. A velocidade das ondas ultrassônicas emitidas por dispositivos como o Tree Sonic Fakopp é frequentemente correlacionada com o Módulo de Elasticidade (MOE), fornecendo uma métrica precisa da qualidade material (GRABIANOWSKI ET AL., 2006).

A adoção dessas técnicas de avaliação não destrutivas é fundamental para otimizar o uso de recursos florestais, permitindo uma exploração mais consciente e eficiente das florestas, em alinhamento com as demandas contemporâneas por práticas de gestão florestal sustentável (WANG ET AL., 2007).

3.5 Parâmetros Genéticos

A avaliação dos parâmetros genéticos é essencial em programas de melhoramento florestal, pois permite estimar a variabilidade genética presente em uma população e prever o

ganho genético com a seleção. Os principais parâmetros genéticos incluem a herdabilidade, a correlação genética e os coeficientes de variação genética.

Herdabilidade é uma medida da proporção da variabilidade fenotípica que é devida à variabilidade genética aditiva entre os indivíduos. Ela é fundamental para entender o potencial de resposta à seleção. A herdabilidade pode ser expressa no sentido restrito (h^2), que considera apenas a variância genética aditiva, e no sentido amplo, que inclui todas as formas de variância genética (aditiva, dominância e epistática) (FALCONER; MACKAY, 1996).

Correlação Genética é a medida da associação genética entre duas ou mais características. Essa correlação pode ser positiva ou negativa, indicando se a seleção para uma característica influenciará de forma semelhante ou oposta outra característica. A correlação genética é crucial para estratégias de seleção multicaracterísticas (RESENDE, 2007).

Coeficiente de Variação Genética é a relação entre o desvio padrão genético e a média fenotípica de uma característica, expresso em porcentagem. Ele fornece uma ideia da variabilidade genética relativa e é útil para comparar a variabilidade genética de diferentes características ou populações (FALCONER; MACKAY, 1996).

Estimativas de Variância incluem a variância genética aditiva (σ^2A), variância genética dominante (σ^2D), variância ambiental (σ^2E) e a variância fenotípica total (σ^2P). A variância genética aditiva é particularmente importante para o melhoramento genético, pois representa a porção da variância que responde diretamente à seleção (LYNCH; WALSH, 1998).

No contexto do *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis*, os parâmetros genéticos são avaliados para caracteres de crescimento como diâmetro à altura do peito (DAP), altura total (ALT), volume (VOL), velocidade de onda acústica (VAS) e módulo de elasticidade (MOE). Estudos utilizando métodos como REML/BLUP têm demonstrado a existência de variabilidade genética significativa para esses caracteres, sugerindo um potencial considerável para ganhos genéticos através da seleção (RESENDE, 2007).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

As sementes das 119 progênies que constituem o experimento são oriundas de um pomar de sementes clonal do Centro de Conservação Genética e Melhoramento de Pinheiros Tropicais - CCGMPT, localizado em Aracruz - ES, a 19°49 ' S e 40°16 ' W, a uma altitude de 50 metros. O material foi cedido pelo Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais - IPEF-ESALQ/USP - Piracicaba – SP. Além das progênies, foram incluídas no ensaio duas testemunhas comerciais provenientes de árvores matrizes da Duratex em Agudos – SP, a 22°22' S e 48°52' W, com uma altitude de 550 metros.

O teste de progênies foi instalado no período de 20 a 21 de março de 1990, na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da Faculdade de Engenharia - Câmpus de Ilha Solteira - da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP (Figura 4), localizada no município de Selvíria – MS (20°20'S e 51°23'W a uma altitude de 370 metros), onde o clima é do tipo Aw, pela classificação de Köppen, com temperatura média anual de 24,5°C, precipitação média anual de 1.232,2 mm, umidade média anual de 64,8% e insolação média de 7,3 horas/dia (HERNANDEZ et al., 1995). Dados atuais foram obtidos junto ao UNESP CLIMA. Com base No Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018) o solo do local é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico argiloso, A moderado, hipidistrófico, álico, caulínítico, férrico, compactado, muito profundo, moderadamente ácido (LVd).

Figura 5. Vista aérea do local de instalação do teste de progênies de *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis* localizados em Selvíria-MS. 20° 20'30"S 51° 23'59"W. Data de acesso: 25/02/2022.



Fonte: Google Earth (2022).

4.2 Métodos

4.2.1 Instalação e caracteres avaliados

Os caracteres de crescimento mensurados aos 31 anos após o plantio foram: i) circunferência à altura do peito (CAP, cm); ii) sobrevivência (SOB), iii) velocidade de onda acústica (VAS, m s^{-1}) e módulo de elasticidade (MOEd^{MPa}). Com base no CAP foi estimado o diâmetro à altura do peito (DAP, cm) conforme a expressão a seguir (1):

$$DAP = \frac{CAP}{\pi} \quad (1)$$

Foi utilizada a ferramenta acústica *Fakopp TreeSonic* (HUANG et al., 2005), desenvolvida para a medição indireta do módulo de elasticidade das árvores em pé. A ferramenta é baseada na relação entre a velocidade de propagação longitudinal das ondas sonoras (“tempo de voo”) geradas por um estímulo mecânico em uma direção ao longo do comprimento do fuste e a densidade da madeira (ECKARD et al., 2010; Walker et al., 2019).

O aparelho foi posicionado a 45°, inserido no tronco da árvore, com dois receptores: um na base (a 0,5 cm do solo) e outro na parte superior (a 1 m de distância do primeiro receptor) (Figura 5) Após a inserção dos receptores, um martelo foi usado para atingir o receptor superior, a fim do aparelho medir a velocidade do som entre a distância dos receptores, conforme recomendado no guia do fabricante (PROTO et al., 2017).

Foram tomadas 3 medidas de tempo de voo por árvore próximo à altura do DAP, realizadas em duas das seis repetições presentes no ensaio e a média foi utilizada para análise da velocidade de propagação longitudinal das ondas sonoras, por meio da expressão (2):

$$V (\text{m s}^{-1}) = 1000 \times D(\text{mm}) / (\text{leitura TS} + 1,4) \quad (2)$$

em que: V = velocidade de propagação longitudinal das ondas sonoras; D = distância entre os dois equipamentos inserido ao fuste; TS = *Tree sonic*.

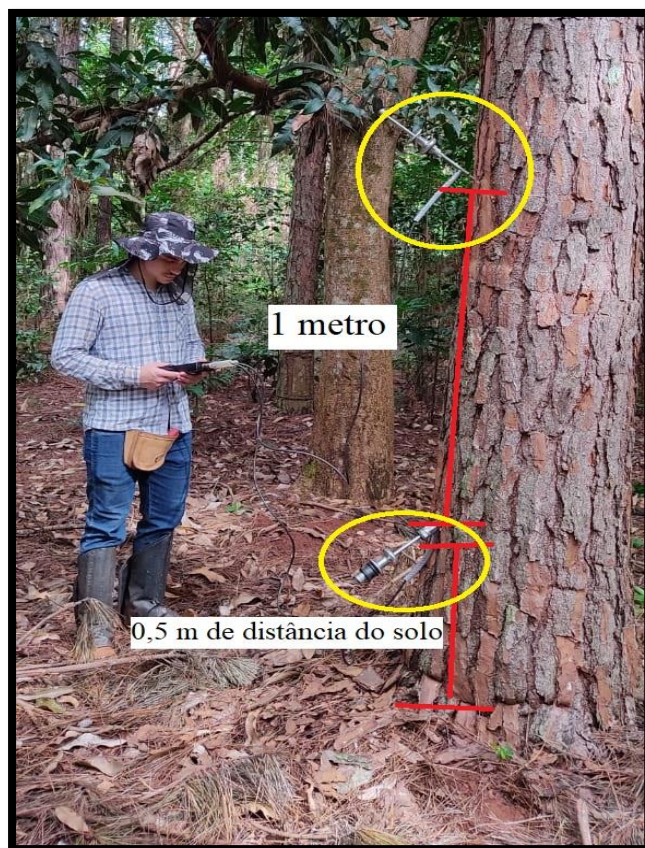
Após o cálculo da velocidade do som, foi então determinado o módulo de elasticidade (MOEd) (3):

$$\text{MOEd (Pa)} = (v^2) \cdot (\text{densidade média kg m}^{-3}) \quad (3)$$

Após o cálculo do módulo de elasticidade, os valores foram transformados em megapascal (MOEd , Mpa) para facilitar a comparação dos valores (4):

$$\text{MOEd (Mpa)} = \text{MOEd} \cdot (10^{-0,6}) \quad (4)$$

Figura 6. Utilização do *Treesonic* para a coleta de dados da velocidade de onda acústica em um teste de progênies de *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis*, aos 31 anos, em Selvíria, MS.



Fonte: Próprio autor.

iv) altura total (ALT, m), para tanto se utilizou o *hipsómetro vertex III* (Figura 6); v) O volume total de madeira foi estimado a partir de equações de regressão de acordo com Moraes Neto (2009).

$$\text{Hohenadl-kren: } VOL_1 = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 \quad (5)$$

$$\text{Spurr (Equação 1): } VOL_2 = \beta_1 (d^2 h) \quad (6)$$

$$\text{Spurr (Equação 2): } VOL_3 = \beta_0 + \beta_1 (d^2 h) \quad (7)$$

$$\text{Spurr (Equação 3): } \ln VOL_4 = \beta_0 + \beta_1 \ln(d^2 h) \quad (8)$$

$$\text{Stoate: } VOL_5 = \beta_0 + \beta_1 h + \beta_2 d^2 + \beta_3 (d^2 h) \quad (9)$$

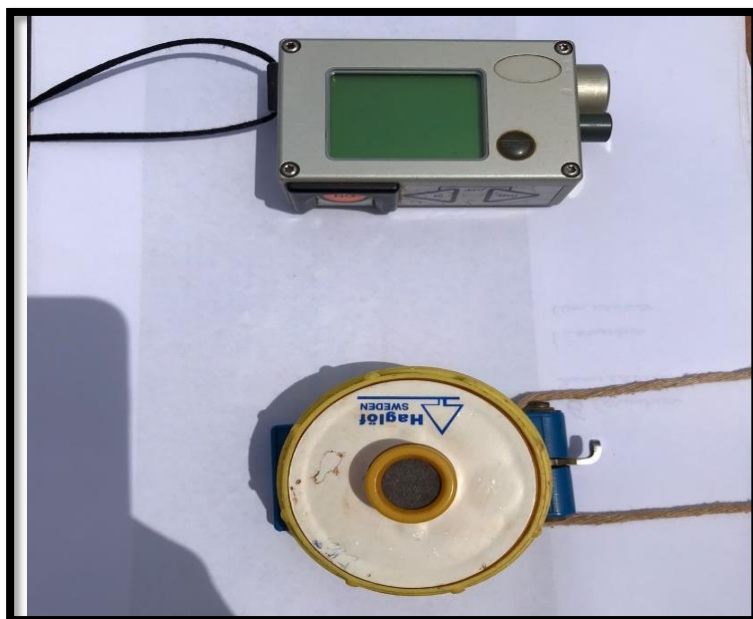
$$\text{Meyer: } VOL_6 = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 h + \beta_3 d^2 + \beta_4 (d^2 h) + \beta_5 (dh) \quad (10)$$

$$\text{Berkhout: } \ln VOL_7 = \beta_0 d^{\beta_1} \quad (11)$$

$$\text{Husch: } \ln VOL_8 = \beta_0 + \beta_1 \ln d \quad (12)$$

$$\text{Schumacker-Hall linear: } \ln VOL_9 = \beta_0 + \beta_1 \ln d + \beta_2 \ln h \quad (13)$$

Figura 7. Hipsômetro vertex utilizado nas estimativas de altura em um teste de progênes de *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis*, aos 31 anos, em Selvíria, MS.



Fonte: Próprio autor.

4.2.2 Delineamento estatístico e estimativa de parâmetros genéticos.

O delineamento utilizado foi o de blocos casualizados com 121 tratamentos (119 progênes e duas testemunhas), seis repetições e seis plantas por parcelas, na forma linear, sendo que Missio (2004) fez um desbaste de 50% dentro de progênes aos 13 anos de idade do teste de progênes. As estimativas de componentes de variância e parâmetros genéticos foram obtidas pelo método REML/BLUP (máxima verossimilhança restrita / melhor predição linear não viciada), empregando-se o *software* genético-estatístico SELEGEN-REML/BLUP, desenvolvido por Resende (2007b, 2016) aos 31 anos após o plantio.

O procedimento REML do componente da estimativa de variância foi desenvolvido por Patterson & Thompson (1971) e Thompson (1973). Os detalhes a respeito deste método são apresentados por Searle et al. (1992), Resende (2002) e Resende (2007a).

Para a avaliação do experimento, teve como modelo estatístico (14):

$$y = Xb + Za + Wc + e \quad (14)$$

em que: y é o vetor de dados; r é o vetor dos efeitos de repetição (assumidos como fixos) somados à média geral, a é o vetor dos efeitos genéticos aditivos individuais (assumidos como aleatórios); p é o vetor dos efeitos de parcela, e é o vetor de erros ou resíduos (aleatórios). As letras maiúsculas representam as matrizes de incidência para os referidos efeitos.

As distribuições e estruturas da média e variâncias são:

$$y|b, V \sim N(Xb, V)$$

$$a|A, \sigma_a^2 \sim N(0, A\hat{\sigma}_a^2)$$

$$c|\sigma_c^2 \sim N(0, I\hat{\sigma}_c^2)$$

$$e|\sigma_e^2 \sim N(0, I\hat{\sigma}_e^2)$$

$\text{COV}(a, c') = 0$; $\text{COV}(a, e') = 0$; $\text{COV}(c, e') = 0$, ou seja, as covariâncias entre todos os efeitos aleatórios do modelo são consideradas nulas. Assim como (15):

$$E \begin{bmatrix} y \\ a \\ c \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Xb \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \text{var} \begin{bmatrix} y \\ a \\ c \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V & ZG & WC & R \\ GZ' & G & 0 & 0 \\ CW' & 0 & C & 0 \\ R & 0 & 0 & R \end{bmatrix} \quad (15)$$

em que: $G = A\hat{\sigma}_a^2$; $R = I\hat{\sigma}_e^2$; $C = I\hat{\sigma}_c^2$; $V = ZA\hat{\sigma}_a^2Z' + WI\hat{\sigma}_c^2W' + I\hat{\sigma}_e^2 = ZGZ' + WCW' + R$.

A equação do modelo misto é (16):

$$\begin{bmatrix} X'X & X'Z & X'W \\ Z'X & Z'Z + A^{-1}\lambda_1 & Z'W \\ W'X & W'Z & W'W + I\lambda_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{b} \\ \hat{a} \\ \hat{c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'y \\ Z'y \\ W'y \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\text{em que: } \lambda_1 = \frac{\hat{\sigma}_e^2}{\hat{\sigma}_a^2} = \frac{1 - \hat{h}^2 - \hat{c}^2}{\hat{h}^2}; \quad \lambda_2 = \frac{\hat{\sigma}_e^2}{\hat{\sigma}_c^2} = \frac{1 - \hat{h}^2 - \hat{c}^2}{\hat{c}^2};$$

$$\hat{h}_2 = \frac{\hat{\sigma}_a^2}{\hat{\sigma}_a^2 + \hat{\sigma}_e^2 + \hat{\sigma}_c^2} : \text{herdabilidade individual no sentido restrito, no bloco.}$$

$$\hat{c}_2 = \frac{\hat{\sigma}_c^2}{\hat{\sigma}_a^2 + \hat{\sigma}_c^2 + \hat{\sigma}_e^2} : \text{correlação devida ao ambiente comum da parcela.}$$

$\hat{\sigma}_a^2$: variância genética aditiva.

$\hat{\sigma}_c^2$: variância entre parcelas;

$\hat{\sigma}_e^2$: variância residual (ambiental dentro de parcelas + não aditiva).

A: matriz de correlação genética aditiva entre os indivíduos em avaliação.

Demais estimativas de variâncias e parâmetros genéticos processados pelo programa:

a) Variância genética aditiva ($\hat{\sigma}_a^2$) (17):

$$\hat{\sigma}_a^2 = [\hat{a}' A^{-1} \hat{a} + \hat{\sigma}_e^2 \text{tr} (A^{-1} C^{22})] / q \quad (17);$$

b) Variância ambiental entre parcelas ($\hat{\sigma}_c^2$) (18):

$$\hat{\sigma}_c^2 = [\hat{c}' \hat{c} + \hat{\sigma}_e^2 \text{tr} C^{33}] / s_l \quad (18);$$

c) Variância residual (ambiental + não aditiva) ($\hat{\sigma}_e^2$) (19):

$$\hat{\sigma}_e^2 = [y' y - \hat{r}' X' y - \hat{a}' Z' y - \hat{c}' W' y] / [N - r(x)] \quad (19);$$

em que: C^{22} e C^{33} vem da inversa de C; C: matriz dos coeficientes das equações de modelo misto; tr : operador traço matricial; $r(x)$: posto da matriz X; N, q, s: números de dados, de indivíduos e de parcelas, respectivamente.

d) Variância fenotípica individual ($\hat{\sigma}_f^2$) (20):

$$\hat{\sigma}_f^2 = \hat{\sigma}_a^2 + \hat{\sigma}_c^2 + \hat{\sigma}_e^2 \quad (20);$$

e) Herdabilidade individual no sentido restrito, ou seja, dos efeitos aditivos (21):

$$\hat{h}_a^2 = \frac{\hat{\sigma}_a^2}{\hat{\sigma}_f^2} \quad (21)$$

f) Herdabilidade da média de progênies (22):

$$\hat{h}_m^2 = \frac{(1/4)\hat{\sigma}_a^2}{(1/4)\hat{\sigma}_a^2 + \frac{\hat{\sigma}_c^2}{r} + \frac{(0,75\hat{\sigma}_a^2 + \hat{\sigma}_e^2)}{n.r}} \quad (22);$$

g) Herdabilidade aditiva dentro de parcela (23):

$$\hat{h}_{ad}^2 = \frac{0,75\hat{\sigma}_a^2}{0,75\hat{\sigma}_a^2 + \hat{\sigma}_e^2} \quad (23);$$

h) Coeficiente de variação genética aditiva individual (24):

$$CV_{gi}(\%) = \frac{\sqrt{\hat{\sigma}_a^2}}{\hat{m}} 100 \quad (24);$$

i) Coeficiente de variação genotípica entre progênies (25):

$$CV_{gp}(\%) = \frac{\sqrt{0,25\hat{\sigma}_a^2}}{\hat{m}} 100 \quad (25);$$

j) Coeficiente de variação experimental (26):

$$CV_e(\%) = \frac{\sqrt{[(0,75\hat{\sigma}_a^2 + \hat{\sigma}_e^2)/n] + \hat{\sigma}_c^2}}{\hat{m}} 100 \quad (26);$$

k) Coeficiente de variação relativa (27):

$$CV_r = \frac{CV_{gp}}{CV_e} \quad (27);$$

l) Acurácia da seleção de progênies, assumindo sobrevivência completa (28):

$$r_{\hat{a}a} = \sqrt{\hat{h}_m^2} \quad (28).$$

Para realização de todas as análises foi empregado o *software* genético-estatístico SELEGEN, desenvolvido por Resende (2007b, 2016). O teste de significância foi realizado com o cálculo do LRT (teste de razão de verossimilhança), obtido pela diferença entre as deviances para modelos sem e com efeito a ser testado. Para o teste via LTR, foi utilizado o teste de qui-quadrado.

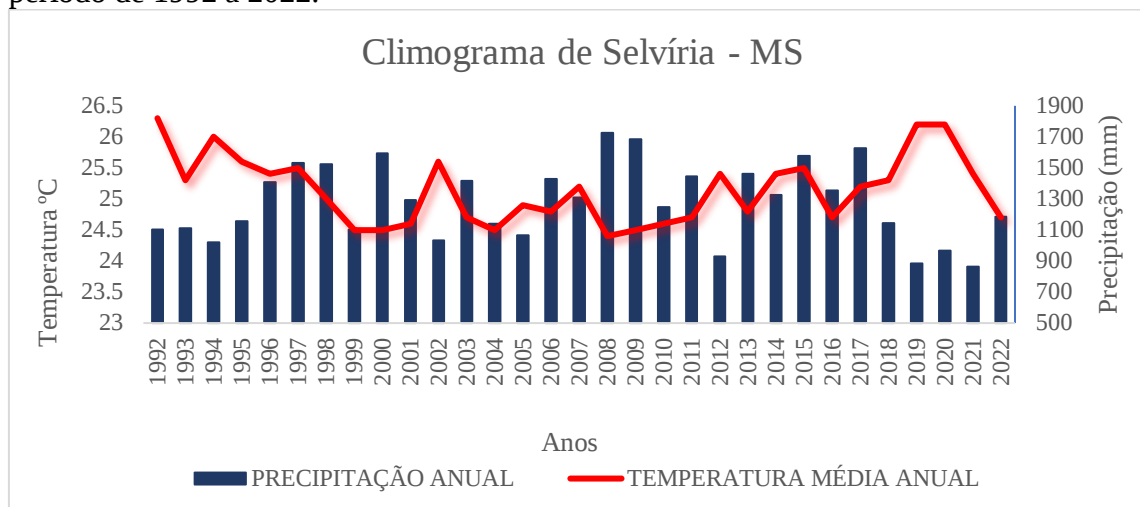
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Sobrevivência

Inicialmente, o teste de progênes de *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis* era composto por 4.282 plantas. Aos 13 anos após o plantio, foi realizado um desbaste seletivo adotando-se intensidade de seleção de 50% dentro de progênes. Atualmente, o teste de progênes é composto por 1.228 plantas, correspondendo a uma taxa de sobrevivência de 57,35%, considerando um total de 2.141 plantas restantes após o desbaste seletivo. A alta taxa de mortalidade obtida nesta área pode ser atribuída a grande quantidade de lianas e sub-bosques. Espécies de lianas podem alcançar o topo das árvores em busca de luz, causando a morte das plantas por sufocamento. Tal como observado no estudo de Souza Santos (2023), a sobrevivência das plantas pode ser fortemente influenciada por fatores como a ocorrência de vegetação invasora e as características químicas e físicas do solo. Em seu estudo, dos 2.016 indivíduos inicialmente estabelecidos, apenas 50,94% sobreviveram, com o alto teor de alumínio no solo sendo um possível fator de estresse adicional. Esses achados reforçam a importância do manejo adequado de vegetação em desequilíbrio, mesmo em plantios de *pinus* em idade adulta, para assim obter maiores taxas de sobrevivência.

Houve uma alteração no regime hídrico e na temperatura média anual entre 2017 e 2022. Observou-se uma diminuição significativa na pluviosidade, que foi de 1628 mm em 2018 para uma média inferior a 1200 mm nos anos subsequentes (2019 a 2022). A temperatura também apresentou mudanças: em 2018 era de 25,3°C e aumentou para 26,2°C nos anos 2019 e 2020, uma variação de 0,9°C (Figura 8). Essas alterações climáticas, associadas à presença anteriormente mencionada de lianas e sub-bosques, podem ter contribuído para a alta taxa de mortalidade na população nos últimos anos. Mudanças climáticas futuras têm o potencial de impactar negativamente a produtividade de *pinus*. (FERREIRA, 2005).

Figura 8. Média anual de temperatura média e precipitação na cidade de Selvíria-MS, no período de 1992 a 2022.



Fonte: Canal Clima da Unesp de Ilha Solteira, 2022.

5.2 Escolha da equação de volume

Entre as equações avaliadas, destaca-se a equação de Meyer devido ao seu alto coeficiente de determinação ($R^2 = 0.99$). Este elevado R^2 indica um excelente ajuste da equação aos dados, sugerindo que ela é capaz de explicar a maior parte da variabilidade observada nos volumes medidos. Dada sua alta precisão e acurácia, a equação de Meyer foi a escolhida para estimar o volume no ensaio (Tabela 1).

Tabela 1. Equações de Estimativa de Volume.

Equação	Coefficientes	R^2
Hohenadl-kren	$\beta_0: -1,1302; \beta_1: 9,2322; \beta_2: -7,1955$	0,51
Spurr (Equação 1)	$\beta_1: 0,4960$	0,75
Spurr (Equação 2)	$\beta_0: -0,1049; \beta_1: 0,5545$	0,76
Spurr (Equação 3)	$\beta_0: -0,7072; \beta_1: 0,9736$	0,74
Stoate	$\beta_0: 312,04; \beta_1: -0,1498; \beta_2: -461,797; \beta_3: 270,97$	0,86
Meyer	$\beta_0: 88,1128; \beta_1: -614,2385; \beta_2: -3,9496; \beta_3: 1050,3; \beta_4: -46,5304; \beta_5: 27,5106$	0,99
Berkhout	$\beta_0: 3,0721; \beta_1: 1,2644$	0,49
Husch	$\beta_0: 1,9907; \beta_1: 1,6861,$	0,50
Schumacker-Hall	$\beta_0: -1,2217; \beta_1: 1,9137; \beta_2: 1,1243$	0,75

5.3 Análise de deviance e parâmetros genéticos

Observou-se uma diferença significativa no diâmetro à altura do peito (DAP) entre progênies a um nível de significância de 1% (Tabela 2). Esses resultados evidenciam a presença

de variações fenotípicas importantes, sugerindo que, se a maioria dessas variações for atribuída a efeitos genéticos aditivos e não aditivos, podem ser alcançados ganhos genéticos significativos com a implementação de diferentes estratégias de melhoramento (SANTOS, 2014). Estudos anteriores têm mostrado fortes correlações genéticas entre a velocidade de propagação do som na madeira e o ângulo das microfibrilas, sendo estas últimas fortemente associadas ao Módulo de Elasticidade (MOEd) (ISIK et al., 2011; LENZ et al., 2013; DESPONTIS et al., 2017; WALKER et al., 2019). As estimativas de herdabilidade para a velocidade de propagação acústica geralmente são elevadas em testes de progênie de coníferas (ECKARD et al., 2010; WALKER et al., 2019). No que se refere ao Teste da Razão de Verossimilhança (LRT), não foram observadas diferenças significativas para a Velocidade Acústica do Som (VAS) entre progênies e parcelas, um resultado que pode estar associado à idade das plantas. Para o MOEd, não houve diferenças significativas no LRT entre progênies, e apenas as parcelas mostraram significância a 5% de probabilidade. Os valores médios observados para DAP, VAS, ALT, MOEd e VOL aos 31 anos foram, respectivamente, 30,54 cm, 4754,03 m/s, 29,34 m, 2,41 MPa e 1,45 m³ por árvore. Neste estudo, a espécie *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis* apresentou um crescimento inferior quando comparada a outras variedades de *Pinus caribaea*. Zulian (2017) registrou para *Pinus caribaea* var. *caribaea*, aos 28 anos, um valor médio de DAP de 31,98 cm, indicando um crescimento 4,71% superior ao observado neste estudo.

Tabela 2. Desempenho para dos caracteres: DAP (diâmetro a altura do peito), VAS (Velocidade acústica do som), ALT (altura total), MOEd (Módulo de elasticidade) e VOL (volume por árvore) em um teste de progênies de *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis*, aos 31 anos, em Selvíria-MS.

Estimativas	DAP (cm)	VAS (m s ⁻¹)	ALT (m)	MOEd (Mpa)	VOL (m ³ árv. ⁻¹)
$\hat{m}$	30,54	4754,03	29,34	2,41	1,45
CV _e (%)	1,45	4,55	0,41	9,39	3,29
LRT Progênies (χ^2)	42,9**	0,53 ^{ns}	23,32**	0,46 ^{ns}	39,81**
LRT Parcelas (χ^2)	0,83 ^{ns}	2,49 ^{ns}	0,04 ^{ns}	3,15 ^{ns}	0,00 ^{ns}

LRT: Teste da razão de verossimilhança; χ^2 qui-quadrado da deviance; ** significativo a 1% 6.63, *significativo a 5%, com 1 grau de liberdade 3,84; ns não significativo. $\hat{m}$: Média geral do experimento; CV_e:coeficiente de variação experimental.

A herdabilidade no sentido restrito (h²a) para o DAP (diâmetro à altura do peito) aos 31 anos foi registrada em 0,40 ± 0,10, o que indica que 40% da variação fenotípica observada pode ser atribuída a fatores genéticos aditivos. Estes resultados são consistentes com estudos

anteriores em variedades de *Pinus caribaea*, onde Sampaio et al. (2000) e Sebbenn et al. (1994), bem como Missio et al. (2004), relataram valores similares para a herdabilidade nesta espécie. A presença de uma herdabilidade substancial para o DAP sugere que ganhos genéticos significativos são possíveis por meio da seleção baseada em características aditivas.

O coeficiente de variação genética aditiva individual (CV_{gi}) para o DAP foi consideravelmente alto, estimado em 13,86%. Este valor é significativamente maior do que o coeficiente de variação genotípica entre progênies (CV_{gp}), que foi de 6,93%. Tal diferença sublinha a existência de uma variabilidade genética considerável para este caráter, corroborando com a afirmação de Sebbenn et al. (1998) de que um coeficiente de variação genética acima de 7% é indicativo de alta variabilidade.

Outros caracteres como o volume (VOL) e o módulo de elasticidade (MOEd) também mostraram altos coeficientes de variação genética aditiva individual, sendo 30,81% para o volume e 7,66% para o MOEd. Esses valores são bem maiores do que os coeficientes de variação genotípica entre progênies para esses traços (15,43% para volume e 3,83% para MOEd), ressaltando a alta variabilidade genética aditiva disponível para esses caracteres, que são críticos para programas de melhoramento focados em qualidade e produtividade da madeira.

Por outro lado, a altura total (ALT) mostrou uma herdabilidade e variabilidade genética aditiva individual relativamente baixas ($0,09 \pm 0,14$ e 3,31%, respectivamente), indicando que este traço pode ser mais influenciado por fatores ambientais ou não-aditivos, o que limita as oportunidades para ganhos significativos através da seleção genética direta.

Tabela 3. Estimativa de parâmetros genéticos para os caracteres: DAP (diâmetro a altura do peito), VAS (velocidade de onda acústica), ALT (altura total), MOEd (módulo de elasticidade da madeira) e VOL (volume por árvore) em um teste de progênes de *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis*, aos 31 anos, em Selvíria-MS.

Parâmetros Genéticos	DAP (cm)	ALT (m)	VAS (m s ⁻¹)	MOEd (Mpa)	VOL (m ³ árv. ⁻¹)
$\hat{h}_a^2$	0,40±0,10	0,09±0,14	0,21± 0,14	0,20±0,14	0,39 ± 0.10
$\hat{h}_m^2$	0,99	0,09	0,27	0,25	0,99
r_{aa}	0,99	0,31	0,52	0,50	0,98
$\hat{h}_{ad}^2$	0,33	0,07	0,20	0,20	0,33
CV_r	4,79	0,32	0,43	0,40	4,68
$CV_{gi}(\%)$	13,86	3,31	3,96	7,66	30,81
$CV_{gp}(\%)$	6,93	1,65	1,98	3,83	15,43
$\hat{C}_{par}^2$	0,003	0,06	0,15	0,17	0,003

$\hat{h}_a^2$: herdabilidade individual dos efeitos aditivos; $\hat{h}_m^2$: herdabilidade da média de progênes; r_{aa} : acurácia; $\hat{h}_{ad}^2$: herdabilidade aditiva dentro de parcela; CV_r : coeficiente de variação relativa; CV_{gi} : coeficiente de variação genética aditiva individual; CV_{gp} : coeficiente de variação genotípica entre progênes; $\hat{C}_{par}^2$: coeficiente de determinação dos efeitos de parcelas.

5.4 Ganho de seleção pela estratégia dentro de progênes

A estratégia de seleção (dentro de progênes) foi correspondente a uma intensidade de 85,5 % do total dos indivíduos sobreviventes no experimento (1050 melhores indivíduos, selecionando os 2 melhores de cada progênie). A alta intensidade de seleção adotada veio por meio do objetivo de conservação da espécie, desconsiderando valores baixos de ganho genético e introduzindo todas as progênes na seleção. A seleção apresentou ganhos de 0,75 %, eliminou os indivíduos com DAP inferior. Embora tenha apresentado baixo ganho genético, considerando a seleção, a diversidade genética foi de alta magnitude (1,00) (Tabela 4).

Tabela 4 - Estratégias de seleção dos melhores indivíduos, em um teste de progênie de *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis* para o DAP aos 31 anos, em Selvíria-MS.

Seleção praticada em 2022	
n	1050
N_{fo}	119
N_f	119
$\bar{k}_f$	8,81
$\hat{\sigma}_{kf}^2$	3,81
N_e	85,64
$\hat{m}$	30,11
$\hat{a}(cm)$	0,22
$\hat{D}$	1
$\hat{G}_s$	0,75 %

Nota: Número de indivíduos selecionados (n); nº original de famílias (N_{fo}); nº de famílias selecionadas (N_f); nº médio de indivíduos selecionados por família ($\bar{k}_f$); variância do nº de indivíduos selecionados por família ($\hat{\sigma}_{kf}^2$); tamanho efetivo populacional (N_e); média do experimento para o DAP ($\hat{m}$); índice multi-efeitos ($\hat{a}$); ganho de seleção ($\hat{G}_s$); diversidade genética ($\hat{D}$).

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

6. CONCLUSÕES

Os resultados do estudo revelam uma alta taxa de mortalidade no teste de progênies de *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis*, que foi significativamente influenciada pela competição com vegetação invasora e características adversas do solo. Essas descobertas sublinham a importância crítica de um manejo eficaz da vegetação e de práticas silviculturais adequadas para melhorar as taxas de sobrevivência em plantios comerciais e em ensaios de pesquisa.

Foi constatada uma diferença significativa entre as progênies para os caracteres de DAP e volume, indicando uma variabilidade genética substancial que pode ser explorada para o melhoramento genético. A análise dos dados revelou que o DAP apresenta alta variabilidade genética, o que sugere que estratégias de seleção eficazes podem resultar em ganhos genéticos significativos.

O estudo também mostrou que a seleção dentro de progênies para o DAP resultou em um ganho genético modesto de 0,75%, mesmo com uma intensidade de seleção de 85,5%. Isso destaca a potencial eficácia da seleção genética na melhoria de características desejáveis, apesar das desafiadoras condições ambientais.

Observou-se que as mudanças climáticas durante o período do estudo afetaram o regime hídrico e as condições térmicas, possivelmente contribuindo para a alta taxa de mortalidade observada. Isso ressalta a necessidade de estudos contínuos para avaliar o impacto das mudanças climáticas na silvicultura e no potencial produtivo de espécies como o *Pinus caribaea*.

REFERÊNCIAS

- AGUDELO, C. N. J. Caracterización de *Pinus caribaea* Morelet, *Pinus oocarpa* Schiede y *Pinus maximinoi* H. E. Moore. **Honduras: Escuela m Agrícola Panamericana**, 1990. 51 p.
- AGUIAR, A. V. de. et al. (2014). **Embrapa Cultivo de Pínus**. Embrapa. p. 3 CIÊNCIA FLORESTAL. Melhoramento florestal: ênfase na aplicação da biotecnologia. Cienc. Rural, v.39, n.5, ago. 2009.
- AMORIM, Erick Phelipe. **Predição dos ganhos genéticos para madeira e resina de *Pinus elliottii* Engelm. var. *elliottii***. 2024. 250 f. Tese (Doutorado em Planejamento e Usos dos Recursos Renováveis) - Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2024.
- BRANCHERIAU, L.; BAILLÈRES, H. Natural vibration analysis of clear wooden beams: A theoretical review. **Wood Science and Technology**, v. 36, n. 4, p. 347-365, 2002. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00226-002-0143-7>. Acesso em: 8 maio 2024.
- BUCUR, V. **Acoustics of Wood**. 2. ed. **Boca Raton: CRC Press**, 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/321620242_Acoustics_of_Wood. Acesso em: 8 maio 2024.
- DESPONTS, M.; PERRON, M.; DEBLOIS, J. Rapid assessment of wood traits for large-scale breeding selection in *Picea mariana* [Mill.] B.S.P. **Annals of Forest Science**, v. 74, n. 3, p. 53, 2017.
- ECKARD, J. T. et al. Selection Efficiency for Solid Wood Traits in Stress. **The International Journal on the Biology of Stress**, v. 56, n. 3, p. 233–241, 2010.
- FALCONER, D. S.; MACKAY, T. F. C. **Introduction to Quantitative Genetics**. 4th ed. Longman, 1996. Acesso em: 24 jun. 2024. DOI: 10.1007/978-1-4899-3176-6.
- FERREIRA, M. Melhoramento florestal e silvicultura intensiva com Eucalipto. **Silvicultura**, São Paulo, v.31: p.5-11. 1983.
- FERREIRA, R. A. **Análise genética e seleção em testes dialélicos de *Pinus taeda* L.** 2005. 220 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- FIER, I.S.N., KIKUTI, P. Perspectivas para utilização de espécies de *Pinus* spp. do México e América Central na região de Telêmaco Borba-PR. In: SBS (ed.) **Anais...7º Congresso Florestal Brasileiro**. Curitiba, 1:139-143. 1993.
- FURLAN, R. A.; MORI, E. S.; TAMBARUSSI, E. V.; MORAES, C. B., JESUS, F. A.; ZIMBACK, L. Estrutura genética de populações de melhoramento de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* por meio de marcadores de microssatélites. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 4, p. 553-563, 2007.
- GRABIANOWSKI, M.; MANLEY, B.; WALKER, J. C. F. Estimating modulus of elasticity of clear wood by non-destructive ultrasound and SilviScan techniques. **Forestry**, v. 79, n. 2, p. 125-135, Apr. 2006. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/335397519_NonDestructive_Evaluation_Techniques_and_What_They_Tell_Us_about_Wood_Property_Variation. Acesso em: 8 maio 2024.

GURGEL GARRIDO, L. M. A., ROMANELLI, R. C., GARRIDO, M. A. O., Variabilidade genética de produção de resina, DAP e altura em *Pinus caribaea* Mor. var. *bahamensis* Barr et Golf. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, n.8, pg.89-98. 1996.

HERNANDEZ, F.B.T., LEMOS FILHO, M.A.F., BUZETTI, S. **Software HIDRISA e o balanço hídrico de Ilha Solteira**. Ilha Solteira, UNESP / FEIS / Área de Hidráulica e Irrigação, 1995. 45p. (Série irrigação, 1).

HONG Z., FRIES A., WU H. High negative genetic correlations between growth traits and wood properties suggest incorporating multiple traits selection including economic weights for the future Scots pine breeding programs. **Annals Forest Science**, v.71, n.1, p. 463–472, 2014. <https://doi.org/10.1007/s13595-014-0359-3>

HOUCHMANDZADEH, B. **An alternative to the breeder's and Lande's equations**. 2013. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1309.0455v1>. Acesso em: 2 set. 2023.

HUANG, D.; OU, B.; PRIOR, R.L. The chemistry behind antioxidant capacity assays. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 53, p. 1841-1856, 2005.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório Anual 2022**. São Paulo: IBÁ, 2019. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em: 6 maio 2024.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório Anual 2023**. São Paulo: Ibá, 2023. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>. Acesso em: 01 maio 2024.

ISIK, F.; MORA, C. R.; SCHIMLECK, L. R. Genetic variation in *Pinus taeda* wood properties predicted using non-destructive techniques. **Annals of Forest Science**, v. 68, n. 2, p. 283–293, 2011.

LENZ, P.; AUTY, D.; ACHIM, A.; BEAULIEU, J.; MACKAY, J. Genetic Improvement of White Spruce Mechanical Wood Traits—Early Screening by Means of Acoustic Velocity. **Forests** 2013, 4, 575-594.

LYNCH, M.; WALSH, B. Genetics and Analysis of Quantitative Traits. **Sinauer Associates**, 1998. Acesso em: 24 jun. 2024. DOI: 10.1093/genetics/154.4.1601.

MENDES, Gabriela Karina de Souza. **Análise da atividade de resinagem de *Pinus elliottii* var. *elliottii* no município de Bituruna-PR**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Bituruna, PR, 2021. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/75534>. Acesso em: 6 maio 2024.

MISSIO, R.F. et al. Seleção simultânea de caracteres em progênies de *Pinus caribaea* Morelet var. *bahamensis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.66, p.161-166, 2004.

MOREIRA, J.P. **Ganho esperado na seleção de progênies de *Pinus elliottii* var. *elliottii* em idade precoce para produção de madeira**. 2013. 54 f. Dissertação (Mestrado em Sistema de

Produção)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- UNESP, Ilha Solteira, 2013.

MORI, E. S. **Pomares de sementes florestais**. Sér. Téc. - IPEF Piracicaba, v.5, n.16, p. 1 – 27, set. 1988.

NAVASCUES, M.; EMERSON, B. C. **Natural recovery of genetic diversity by gene flow in reforested areas of the endemic Canary Island pine, *Pinus canariensis***. 2008. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/0810.5676v1>. Acesso em: 2 set. 2023.

PATTERSON, H.D.; THOMPSON, R. Recovery of inter-block information when block sizes are unequal. **Biometrika**, London, v.58, p.545-554, 1971.

Pires, V. C. M., Martins, K., Boas, O. V., Freitas, M. L. M., & Sebbenn, A. M. (2013). Variabilidade genética de caracteres silviculturais em progênies de polinização aberta de *Pinus caribaea* var. *bahamensis*. **Scientia Forestalis**, 41(113), 119-129. Acesso em: 4 de maio de 2024. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cbab/a/Nvrm67JHfxsRRf3LBFzJXXS/#>

PROTO, A. R.; MACRI, G.; BERNARDINI, V.; RUSSO, D.; ZIMBALATTI, G. Acoustic evaluation of wood quality with a non-destructive method in standing trees: A first survey in Italy. **IForest**, Potenza, v. 10, n.4, p. 700–706, 2017.

RESENDE, M. D. V. Matemática e estatística na análise de experimentos e no melhoramento genético. **Embrapa Florestas**, 2007b. 561 p.

RESENDE, M.D.V. **Software Selegen – REML/BLUP**. Colombo: Embrapa Florestas, 2002. 67p. (Embrapa Florestas. Documentos, 77).

RESENDE, M.D.V. **Matemática e estatística na análise de experimentos e no melhoramento genético**. Colombo: Embrapa Florestas, 2007a. 561p. Resende, MDV. Melhoramento de essências florestais.

SAMPAIO, P. T. B.; RESENDE, M. D. V.; ARAÚJO, A. J. Estimativas de parâmetros genéticos e métodos de seleção para o melhoramento genético de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 11, p. 2243-2253, 2000.

SANTOS, T. C. S. **Seleção de progênies de *Pinus caribaea* var. *bahamensis* para produção e qualidade de madeira e resina**. 2023. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Produtos Florestais) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2023.

SANTOS, W. **Variação genética e desempenho de progênies de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* para produção de madeira e resina**. 2014. 98 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia, 2014.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; ARAÚJO FILHO, J.C.; OLIVEIRA, J.B.; CUNHA, T.J.F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5 ed. Brasília: Embrapa, 2018. 353p.

SEBBENN, A. M. et al. Variação genética em progênes de meios-irmãos de *Pinus caribaea* Mor. var. *bahamensis* Bar.et Gol. na região de Bebedouro, SP. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 6, p. 63- 73, 1994.

SEBBENN, A.M.; SIQUEIRA, A.C.M.F.; KAGEYAMA, P.Y.; MACHADO, J.A.R. Parâmetros genéticos na conservação da cabreúva – *Myroxylon peruiferum* L.F. Allemão. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.53, p.31- 38, 1998.

SHIMIZU, J. Y.; SEBBENN, A. M. Espécies de *Pinus* na silvicultura brasileira. In: SHIMIZU, J. Y. (Ed.). *Pinus* na silvicultura brasileira. Colombo: Embrapa Florestas, 2008. p. 49-74.

SHIMIZU, J.Y.; KAGEYAMA, P.Y.; HIGA, A.R. **Procedimentos e recomendações para estudos de progênes de essências florestais**. Curitiba: EMBRAPA-URPFCS, 1982. 33p. (EMBRAPA-URPFCS. Documento nº11).

SILVA, J. A.; OLIVEIRA, L. M. Distribuição de *Pinus caribaea* no Brasil: adaptação e importância econômica. **Revista Brasileira de Ciencias Florestais**, v. 10, n. 1, p. 25-32, 2020.

THOMPSON, R. The estimation of variance and covariance components with an application when records are subject to culling. **Biometrics**, Washington, v.29, p.527-550, 1973.

TSUCHIKAWA, S.; KOBORI, H. A review of recent near-infrared research for wood and paper (Part 1). **Applied Spectroscopy Reviews**, v. 50, n. 1, p. 1-19, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/245328858_A_Review_of_Recent_Near-Infrared_Research_for_Wood_and_Paper. Acesso em: 8 maio 2024.

UNESP – Área de Hidráulica e Irrigação. Canal Clima. 2021. Disponível em: <http://clima.feis.unesp.br>. Acesso em: 31 de dezembro de 2021.

WANG, X.; ROSS, R. J.; GREEN, D. W.; BRASHAW, B. K.; ENGLUND, K.; WOLCOTT, M. P. Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method. **Wood and Fiber Science**, v. 39, n. 3, p. 519-533, 2007. Disponível em: https://allisontree.com/wp-content/uploads/docs/fpl_gtr238.pdf. Acesso em: 8 maio 2024.

WALKER, T. D.; ISIK, F.; MCKEAND, S. E. Genetic Variation in Acoustic Time of Flight and Drill Resistance of Juvenile Wood in a Large Loblolly Pine Breeding Population. **Forest Science**, n. 20, p. 1–14, 2019.

ZULIAN, D. F. **Métodos de seleção para otimizar o ganho e a diversidade genética em pomares de sementes por muda de *Pinus caribaea* var. *caribaea***. 2017. p 32. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2017.

CROQUI DE CAMPO

[illegible]

APÊNDICE 2. Estimativas das variâncias: genética aditiva ($\hat{\sigma}_a^2$), ambiental entre parcelas ($\hat{\sigma}_c^2$), residual (ambiental + não aditiva) ($\hat{\sigma}_e^2$) e fenotípica individual ($\hat{\sigma}_f^2$) em um teste de progêies de *Pinus caribaea* var. *bahamensis*, aos 31 anos em Selvíria-MS.

Estimativas	DAP (cm)	ALT (m)	VOL (m ³ árv. ⁻¹)	VAS (m ^{s-1})	MOED (Mpa)
$\hat{\sigma}_a^2$	18	2,19	0,20	35438,17	0,03
$\hat{\sigma}_c^2$	0,14	0,005	0,00	24969,62	0,03
$\hat{\sigma}_e^2$	26,86	5,43	0,32	104460,64	0,11
$\hat{\sigma}_f^2$	44,93	7,63	0,52	164868,43	0,17