

CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA E CRESCIMENTO RADICULAR
DE PLANTAS CLONAIIS E SEMINÍFERAS DE *Paratecoma peroba*
(Record) Kuhlms.

YARA PEREIRA GONÇALVES

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY
RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
ABRIL – 2025

CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA E CRESCIMENTO
RADICULAR DE PLANTAS CLONAIIS E SEMINÍFERAS DE
Paratecoma peroba (Record) Kuhl.

YARA PEREIRA GONÇALVES

“Dissertação apresentada ao Centro de
Ciências e Tecnologias Agropecuárias da
Universidade Estadual do Norte Fluminense
Darcy Ribeiro, como parte das exigências
para obtenção do título de Mestra em
Produção Vegetal”

Orientadora: Deborah Guerra Barroso

Coorientadora: Luciana Aparecida Rodrigues

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

ABRIL – 2025

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

G635 Gonçalves, Yara Pereira.

CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA E CRESCIMENTO RADICULAR DE PLANTAS CLONAI E SEMINÍFERAS DE *Paratecoma peroba* (Record) Kuhlmann / Yara Pereira Gonçalves. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2025.

93 f.

Inclui bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2025.
Orientadora: Deborah Guerra Barroso.

1. *Peroba* de campos. 2. Espécie florestal. 3. Arquitetura radicular. 4. Raízes adventícias. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 630

CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA E CRESCIMENTO
RADICULAR DE PLANTAS CLONAIIS E SEMINÍFERAS DE
Paratecoma peroba (Record) Kuhl.

YARA PEREIRA GONÇALVES

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestra em Produção Vegetal”

Aprovada em 28 de abril de 2025

Comissão Examinadora:

Profa. Dra. Claudete Santa Catarina (D.Sc. Biotecnologia – USP)

Profa. Dra. Luciana Aparecida Rodrigues (D.Sc. Produção Vegetal -UENF)

Dr. David Pessanha Siqueira (D.Sc. Produção Vegetal – UENF)

Profa. Dra. Deborah Guerra Barroso (D.Sc. Produção Vegetal – UENF)
(Orientadora)

“Até aqui nos ajudou o Senhor.”

(1 Samuel 7:12)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por todo o suporte e pelas bênçãos concedidas ao longo da minha trajetória, permitindo-me chegar a este momento de vitória;

À minha mãe, minha eterna gratidão por sua garra e perseverança, por ser pai e mãe, por cada palavra de incentivo e por acreditar em mim e sonhar junto comigo;

À minha irmã Yasmin, por compartilhar comigo esta jornada e por ser um suporte fundamental, ajudando-me e oferecendo apoio emocional;

Aos meus familiares, por todo o suporte, incentivo e força;

Agradeço à Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) e ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal (PGPV) pelos conhecimentos adquiridos e pela oportunidade de obter este título;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pela concessão de bolsa durante os anos de pós-graduação, e à FAPERJ, pelo apoio financeiro ao projeto.

À minha orientadora, Deborah Guerra Barroso, pela orientação e pelo acolhimento, que foram essenciais para a conclusão desta etapa;

Aos colegas do LFIT – Setor de Silvicultura, Esmael, Giovanna, José Gabriel e Jussara, agradeço pela ajuda nas avaliações dos experimentos;

A todos os meus amigos, especialmente Ana Lúcia, Christian, Juliana e Thuany, sou grata pelos momentos compartilhados e pelo suporte constante. Vocês foram essenciais para que eu pudesse chegar até aqui;

Ao meu namorado, Leandro, pela parceria, pelo apoio e pelo carinho durante o desenvolvimento deste trabalho;

A todos que, de alguma forma, contribuíram para esta conquista. MUITO OBRIGADA!

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1. Objetivo geral.....	4
2.2. Objetivos específicos.....	4
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	5
3.1. <i>Paratecoma peroba</i> (Record) Kuhlmann.....	5
3.2. Produção de mudas x Método de propagação	7
3.3. Sistema radicular de plantas seminíferas	9
3.4. Sistema radicular de plantas clonais	11
3.5. Arquitetura do sistema radicular	14
3.6. Plasticidade do sistema radicular	17
3.7. Fatores que afetam o crescimento do sistema radicular	19
4. MATERIAL E MÉTODOS	22
4.1. Localização do experimento	22
4.2. EXPERIMENTO 1: AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO E CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DO SISTEMA RADICULAR DE MUDAS CLONAIAS E SEMINÍFERAS EM CASA DE VEGETAÇÃO.....	23
4.2.1. Produção das mudas seminíferas	23
4.2.2. Produção de mudas clonais.....	24
4.2.3. Avaliação da velocidade de crescimento de raízes de mudas clonais e seminíferas.....	25
4.3. EXPERIMENTO 2: AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DO SISTEMA RADICULAR DE PLANTAS CLONAIAS E SEMINÍFERAS DE <i>Paratecoma peroba</i> , EM CASA DE VEGETAÇÃO	27
4.3.1. Plantio em vasos	27
4.4. EXPERIMENTO 3: AVALIAÇÃO DE PLANTAS ADULTAS CLONAIAS E SEMINÍFERAS NO CAMPO.....	30

4.4.1. Plantio no campo	30
4.5. Estatística descritiva	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1.Experimento 1: Crescimento e morfologia do sistema radicular de mudas clonais e seminíferas de <i>Paratecoma peroba</i> em casa de vegetação	32
5.2. Experimento 2: Análise morfológica do sistema radicular de plantas clonais e seminíferas após o plantio em vasos	40
5.3. Experimento 3: Plantas de <i>Paratecoma peroba</i> clonais e seminíferas após o plantio	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

RESUMO

GONÇALVES, Yara Pereira; M.Sc; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; abril de 2025; Caracterização morfométrica e crescimento radicular de plantas clonais e seminíferas de *Paratecoma peroba* (Record) Kuhl; Orientadora: D.Sc. Deborah Guerra Barroso. Coorientadora: D.Sc. Luciana Aparecida Rodrigues.

Paratecoma peroba (Record) Kuhl. é uma espécie florestal da Mata Atlântica cuja madeira foi intensamente explorada ao longo dos anos, tornando-a ameaçada de extinção. Sua propagação ocorre por sementes ou por miniestaquia, sendo possível resgatar vegetativamente indivíduos adultos. Devido ao seu grande porte, a espécie requer um sistema radicular robusto para sua sustentação. No entanto, ainda não há descrição da arquitetura e da qualidade do sistema radicular de plantas propagadas vegetativamente, aspecto essencial para avaliar sua capacidade de suporte no campo. Este estudo teve como objetivo avaliar as características morfométricas e o crescimento radicular de mudas clonais e seminíferas de *P. peroba*, bem como seu crescimento inicial da parte aérea pós-plantio. O experimento foi conduzido em três etapas: (1) monitorando o crescimento radicular de mudas clonais e seminíferas por 220 dias após semeadura e o estaqueamento; (2) caracterização morfométrica do sistema radicular de plantas seminíferas e clonais aos 323 dias após o plantio das mudas em vasos de 7 L; (3) acompanhamento trimestral do crescimento em altura e diâmetro de *P. peroba* após o plantio no campo. As mudas de *P. peroba* propagadas por sementes apresentaram maior número de raízes laterais em comparação às raízes adventícias das mudas por miniestaquia. Apesar de possuírem menor quantidade de raízes, as mudas por miniestaquia desenvolveram raízes com comprimento superior às raízes laterais das mudas por sementes. O número de folhas refletiu o equilíbrio entre o comprimento das raízes (laterais e adventícias) e a parte aérea. Não houve diferença na velocidade de crescimento das raízes laterais e adventícias. No plantio em vasos, verificou-se que plantas seminíferas desenvolveram raízes de sustentação (pivotantes) mais grossas e pesadas, formando um sistema radicular mais profundo e estruturado. Por outro lado, plantas clonais apresentaram maior número de raízes de sustentação (adventícias com acúmulo de reservas). No campo, as mudas provenientes de sementes tiveram crescimento superior em altura e diâmetro até os 15 meses após o plantio, mantendo essa vantagem devido ao sistema radicular mais robusto. Conclui-se que mudas seminíferas e clonais de *P.*

peroba tiveram diferentes padrões de crescimento, com as semíníferas apresentando raízes pivotantes mais longas e maior crescimento em todas as fases avaliadas. Ambas as formas de propagação são viáveis para a produção comercial, necessitando de mais estudos sobre o manejo pós-plantio.

Palavras-chave: *peroba* de campos; espécie florestal; arquitetura radicular; raízes adventícias.

ABSTRACT

GONÇALVES, Yara Pereira; M.Sc; State University of Northern Fluminense Darcy Ribeiro; April 2025; Morphometric Characterization and Root Growth of Clonal and Seed-Provenanced Plants of *Paratecoma peroba* (Record) Kuhlmann; Advisor: D.Sc. Deborah Guerra Barroso; Co-advisor: D.Sc. Luciana Aparecida Rodrigues.

Paratecoma peroba (Register) Kuhlmann. is a forest species from the Atlantic Forest whose timber has been intensively exploited over the years, making it endangered. Its propagation can be achieved either by seeds or by mini-cuttings, enabling the vegetative rescue of mature individuals. Due to its large size, the species requires a robust root system for support. However, there is still no description of the architecture and quality of the root system of vegetatively propagated plants, an essential aspect for evaluating their support capacity under field conditions. This study aimed to evaluate the morphometric characteristics and root growth of clonal and seminiferous seedlings of *P. peroba*, as well as their initial aerial growth post-planting. The experiment was conducted in three stages: (1) monitoring the root growth of clonal and seminiferous seedlings for 220 days after sowing and staking; (2) morphometric characterization of the root system of seminiferous and clonal plants 323 days after planting in 7-L pots; (3) quarterly monitoring of height and diameter growth of *P. peroba* after planting in the field. *P. peroba* seedlings propagated by seeds had a greater number of lateral roots compared to the adventitious roots of mini-cutting seedlings. Despite having fewer roots, mini-cutting seedlings developed roots longer than the lateral roots of seed-propagated seedlings. The number of leaves reflected the balance between root length (lateral and adventitious) and shoot length. There was no difference in the growth rate of lateral and adventitious roots. When planted in pots, developed seminiferous plants are obtained with thicker and heavier prop roots (tapping roots), forming a deeper and more structured root system. On the other hand, clonal plants had a greater number of prop roots (adventitious roots with reserve accumulation). In the field, seedlings grown from seeds showed superior height and diameter growth up to 15 months after planting, maintaining this advantage due to their more robust root system. It was concluded that seminiferous and clonal seedlings of *P. peroba* exhibited different growth patterns, with seminiferous seedlings exhibiting longer tap roots and greater growth at all stages evaluated. Both propagation methods are viable for commercial production, requiring further studies on post-planting management.

Keywords: peroba de campos; forest species; root architecture; adventitious roots.

1. INTRODUÇÃO

Paratecoma peroba (Record) Kuhl. é uma espécie florestal, popularmente conhecida como peroba-do-campo, peroba-amarela, ipê-peroba ou peroba-de-campo. Endêmica do bioma Mata Atlântica, ocorre naturalmente no Espírito Santo, Rio de Janeiro (Nordeste Fluminense), Minas Gerais e sul da Bahia (Lohmann, 2024).

A exploração intensiva da madeira levou à drástica redução das populações naturais (Martinelli e Moraes, 2013; Brasil, 2014), impactando criticamente a sobrevivência da espécie. Em razão desses desafios, a espécie está na "Lista Vermelha" e é classificada como em perigo de extinção, segundo o Ministério do Meio Ambiente (ICMBio, 2022).

Apesar da proteção de algumas unidades de conservação, a fragmentação da Mata Atlântica e a ausência de projetos de recuperação florestal ameaçam seriamente a *P. peroba* (Araújo et al., 2019), comprometendo sua preservação. Segundo levantamento de Silva e Nascimento (2001), existem pouco mais de 8.500 indivíduos adultos dessa espécie na natureza.

As mudas de *P. peroba* são produzidas comercialmente a partir de sementes. No entanto, existem fatores limitantes, como a dificuldade em encontrar matrizes, floração e frutificação irregulares e supra-anuais, curta viabilidade das sementes e desenvolvimento lento na fase de viveiro (Lorenzi, 2009; Lins e Nascimento, 2010).

Diante dos gargalos na propagação da *P. peroba* por sementes, a ministaquia se apresenta como uma alternativa viável para a produção de mudas, tanto de propágulos juvenis quanto de material adulto (Araújo et al., 2019; Silva, 2019; Silva et al., 2021). Esse método permite uma produção em grande escala, em menor tempo (Baul et al., 2010) e permite a multiplicação de genótipos selecionados (Gatto, 2023). Esses fatores contribuem para a conservação e proteção dos recursos genéticos florestais, além de facilitar a multiplicação de materiais genéticos selecionados.

Classificada como secundária tardia (Archanjo et al., 2012) e de grande porte, a *P. peroba* pode atingir até 40 metros de altura e diâmetros entre 40 e 80

centímetros (Lorenzi, 2009). Devido à sua imponência na floresta, essa espécie necessita de um sistema radicular robusto para garantir sua sustentação e absorção de nutrientes.

As características distintas entre os sistemas radiculares pivotante e adventício destacam-se não apenas em suas origens, mas também em suas funções e padrões de desenvolvimento. O sistema radicular pivotante segue predominantemente o padrão genético da espécie, enquanto o adventício apresenta maior flexibilidade morfofisiológica. Ambos podem ser influenciados pelas condições ambientais, seja como resposta adaptativa a demandas específicas, seja como resultado da plasticidade fenotípica, refletindo as condições do ambiente sem, necessariamente, corresponder a uma demanda funcional (Lynch, 1995; Fitter, 2002; de Dorlodot et al., 2007).

As raízes pivotantes são responsáveis por ancorar a árvore no solo. Geralmente mais grossas, crescem em profundidade, proporcionando estabilidade à planta. Na fase embrionária, a radícula se desenvolve e forma a raiz primária, que se torna a raiz central de sustentação. Essas raízes são essenciais para explorar camadas profundas do solo, acessando reservas de água necessárias em períodos de seca (Bellini et al., 2014). Em noz-pecã (*Carya illinoensis*), por exemplo, a raiz pivotante é dominante e poucas raízes laterais surgem, mas o sistema se adapta através do aumento do crescimento primário e de ramificações adicionais caso a raiz principal seja podada (Zhang et al., 2015).

As raízes de absorção, ou raízes laterais, são finas e ramificadas, surgindo a partir da raiz principal. Essas raízes se desenvolvem do periciclo e passam por etapas de iniciação, emergência e ativação do meristema, possibilitando a exploração eficaz dos recursos do solo pela planta (Kerk e Sussex, 2012).

Por outro lado, as raízes adventícias se formam em outras partes da planta, como caules, hipocótilos e folhas. Esse processo envolve células que não foram programadas originalmente para a formação de raízes e exige interações hormonais e moleculares complexas. As raízes adventícias são fundamentais para o acesso a água e nutrientes em solos compactados ou em condições nas quais a raiz primária não consegue cumprir essa função de forma adequada (Bellini et al., 2014).

Esse desenvolvimento ocorre através da ativação de células cambiais ou meristemáticas próximas aos tecidos vasculares do caule, que se dividem

assimetricamente para formar novas raízes (Singh e Ansari, 2014). Em condições extremas, como inundações, algumas espécies são conhecidas por priorizar a formação de raízes adventícias, uma adaptação que lhes permite sobreviver e prosperar em ambientes inundados (Kahn et al., 1985).

Mudas obtidas por propagação vegetativa apresentam estruturas radiculares variáveis, o que pode afetar a absorção de água e nutrientes e, conseqüentemente, o crescimento inicial das plantas (Paradizo et al., 2015). Essas alterações podem envolver mudanças na emissão de raízes adventícias e na capacidade de forrageamento do solo (Silva e Delatorre, 2009). Podem ocorrer também modificações no comportamento fisiológico, como menor eficiência fotossintética, variações no balanço hormonal e redução no crescimento da raiz principal, em função de sistemas radiculares menos desenvolvidos ou adaptados (Geiss et al., 2018). No entanto, essas informações ainda não estão disponíveis na literatura sobre a *P. peroba*.

Projeções sobre mudanças climáticas indicam uma redução antecipada na sobrevivência das mudas, em razão do aumento na frequência e na severidade de eventos de seca em ecossistemas florestais (Seager et al., 2007; Davis et al., 2019).

O avanço na compreensão dos fatores exógenos e dos mecanismos que influenciam a arquitetura do sistema radicular (RSA) em plantas é essencial para futuras iniciativas de reflorestamento com o objetivo de desenvolver protocolos padronizados de crescimento em viveiros, visando a produção de mudas de alta qualidade, com atributos radiculares desejáveis e uma elevada taxa de sobrevivência pós-plantio (Toca et al., 2022).

O estudo do crescimento radicular em mudas clonais e seminíferas de *P. peroba* é essencial para entender a adaptabilidade da espécie em diferentes ambientes, otimizando programas de reflorestamento e conservação. A hipótese deste estudo é que o desenvolvimento do sistema radicular de plantas clonais, estabelecido por miniestaquia, poderá replicar o desempenho estrutural e funcional das raízes pivotantes das plantas originadas de sementes. Espera-se que as raízes de origem clonal apresentem características morfológicas que proporcionem à árvore suporte e eficiência equivalentes na absorção de água e nutrientes

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo deste trabalho foi investigar o desenvolvimento comparativo dos sistemas radiculares de plantas de *P. peroba* originadas por sementes e por miniestaquia, e como influenciam o desenvolvimento inicial das plantas, tanto na fase de viveiro, quanto após o plantio em campo.

2.2. Objetivos específicos

- Avaliar o crescimento e as características morfológicas do sistema radicular de mudas clonais e seminais de *P. peroba*;
- Comparar o crescimento do sistema radicular de mudas de *P. peroba*, produzidas por sementes e miniestaquia, em vasos e no campo;
- Verificar a influência do método de propagação no incremento das características morfométricas da parte aérea após o plantio.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. *Paratecoma peroba* (Record) Kuhlmann.

A família botânica Bignoniaceae é distribuída em regiões tropicais e subtropicais e compreende 82 gêneros, com aproximadamente, 827 espécies de árvores, arbustos e lianas (Lohmann e Ulloa, 2011). De acordo com Antunes et al. (2022) o Brasil apresenta o maior centro de diversidade, onde são encontrados 34 gêneros e 420 espécies dessa família, sendo 212 nativas (Lohmann et al., 2020), que se destacam por sua elevada importância econômica, tanto no fornecimento de madeiras nobres, quanto no uso ornamental.

Uma das espécies de grande valor econômico e ambiental pertencente a esta família é a *Paratecoma peroba* (Record) Kuhlmann. Conhecida popularmente como peroba-do-campo, peroba-amarela, ipê-peroba e peroba-de-campo, essa espécie tem sua ocorrência natural no Brasil.

A *P. peroba* é uma espécie endêmica do bioma Mata Atlântica (Martinelli e Moraes, 2013), sendo encontrada em florestas úmidas de terras baixas (Engel e Martins, 2005) e também em florestas estacionais semidecíduais (Silva e Nascimento, 2001). Sua ocorrência é mais frequente nas regiões Sudeste e Nordeste, especificamente nos estados do Rio de Janeiro, Minas Gerais, Espírito Santo e Bahia (Lohmann, 2024).

Em áreas naturais, a espécie geralmente apresenta um longo fuste que suporta uma pequena copa, podendo atingir, na mata, uma altura de até 40 metros e um tronco com diâmetro variando entre 40 e 80 cm (Kageyama e Castro, 1989; Lorenzi, 2009).

As folhas são compostas, com uma estrutura foliar que mede aproximadamente 7 a 10 cm de comprimento, apresentando 5 pares de folíolos localizados na extremidade da haste. Os folíolos têm formato elíptico, medindo entre 10 e 20 cm de comprimento e 3 a 7 cm de largura. As flores da espécie são brancas, dispostas em cachos, com formato tubular e possuem dois estames que medem 2,5 cm de comprimento (Flora do Brasil, 2020).

Os frutos apresentam comprimento que varia de 14 a 32 cm e largura de 16 a 28 mm. Eles formam uma cápsula bivalvar, que abriga diversas sementes. As sementes estão envolvidas por uma membrana translúcida e seca, medindo aproximadamente 2 cm (Flora do Brasil, 2020).

As sementes de *P. peroba* não necessitam de tratamento para a superação da dormência (Medeiros, 2001); no entanto, apresentam curta viabilidade após a colheita (Dias, 2011). Silva (2019) também destaca que outra complicação está relacionada à obtenção de sementes dessa espécie, uma vez que os frutos são deiscentes e as sementes são dispersas pelo vento. Por isso, é necessário realizar um monitoramento contínuo para coletá-las diretamente na copa antes da abertura, o que torna o trabalho bastante oneroso.

Lins e Nascimento (2007) mencionam que a espécie segue um padrão supra anual para floração e frutificação, com intervalos de dois anos ou mais entre cada floração. Segundo Newstrom et al. (1994), um padrão reprodutivo é considerado supra-anual quando há um único ciclo de reprodução ao longo de vários anos. Isso significa que ocorre um período de reprodução intensa, seguido por anos com baixa ou nenhuma atividade reprodutiva.

A floração ocorre exclusivamente na estação seca (Gentry, 1974). Alguns estudos sugerem que a floração nesse período é favorecida por fatores ambientais como o início das chuvas e o aumento da temperatura. Essas condições aceleram a decomposição da serrapilheira, proporcionando mais nutrientes para as plantas (Pedroni et al., 2002). A ausência de chuvas intensas evita danos às estruturas florais, enquanto a redução da atividade de herbívoros diminui o risco de predação das flores (Morellato et al., 1989; Nunes et al., 2005).

A frutificação tem início no começo da estação chuvosa e sua maturação completa e dispersão ocorre apenas no início da estação chuvosa do ano seguinte. Os frutos maduros aparecem nos meses de transição da estação chuvosa para seca, onde se tem a perda de umidade, um processo importante para a maturação dos frutos em algumas famílias, como a Bignoniaceae (Lins e Nascimento, 2010).

A madeira é considerada densa ($0,76 \text{ g/cm}^3$), medianamente resistente e de boa durabilidade (Rolim et al., 2018). Pode ser utilizada como revestimento decorativo, mobiliário de luxo e na construção naval, devido à sua durabilidade prolongada.

Quanto à coloração, suas tonalidades variam do bege-amarelado ao pardo

acastanhado (Brasil, 2014). No passado, foi amplamente explorada por atividades extrativistas, impulsionada por suas qualidades tecnológicas e pela beleza natural de sua madeira (Lins e Nascimento, 2010).

Devido à grande exploração sofrida pela espécie, ela atualmente encontra-se na “Lista de Espécies em extinção” (CNCFlora, 2023). Silva e Nascimento (2001) estimaram que havia na ocasião aproximadamente 8.500 indivíduos adultos na Mata Atlântica.

O estudo de Gomes et al. (2021) discute os desafios na regeneração de algumas espécies, destacando a importância de estratégias de manejo para garantir a sobrevivência das árvores em ambientes cada vez mais fragmentados. Para a *P. peroba*, são necessárias medidas urgentes de conservação e restauração de habitats para assegurar sua continuidade a longo prazo.

Apesar da ameaça de extinção, poucos estudos abordam o crescimento radicular da espécie. Compreender esse aspecto é essencial para desenvolver estratégias ecológicas e silviculturais que promovam a conservação e o manejo sustentável de *P. peroba*.

3.2. Produção de mudas x Método de propagação

A qualidade das mudas é um fator importante para atividades relacionadas ao plantio florestal, seja com o objetivo de restauração ambiental ou de produção econômica.

A produção comercial de mudas de *P. peroba* é realizada a partir de sementes (Martins, 2011), direcionando o material para áreas de plantio voltadas à proteção ambiental. O sucesso da propagação natural depende, sobretudo, da resposta do propágulo à interferência de diversos fatores externos (Krichen et al., 2014).

A produção de mudas a partir de sementes é uma abordagem vantajosa para garantir variabilidade genética nos propágulos, especialmente diante de desafios significativos relacionados a obstáculos bioquímicos, físicos ou morfológicos (Malele et al., 2021). No entanto, o uso de sementes apresenta algumas desvantagens, como a fenologia irregular das matrizes (Dias et al., 2012)

e barreiras em determinadas espécies, incluindo a baixa produção de sementes, o curto período de vigor das sementes e o difícil acesso às matrizes.

A propagação vegetativa surge como uma técnica complementar, capaz de suprir a oferta de mudas por meio de sementes, viabilizando a produção contínua ao longo de todo o ano (Gonçalves et al., 2021). Considerando a manutenção da diversidade, essa técnica permite a constituição de um banco de matrizes com diferentes materiais genéticos selecionados, fornecendo um leque diversificado de material para a produção de mudas, além de possibilitar a seleção de árvores com características fenotípicas superiores para fins comerciais.

Nos últimos anos, tem-se observado um aumento significativo na realização de pesquisas relacionadas à propagação vegetativa de espécies nativas brasileiras (Carvalho et al., 2012; Stuepp et al., 2018; Silva et al., 2021; Silva et al., 2021). Apesar de grande parte dessas pesquisas ainda ser conduzida de maneira experimental, a miniestaquia ganhou destaque na propagação de espécies florestais (Oliveira et al., 2016; Araújo et al., 2019; Berude et al., 2020).

Este método tem se mostrado eficaz na fixação de genótipos selecionados, trazendo benefícios ao setor florestal, especialmente na criação de plantações clonais produtivas, que melhoram a qualidade da madeira e seus derivados (Bandeira et al., 2007; Xavier et al., 2009). Essas inovações são uma contribuição significativa para a produção sustentável de recursos florestais no Brasil.

A miniestaquia utiliza brotações como propágulos, originadas de minicepas obtidas por estaquia convencional ou sementes. Estudos mostram que minicepas de sementes rebrotam bem após a poda apical e que as miniestacas têm bom percentual de enraizamento sem promotores exógenos (Silva, 2019; Araújo et al., 2019), tornando a técnica viável para uso comercial.

Na propagação vegetativa, o tipo de estaca utilizada influencia o enraizamento, assim como a idade dos propágulos e as condições ambientais no viveiro (Fachinello et al., 2005; Alfenas et al., 2009; Hartmann et al., 2011; Xavier et al., 2013; Silva et al., 2021; Silva et al., 2021).

A técnica de miniestaquia oferece várias vantagens, como a otimização da área produtiva, a redução de custos com transporte e coleta de brotações, e a melhoria da eficiência nas práticas de manejo no minijardim, incluindo irrigação, nutrição, manutenção e controle de pragas e doenças (Silva, 2019). Além disso, contribui para a qualidade, rapidez e taxa de enraizamento das miniestacas, devido

à exploração do potencial juvenil dos propágulos utilizados (Xavier et al., 2003).

Pesquisas demonstram a viabilidade deste método para algumas espécies florestais nativas e exóticas, que obtiveram sucesso no enraizamento por meio dessa técnica de propagação. Destacam-se: *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunnii* (Brondani et al., 2010; Brondani et al., 2012; Benin et al., 2013) *Anadenanthera macrocarpa* (Dias et al., 2015), *Cedrela fissilis* (Xavier et al., 2003), *Handroanthus heptaphyllus* (Oliveira et al., 2016), *Peltophorum dubium* (Mantovani et al., 2017) e *Tibouchina sellowiana* (Fragoso et al., 2017).

Embora a miniestaquia seja uma técnica viável para a propagação de *P. peroba*, utilizando materiais juvenis ou resgate vegetativo de indivíduos adultos (Araújo et al., 2019; Silva et al., 2021), não há informações sobre as diferenças no crescimento inicial dessas mudas clonais no campo e suas consequências. Não existem relatos sobre a formação do sistema radicular em comparação com mudas produzidas por sementes, o que é fundamental, especialmente para plantas de grande porte.

3.3. Sistema radicular de plantas seminíferas

As raízes são classificadas conforme o local de onde emergem, pois, muitas características funcionais dos sistemas radiculares estão diretamente relacionadas a essa posição (Zobel e Waisel, 2010; Zobel, 2011; Freschet et al., 2021).

O sistema radicular das árvores originadas de sementes é formado por dois tipos principais de raízes: as raízes de sustentação, ou pivotantes, que são mais grossas, e as raízes de absorção, ou laterais, que são mais finas (Gonçalves e Benedetti, 2000).

O desenvolvimento da raiz de sustentação ocorre na fase embrionária, por meio da regulação da divisão e expansão celular (Lynch et al., 2012). A raiz primária se origina da radícula, a raiz embrionária central, que forma o eixo principal do sistema radicular (Zobel e Waisel, 2010; Wang et al., 2016; Freschet et al., 2021).

A radícula é a primeira raiz formada durante a embriogênese, presente no embrião da semente. Ao germinar, a planta jovem desenvolve a raiz primária a

partir do alongamento da radícula. Essa raiz pode seguir diferentes direções, mas geralmente se torna uma raiz pivotante ou de sustentação central (Bellini et al., 2014).

A formação inicial das raízes de sustentação é determinante, pois permite que o sistema radicular alcance rapidamente as camadas mais profundas do solo em busca de água, vital para árvores em períodos de seca (Barbeta e Peñuelas, 2017; Zadworny et al., 2019; Mackay et al., 2020). Essas raízes passam por um processo dinâmico que influencia o desenvolvimento e a estrutura do sistema radicular, incluindo a formação de raízes laterais (Clowes, 2000).

À medida que as plantas crescem, suas necessidades de água e nutrientes variam, exigindo que os sistemas radiculares se ajustem dinamicamente para atender a essas demandas (Di Iorio et al., 2005).

A capacidade das raízes de sustentação de atravessar camadas compactas do solo está relacionada ao tamanho maior do ápice e ao rápido alongamento que ocorre logo atrás da coifa (Clowes, 2000). As células meristemáticas dessas raízes apresentam vantagens fisiológicas e mecânicas em comparação com as células meristemáticas de outros tipos, como as raízes laterais (Perilli et al., 2012).

As raízes laterais, originadas do periciclo, são essenciais para o desenvolvimento do sistema radicular e apresentam morfologia semelhante à da raiz primária (Dolan et al., 1993). Elas aumentam a área de contato das raízes, permitindo que a planta explore mais eficientemente o solo. O desenvolvimento das raízes laterais ocorre em várias etapas: pré-iniciação, iniciação, emergência e ativação do meristema no primórdio da raiz lateral (Torres-Martínez et al., 2019).

Essas raízes se formam após o estágio embrionário e são essenciais para a estrutura final do sistema radicular (Vilches-Barro e Maizel, 2015). Elas se originam de células fundadoras no periciclo, próximas ao xilema (Chouhan et al., 2023).

Durante a iniciação, as células do periciclo sofrem divisões periclinais e anticlinais, formando uma protuberância que se torna o primórdio da raiz lateral. À medida que a raiz em desenvolvimento cresce, ela atravessa o córtex da raiz principal. Antes de emergir, o meristema apical e a coifa já estão diferenciados. Nesse estágio, a endoderme se divide perpendicularmente à superfície do tecido,

formando uma camada de células ao redor do primórdio; e pouco antes da nova raiz emergir, esse tecido endodérmico se desintegra (Primo-Millo et al., 2020).

As raízes laterais são essenciais na captação de água e nutrientes, devido à sua alta atividade metabólica e por serem menores conseguem explorar com maior facilidade o solo (Gonçalves e Benedetti, 2000). Essas ramificações adaptam-se morfológicamente e fisiologicamente às variações na disponibilidade de recursos naturais (Bilbrough e Caldwell, 1997).

As raízes de sustentação, mais espessas e com uma camada protetora suberificada, proporcionam estabilidade à árvore e conduzem nutrientes e água entre as raízes e a parte aérea da planta. A principal diferença entre esses tipos de raízes reside na espessura e no desenvolvimento dos tecidos. As raízes laterais, por possuírem uma camada externa menos suberificada, são mais permeáveis à água e nutrientes (Gonçalves e Benedetti, 2000).

As raízes representam entre 20% e 40% da biomassa total das árvores (Brunner e Godbold, 2007). Em comparação com plantas herbáceas, os sistemas radiculares das árvores são mais complexos, com raízes de diversas morfologias e tamanhos. As raízes grossas (sustentação) são aquelas com mais de 2 mm de diâmetro, enquanto as raízes finas (laterais) são aquelas com menos de 2 mm de diâmetro (Pregitzer, 2002).

O sistema radicular das árvores é essencial para os ecossistemas florestais. Além de absorver água e nutrientes, as raízes detectam déficits hídricos e enviam sinais para a parte superior da planta (Hamanishi e Campbell, 2011). Compreender os mecanismos de formação do sistema radicular e a importância das raízes para o funcionamento da planta é fundamental para entender o desenvolvimento e crescimento das árvores.

3.4. Sistema radicular de plantas clonais

A reprodução assexuada é uma técnica eficaz e econômica para a produção de plantas florestais (Alvarez et al., 1989). Diversas abordagens de propagação vegetativa incluem alporquia, enxertia e estaquia, sendo esta última a

mais eficiente e lucrativa para a produção em larga escala de plantas homogêneas (Meng et al., 2019).

A formação de raízes adventícias (RAs) em estacas é um desafio para a propagação em massa devido à complexa interação hormonal, molecular e ambiental que ainda não é totalmente compreendida ou controlada (Tahir et al. 2022).

A capacidade de gerar rapidamente um grande número de RAs confere uma vantagem seletiva às espécies que se reproduzem vegetativamente, sendo esse mecanismo fundamental para a propagação clonal (Legué et al., 2014).

As raízes adventícias podem surgir em diferentes partes da planta, incluindo hipocótilos, caules, folhas, galhos e até mesmo a partir de raízes preexistentes (Li et al., 2009). Esse processo ocorre quando células não programadas para se tornarem raízes se desenvolvem em locais onde normalmente não se formariam durante o crescimento da planta (Pizarro e Díaz-Sala, 2019).

Elas têm origem endógena, derivando de células cambiais ou meristemáticas próximas aos tecidos vasculares. A formação dessas raízes inicia-se com divisões celulares assimétricas em células semelhantes ao periciclo no caule (Della Rovere et al., 2013; Atkinson et al., 2014). Quando as raízes adventícias se desenvolvem, algumas espécies podem formar estruturas semelhantes a um microcalo (Bustillo-Avendaño et al., 2018).

O processo de formação de raízes adventícias é complexo e ocorre em quatro etapas principais: (1) ativação, em que as células se tornam capazes de responder a fatores de sinalização; (2) indução, onde o ciclo celular é reativado, levando à formação de primórdios e à divisão celular; (3) ativação do primórdio radicular, com a formação contínua de novos tecidos; e (4) crescimento, em que o primórdio se alonga e se estabelecem conexões vasculares. Esses estágios de enraizamento foram observados em diversos gêneros, como microestacas de maçã, *Eucalyptus*, *Pinus* e estacas de *Populus* (De Klerk et al., 1999; Fett-Neto et al., 2001).

A formação de raízes adventícias é um processo dinâmico, no qual eventos fisiológicos celulares são continuamente redefinidos por interações regulatórias complexas. Esse processo é influenciado por sinais celulares e teciduais que variam no tempo e no espaço, pela interação entre hormônios e reguladores

transcricionais, além de mudanças na expressão gênica que organizam a estrutura dos órgãos. Esses fatores permitem que uma célula somática diferenciada reative programas específicos, levando à indução e desenvolvimento do meristema radicular adventício (Díaz-Sala, 2014; Pizarro e Díaz-Sala, 2019).

O acúmulo de auxina nos locais de enraizamento é uma resposta inicial dos tecidos com potencial para enraizar (Abarca et al., 2014; Brunoni et al., 2019). A resposta das plantas à auxina endógena varia conforme o tipo de tecido e a concentração do hormônio no propágulo. Quando aplicada em órgãos isolados, a auxina pode estimular o crescimento das raízes até um determinado nível de concentração. Após esse ponto, seu efeito pode se tornar inibidor (Taiz e Zeiger, 2004).

Pizarro e Díaz-Sala (2020) mostraram que as células parenquimáticas do xilema e as células procambiais, localizadas nos polos do xilema em estacas de hipocótilo de *Pinus radiata* com potencial de enraizamento, podem seguir diferentes caminhos morfogenéticos. Esses caminhos incluem a formação do meristema de raiz adventícia ou a diferenciação do câmbio e a formação de xilema, dependendo da presença e do fluxo direcional da auxina exógena.

A formação e manutenção do meristema radicular são reguladas pelo equilíbrio hormonal (Dello Ioio et al., 2007, Moubayidin et al., 2009). Pesquisas mostram que fatores de transcrição responsivos à auxina são importantes no controle da divisão celular, levando à diferenciação dos primórdios radiculares em estacas de espécies arbóreas (Sánchez et al., 2007, Solé et al., 2008, Vielba et al., 2011, Rigal et al., 2012).

A formação adventícia de raízes em espécies arbóreas é um processo complexo, regulado por equilíbrios hormonais, fatores de transcrição e sinais ambientais. Compreender esses mecanismos é essencial para aprimorar as técnicas de propagação vegetativa e aumentar a taxa de sucesso na propagação.

A propagação vegetativa por estacas ou miniestacas responde de maneira variada ao ambiente, esses fatores influenciam diretamente sua qualidade fisiológica e bioquímica (Osterc et al., 2009) e, consequentemente, afetam a capacidade de enraizamento das estacas (Geiss et al., 2009).

3.5. Arquitetura do sistema radicular

A arquitetura do sistema radicular diz respeito à disposição espacial das raízes, com foco na geometria e nas relações angulares entre os diferentes tipos de raízes. Essas características são altamente adaptativas e podem variar, significativamente, conforme o ambiente em que a planta se desenvolve (Lynch, 1995).

As raízes são essenciais para a absorção de nutrientes e água, além de fornecerem ancoragem para o crescimento das plantas (Shelden e Munns, 2023). Para desempenhar essas funções de forma eficaz, é necessário que as raízes consigam explorar o ambiente ao seu redor.

A arquitetura radicular é fundamental para a produtividade das plantas, pois os recursos do solo costumam ser distribuídos de forma desigual ou podem se esgotar. Portanto, a configuração do sistema radicular é essencial para que a planta consiga acessar e utilizar esses recursos (Lynch, 1995).

A literatura indica que ângulos de crescimento das raízes mais estreitos aumentam a probabilidade de aprofundamento no solo, enquanto ângulos mais abertos resultam em raízes mais superficiais. Essas diferenças são relevantes para a absorção de água e nutrientes pelas plantas (Gonçalves e Lynch, 2014). Sistemas radiculares superficiais melhoram a assimilação de nutrientes, especialmente fósforo, enquanto raízes mais profundas são mais eficientes na captação de água (Bonser et al., 1996; Ho et al., 2005).

A morfologia das raízes resulta das características genéticas da planta e das condições ambientais a que está exposta, influenciando sua capacidade de adaptação aos diversos nichos ecológicos (Yetgin, 2024).

As raízes demonstram uma constante capacidade de adaptação às variações temporais e espaciais do ambiente de crescimento, conforme destacado por Puhe (2003). Estudos de Rich e Watt (2013) indicam que propriedades do solo, como densidade e tamanho das partículas, influenciam significativamente a arquitetura do sistema radicular (RSA).

Estudos com coníferas (*Pinus* e *Picea*) mostram que mudas enriquecidas com nutrientes apresentam sistemas radiculares mais extensos e profundos, caracterizados por taxas superiores de alongamento e ramificação lateral,

conforme documentado por diversas fontes (Folk e Grossnickle, 2000; Salifu e Timmer, 2001; Boivin et al., 2004; Luis et al., 2009; Cuesta et al., 2010; Toca et al., 2019).

Essa tendência não se limita apenas às coníferas. Espécies de folhas largas, como *Quercus rubra* (Salifu et al., 2008) e *Platanus occidentalis* (Luxmoore et al., 1993) também mostraram aumento no desenvolvimento radicular pós-plantio quando originadas de mudas enriquecidas com nutrientes (Toca et al., 2022). Esse efeito pode ser atribuído à maior disponibilidade de nutrientes na fase de viveiro, conferindo às mudas maior vigor inicial e favorecendo o acúmulo de reservas de carboidratos e macronutrientes essenciais.

Essas modificações fenotípicas indicam estratégias de crescimento que otimizam a eficiência das raízes na busca por nutrientes no solo, garantindo um fornecimento contínuo de água para as mudas em desenvolvimento (Toca et al., 2022).

Em situações de deficiência de nutrientes na camada superficial do solo, algumas espécies florestais adaptam o crescimento das raízes, direcionando-as para camadas mais profundas em busca de nutrientes. Quando a disponibilidade de nutrientes na superfície é adequada, as raízes ajustam-se para otimizar a absorção nessa região (Nyam-Osor et al., 2021; Montagnoli et al., 2022).

Em solos pobres em nutrientes, observa-se a inibição do desenvolvimento do sistema radicular (Tang et al., 2023). Essa limitação afeta significativamente a arquitetura das raízes, como resposta adaptativa. Durante períodos de seca, estudos como os de Zhou et al. (2018) mostraram uma redução na densidade do comprimento das raízes. Curiosamente, essa diminuição é compensada por um aumento no diâmetro, sugerindo uma estratégia de sobrevivência em condições adversas. Esses achados ressaltam a complexidade das respostas radiculares das plantas, evidenciando a plasticidade e adaptação em ambientes desafiadores.

O crescimento das raízes é fortemente influenciado por informações ambientais, que são importantes para a taxa e orientação do crescimento, além de determinar os locais e momentos ideais para a formação de novas raízes laterais (Malamy, 2005). Compreender o processo de formação e desenvolvimento das raízes, assim como sua plasticidade, é fundamental para garantir a produtividade em condições subótimas no ambiente radicular (de Dorlodot et al., 2007; Den Herder et al., 2010; Zhu et al., 2011).

Isso ocorre porque um sistema radicular bem desenvolvido melhora a absorção de água e nutrientes, permitindo que a planta cresça de forma eficiente mesmo em solos de baixa fertilidade, compactados ou com restrições hídricas. Raízes adaptáveis favorecem interações benéficas com microrganismos do solo, como fungos micorrízicos e bactérias fixadoras de nitrogênio, que auxiliam na nutrição da planta. Compreender os mecanismos que regulam o crescimento radicular possibilita otimizar o manejo florestal, resultando em maior produtividade das plantas.

Diversas características do sistema radicular são fundamentais para o crescimento e a sobrevivência das plantas, especialmente nas fases iniciais de seu ciclo de vida, quando estão mais vulneráveis ao estresse ambiental (Pulido et al., 2010; Sáenz-Romero et al., 2020).

Algumas plantas ajustam o ângulo de suas raízes laterais para explorar diferentes camadas do solo, já que a distribuição de nutrientes e recursos hídricos não é uniforme em todos os horizontes (Forde e Lorenzo, 2001; Beidler et al., 2015; Koevoets et al., 2016).

Segundo Gonçalves e Lynch (2014), o aspecto mais importante a ser compreendido sobre as plantas são os fatores que influenciam seu rendimento. Um bom desempenho na produção, geralmente resulta de um sistema radicular robusto, que é fundamental para processos abaixo da superfície do solo, como a absorção de água e nutrientes.

As complexidades do estudo das raízes resultaram em um acúmulo de conhecimento inferior em comparação com outras partes das plantas (Gonçalves e Lynch, 2014). Essa lacuna se deve à localização subterrânea das raízes e à opacidade dos solos, que representam um obstáculo significativo para a pesquisa (Bontpart et al., 2020).

Comparar plantas da mesma espécie quanto ao enraizamento seminífero e adventício permitirá entender melhor o potencial das mudas produzidas por miniestaquia para diferentes condições de plantio e manejo.

3.6. Plasticidade do sistema radicular

Os organismos habitam ambientes com recursos distribuídos de maneira desigual. Em resposta, os que podem se mover buscam alimento e abrigo (Perry e Pianka, 1997). Por outro lado, os organismos imóveis, como as plantas, precisam ajustar suas estratégias por meio da plasticidade e morfologia para enfrentar a variabilidade ambiental (Kroon e Hutchings, 1995).

As plantas, por serem enraizadas, devem desenvolver adaptações para crescer em ambientes diversos. O sistema radicular apresenta notável capacidade de adaptação, permitindo respostas às condições ambientais variáveis. Essa plasticidade se manifesta na habilidade de expandir e modificar a rede de raízes, formando novas ramificações e estendendo raízes secundárias ou adventícias conforme necessário, otimizando a absorção de recursos e garantindo a sobrevivência em condições adversas (Biedrzycki et al., 2010).

Plantas semíníferas exibem alta plasticidade radicular, essencial para a exploração do solo em busca de nutrientes e água. A evolução da ramificação das raízes possibilitou significativa plasticidade fenotípica, permitindo ajustes na formação de raízes laterais ao longo da raiz principal (Motte e Beeckman, 2019).

As plantas clonais demonstram plasticidade radicular variável devido à dependência da formação de raízes adventícias, cuja emissão, distribuição e arquitetura são altamente influenciadas por estímulos ambientais e condições hormonais locais. Essa plasticidade se manifesta na capacidade de modificar o padrão de crescimento e o posicionamento das raízes, ajustando a densidade, profundidade e ramificação do sistema radicular em resposta às características do ambiente, o que contribui para a ocupação e exploração eficiente de diferentes condições edáficas (Fassio et al., 2016; Martínková et al., 2018).

Singh et al. (2014) analisaram o desenvolvimento do sistema radicular de *Shorea robusta* em plantas clonais e observaram variações na morfologia e no crescimento das raízes, possivelmente relacionadas à origem das plantas. Essas observações são fundamentais para compreender como os diferentes métodos de propagação influenciam o desenvolvimento radicular das espécies e, conseqüentemente, seu desempenho no campo.

A plasticidade do sistema radicular é bem documentada em condições de estresse abiótico, como seca e baixa disponibilidade de nutrientes. As plantas podem modificar a arquitetura das raízes, desenvolvendo raízes mais profundas ou expandindo-se lateralmente (Karlova et al., 2021).

Essas respostas estão relacionadas à interação entre nutrientes e fitormônios, como demonstrado por Jia et al. (2022), que analisaram a influência dos sinais sistêmicos e locais na plasticidade radicular. Eles descobriram que fitormônios, como auxina, citocininas e ácido abscísico, atuam como intermediários na tradução desses sinais, regulando processos como a divisão celular, o alongamento das raízes primárias e laterais e a formação de pelos radiculares. Identificaram que a sinalização hormonal é altamente específica para cada nutriente, permitindo que as plantas ajustem seu crescimento e otimizem a captação de recursos em ambientes com disponibilidade variável de nutrientes.

Mudanças fisiológicas também desempenham um papel vital. Durante o estresse hídrico, o aumento da produção de ácido abscísico (ABA) promove o fechamento dos estômatos, reduzindo a perda de água por transpiração, enquanto a arquitetura radicular é ajustada para acessar camadas mais profundas do solo (Fonta et al., 2022). Em condições de salinidade, as raízes ajustam o transporte de íons para manter um balanço favorável de Na^+/K^+ (Koevoets et al., 2016).

A dinâmica e a arquitetura do crescimento radicular são fundamentais para o estabelecimento e desempenho de mudas florestais. Toca et al. (2022) destacam que a plasticidade fenotípica das raízes permite intervenções de manejo que otimizam os atributos radiculares desejáveis, promovendo melhor desempenho no plantio.

No nível molecular, a plasticidade do sistema radicular é governada por vias genéticas e hormonais. Hormônios como auxina e citocininas modulam o crescimento das raízes, promovendo alongamento e diferenciação celular (Rani Debi et al., 2005; Iwama et al., 2007; Wu et al., 2007). Em condições de baixa disponibilidade de fósforo ou nitrogênio, a redistribuição assimétrica de auxina regula o ângulo de crescimento das raízes laterais (Roychoudhry e Kepinski, 2022).

A plasticidade radicular é essencial para a adaptação das espécies florestais e agrícolas, especialmente frente ao aumento dos estresses ambientais causados pelas mudanças climáticas (Koevoets et al., 2016; Zheng et al., 2023). Experimentos com *Acer pseudoplatanus* e *Fagus sylvatica* mostram traços

radiculares altamente plásticos em resposta a manchas ricas em nutrientes, evidenciando a importância dessas adaptações para o desenvolvimento das plantas (Lak et al., 2020).

Adaptações morfológicas incluem o ajuste do comprimento, diâmetro e padrões de ramificação das raízes em resposta às condições ambientais. Em solos pobres em nutrientes, as raízes podem exibir maior ramificação lateral superficial, para otimizar a captação de recursos (Koevoets et al., 2016). Ângulos de crescimento rasos ou profundos são adaptativos, conforme a disponibilidade de água e nutrientes como fósforo e nitrogênio (Lynch, 2013).

Compreender a plasticidade do sistema radicular exige estudar a interação entre estrutura, genética e ambiente (Fromm, 2019). Esse conhecimento é fundamental para o desenvolvimento de técnicas que otimizem o desempenho das plantas no campo.

3.7. Fatores que afetam o crescimento do sistema radicular

Os fatores bióticos e abióticos afetam a fisiologia, a adaptação e a dinâmica de um ecossistema. Os fatores bióticos referem-se às interações entre seres vivos, como plantas, animais, fungos e bactérias. Por outro lado, os fatores abióticos incluem os componentes não vivos, como água, solo, luz, temperatura e condições climáticas.

Os fatores bióticos influenciam o desenvolvimento das raízes. Estudos indicam que a identidade das espécies vizinhas pode alterar as características das raízes finas em florestas mistas. Em florestas com espécies mistas, *Fagus sylvatica* (faia) ajusta a profundidade de suas raízes, produzindo mais raízes superficiais enquanto em florestas monoespecíficas suas raízes tendem a crescer mais profundamente. Essas mudanças afetam os ciclos biogeoquímicos e a dinâmica do carbono no solo, pois influenciam a distribuição de matéria orgânica e a atividade microbiana. A competição por recursos em monoculturas é mais intensa, o que altera as taxas de mortalidade e respiração das raízes, impactando diretamente os processos do ciclo do carbono (Zwetsloot et al., 2019). A interação entre plantas vizinhas reflete essa disputa por recursos subterrâneos, levando o sistema radicular

a modificar sua arquitetura para otimizar a absorção de nutrientes e água.

A atividade alelopática das raízes pode ser afetada por fatores bióticos. Em florestas com intensa recreação humana, houve uma alteração significativa na exsudação de compostos pelas raízes, prejudicando a biomassa de raízes finas, o que pode levar à morte do sistema radicular em áreas de alta densidade recreativa, principalmente devido à privação de oxigênio e à toxicidade resultante da transformação dos exsudatos radiculares (Scherbina, 2021).

Fungos e microrganismos podem prejudicar o sistema radicular. Embora muitas associações micorrízicas favoreçam o desenvolvimento das raízes, patógenos, como fungos parasitas, podem causar a morte das raízes.

Um estudo sobre o declínio do *Picea abies* (abeto norueguês) nas Montanhas dos Gigantes (Europa Central) revelou que o sistema radicular dessas árvores foi severamente afetado pela infestação de *Armillaria*, um fungo parasita. Essa infestação resultou em raízes menores, malformadas e com menor número de raízes finas, evidenciando o impacto destrutivo de fatores bióticos patogênicos no crescimento radicular (Mauer e Palátová, 2010). Além dos fungos, a infestação por insetos, como o besouro da casca, pode prejudicar o sistema radicular, alterando a composição das espécies micorrízicas e afetando o crescimento das raízes. Isso é especialmente crítico em árvores jovens, que dependem dessas associações simbióticas para seu processo de desenvolvimento (Veselá et al., 2019).

Os fatores abióticos, como água, solo e condições atmosféricas, influenciam a morfologia e a função do sistema radicular. A disponibilidade de água é determinante para o crescimento das raízes. Estudos sobre *Eucalyptus* e *Corymbia* demonstram que essas espécies adaptam suas raízes conforme a tolerância ao déficit hídrico (Souza e Collichio, 2013; Gonçalves et al., 2013; Assis et al., 2015). Em condições de seca, destaca-se o desenvolvimento das raízes pivotantes, enquanto a espessura das raízes aumenta para melhorar a absorção de água em profundidades maiores no solo (Ávila, 2020).

A composição do solo é um fator abiótico importante que também influencia a biomassa radicular e a dinâmica dos bancos de sementes. Em florestas secundárias e primárias da Amazônia, constatou-se uma diferença significativa na biomassa de raízes finas, sendo maior nas florestas primárias. Essas variações refletem como as condições do solo e as interações abióticas afetam o sistema

radicular e a regeneração de espécies arbóreas por meio dos bancos de sementes subterrâneos (Sousa et al., 2021).

A temperatura e a umidade do solo afetam o crescimento das raízes. Em climas frios e solos secos, o desenvolvimento radicular pode ser prejudicado. Estudos com *Pinus sylvestris* mostram que temperatura e umidade influenciam de maneira distinta os tipos de raízes, sendo as raízes pioneiras, mais resistentes à seca, fundamentais para a produtividade radicular (Ding et al., 2020).

Os incêndios florestais afetam as condições abióticas do solo, comprometendo a regeneração das plantas. Ibáñez et al. (2022) analisaram o impacto dos incêndios na regeneração de plântulas em florestas boreais, destacando a importância da severidade do fogo. Incêndios de alta intensidade tornam o solo hostil, dificultando o crescimento de novas plântulas. Em contrapartida, queimadas de baixa intensidade favorecem a presença de biota benéfica, como fungos micorrízicos, que auxiliam na regeneração de coníferas (Ibáñez et al., 2022).

Os sistemas radiculares de plantas seminíferas e clonais em espécies florestais são influenciados por fatores bióticos e abióticos. A competição por recursos, as interações e as respostas ao déficit hídrico e às variações climáticas moldam a morfologia e a função das raízes. Estudar essas interações é fundamental para compreender como as plantas florestais se adaptam e sobrevivem em ecossistemas diversos, o que contribui para a adoção de estratégias de manejo e conservação florestal mais eficazes.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Localização do experimento

O experimento foi dividido em três etapas, descritas adiante. Uma parte foi realizada na casa de vegetação da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), em Campos dos Goytacazes – RJ, na Unidade de Apoio à Pesquisa (UAP) do Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias (CCTA). A outra parte ocorreu na UAP em Itaocara, RJ, na Ilha Barra do Pomba.

Campos dos Goytacazes é um município localizado na região Norte do estado do Rio de Janeiro, está a 21° 45' de latitude sul e 41° 20' de longitude oeste, com altitude de 11 m (Oliveira, 1996). Segundo a classificação de Köppen, a região possui clima Aw, caracterizado como tropical, com chuvas significativas no verão e estação seca no inverno. A temperatura média anual é de 24°C, e a precipitação média anual é de aproximadamente 997,3 mm (Leite e Gomes, 2013; Sobral et al., 2018). A umidade relativa do ar varia entre 70% e 79% ao longo do ano (Climate.Data. Org, 2024).

Itaocara é um município situado na região Noroeste Fluminense do Rio de Janeiro, possui coordenadas geográficas de 21° 39' 12" S e 42° 04' 36" W, com altitude de 60 m. O clima é classificado como Aw, com temperaturas médias entre 22°C e 33°C, sendo os meses mais quentes de dezembro a março. Nessa época, a região enfrenta intensas precipitações, com uma média anual de aproximadamente 1.105 mm (Clima Tempo, 2024, Nomad Season, 2024). A umidade relativa varia entre 75% e 81% ao longo do ano (Inmet, 2024).

4.2. EXPERIMENTO 1: AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO E CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DO SISTEMA RADICULAR DE MUDAS CLONAIAS E SEMINÍFERAS EM CASA DE VEGETAÇÃO

4.2.1. Produção das mudas seminíferas

Foram produzidas 100 mudas seminíferas a partir de sementes de *P. peroba*, adquiridas da empresa Floresta Viva Ltda, coletadas em matrizes no município de Baixo Guandu, ES (19° 31' 08" S, 41° 0' 57" O). As sementes germinaram em tubetes biodegradáveis Ellepot®, que favorece o desenvolvimento de raízes laterais e preserva a arquitetura do sistema radicular (Alfenas et al., 2009; Viégas, 2015). Os tubetes foram organizados em bandejas plásticas com 48 células, contendo duas sementes em cada recipiente.

Após as plântulas atingirem dois pares de folhas definitivas, foi realizada a repicagem, deixando-se uma planta por tubete. O material foi colocado em bancadas dentro da casa de vegetação, com cobertura plástica de polipropileno de 150 micras e sombrite de 30%. A irrigação foi programada para ocorrer três vezes ao dia, com duração de 6 a 10 minutos, utilizando microaspersores do tipo bailarina. Após 30 dias de semeadura, foram selecionadas 10 mudas para avaliação, utilizando-se como critério as diferenças de altura entre plantas, sendo escolhidas 5 com maior altura e mais folhas e 5 com menor altura e menos folhas. As mudas foram lavadas para remoção do substrato e, em seguida, avaliados os seguintes parâmetros de crescimento: comprimento total das raízes laterais de primeira ordem (cm), número de raízes laterais de primeira ordem e número de folhas. Durante o experimento, foi realizada a adubação das plantas utilizando solução de sulfato de amônio, preparada na proporção de 10 g do produto dissolvidos em 1 litro de água. A aplicação foi feita na quantidade de 10 mL por planta, sempre que foram observados início de clorose. Após a primeira avaliação do sistema radicular, manteve-se um intervalo de 30 dias para a realização da segunda. Após 60 dias, o intervalo foi reduzido para 20 dias, com o objetivo de permitir um monitoramento mais frequente e preciso do crescimento radicular. A avaliação do crescimento do sistema radicular da espécie foi realizada até 220 dias após a semeadura.



Figura 1 – Sementes de *P. peroba* (A) e plântulas, aos 30 dias após a semeadura (B).

4.2.2. Produção de mudas clonais

Utilizando a técnica de miniestaquia, foram produzidas 100 mudas clonais de *P. peroba*. As miniestacas apicais, com aproximadamente 7 cm de comprimento, foram coletadas de um minijardim multiclonal estabelecido em vasos de 7 L, medindo 33 cm de altura, 16 cm de largura na boca e 11 cm de largura na base (fundo), mantidos em uma casa de vegetação. No estaqueamento, as miniestacas apicais tiveram a base imersa em ácido indolbutírico (AIB), na concentração de 200 mg L⁻¹, por 20 segundos. Em seguida, foram colocadas em Paper pots e acondicionadas em bandejas plásticas com 48 células. O material foi transferido para uma câmara de nebulização, coberta com plástico de polipropileno de 150 µm e tela aluminizada (Aliminet®), com 30% de sombreamento, sob nebulização intermitente, programada para 20 segundos a cada 15 minutos. As miniestacas permaneceram nesse ambiente por 60 dias, quando em seguida as mudas enraizadas foram conduzidas para casa de vegetação onde foi realizada a primeira avaliação, adotando como critério a escolha de 5 dentre elas com maior altura e mais folhas e 5 com menor altura e menos folhas. Nessa etapa, foram avaliados o comprimento total das raízes adventícias (cm), o número de raízes adventícias e o número de folhas emitidas. Após a primeira avaliação manteve-se um intervalo de

20 dias entre as demais avaliações, totalizando um período de 220 dias, o que permitiu acompanhar o desenvolvimento das raízes ao longo do tempo. O manejo e adubação adotados foram os mesmos utilizados para as plantas seminíferas (item 4.2.1).

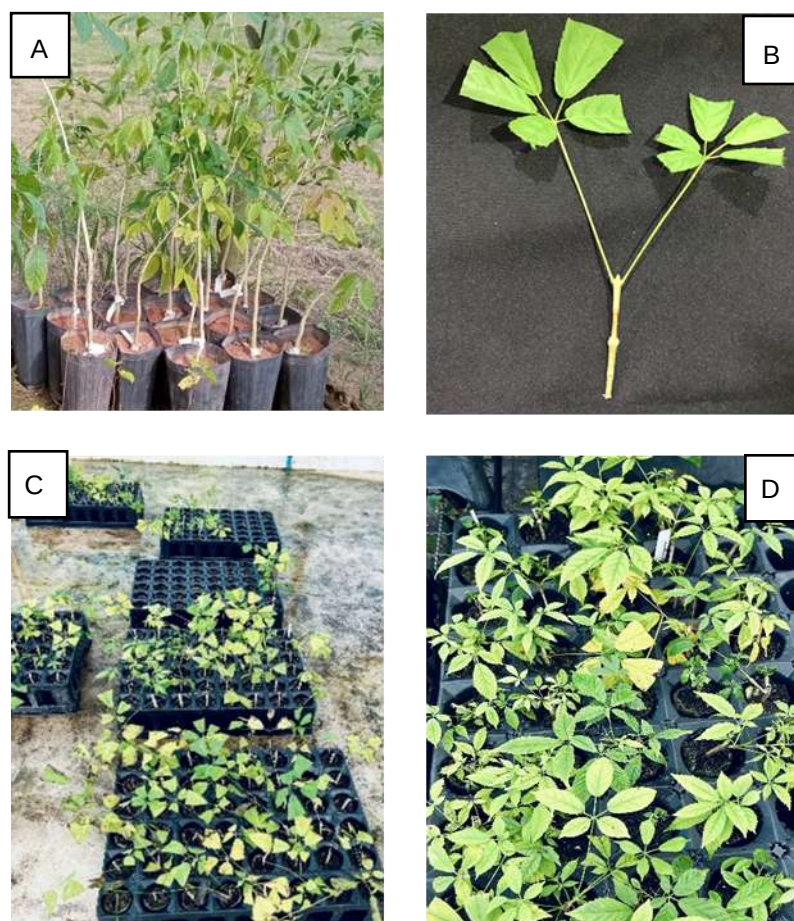


Figura 2 – Minicepas (A); Miniestaca apical (B), Bandejas estaqueadas em câmara de nebulização (C) e mudas de *P. peroba* produzidas por miniestaqueia (D).

4.2.3. Avaliação da velocidade de crescimento de raízes de mudas clonais e seminíferas

Foi avaliado o crescimento das raízes laterais de plantas propagadas por sementes e das raízes adventícias de plantas propagadas por miniestacas, ambas com o mesmo tempo de cultivo, para comparar a velocidade de crescimento do sistema radicular em condições controladas. Cinco mudas de cada tratamento

(seminíferas e clonais) foram colocadas em uma caixa de acrílico transparente preenchida com substrato florestal comercial (Basaplant®). As dimensões da caixa eram 70 cm de profundidade, 30 cm de altura e 20 cm de largura, e ela foi posicionada com uma leve inclinação, de modo a facilitar o direcionamento do crescimento radicular em direção à superfície transparente. Para monitorar o crescimento das raízes, uma folha de plástico PVC foi fixada na parede externa da caixa, e uma lona preta foi utilizada para bloquear a passagem de luz, induzindo as raízes a crescerem mais rapidamente em direção à superfície do acrílico. À medida que as raízes laterais e adventícias se desenvolviam e alcançavam a superfície interna da parede de acrílico, suas posições eram registradas com caneta permanente na folha plástica de PVC. Essa marcação permitiu acompanhar o progresso do crescimento radicular de forma visual e precisa. As medições foram realizadas em dias alternados, ao longo de um mês e meio. Ao final do experimento, o plástico PVC foi cuidadosamente removido da parede de acrílico. Por meio de uma régua graduada em centímetros, foram realizadas medições precisas da distância que as raízes haviam crescido durante o período de observação. Esse processo permitiu não apenas quantificar o crescimento das raízes, mas também analisar a velocidade com que ocorreram as adaptações morfológicas do sistema radicular das plantas (Barroso, 1999)



Figura 3 – Caixas de acrílico cobertas com lona, utilizadas na avaliação da velocidade de crescimento das raízes de mudas clonais e seminíferas de *P. peroba* (A) e raízes monitoradas durante o crescimento (B).

4.3. EXPERIMENTO 2: AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DO SISTEMA RADICULAR DE PLANTAS CLONAIS E SEMINÍFERAS DE *Paratecoma peroba*, EM CASA DE VEGETAÇÃO

4.3.1. Plantio em vasos

Plantas seminíferas e clonais foram cultivadas em tubetes de 280 cm³ e transplantadas aos 10 meses para vasos com capacidade de 7 L (33 cm de altura × 16 cm de diâmetro na parte superior × 11 cm de diâmetro na base), contendo solo argiloso previamente adubado. Após 323 dias do plantio, 20 plantas de cada tratamento (seminíferas e clonais) foram selecionadas na casa de vegetação para avaliação do sistema radicular. As plantas foram colocadas em baldes de 10 L com água e 15 mL de soda cáustica, para facilitar a retirada do solo. No dia seguinte, o material foi lavado em água corrente e acondicionado em sacos plásticos identificados, contendo álcool 70%, e armazenado na geladeira para conservação do tecido radicular até a realização das avaliações. Foram avaliadas as seguintes características: diâmetro do colo (mm), diâmetro da base inicial das raízes (mm) (a partir do ponto onde as raízes laterais se ramificam), diâmetro médio (mm) (10 cm abaixo do diâmetro na base), diâmetro final (mm) (10 cm abaixo do diâmetro médio), número de raízes de sustentação e laterais e comprimento total da raiz de sustentação (cm).



Figura 4 - Localização dos pontos de medição do diâmetro no sistema radicular das plantas seminíferas (A) e clonais (B) de *P. peroba*. As avaliações foram realizadas

sustentação (pivotantes e adventícias) e dispostas uma cubeta de 25 x 30 cm preenchida com água para evitar sobreposições, garantindo que cada estrutura fosse capturada de forma individual. O processo foi executado de forma cuidadosa, visando manter a estrutura integral das raízes laterais. As raízes foram analisadas e quantificadas através do software WinRhizo[®] (Figura 6). Este sistema foi desenvolvido especialmente para medir raízes em diversas formas, permitindo a análise de sua morfologia, topologia, arquitetura e cores (Cascone et al., 2005). A partir deste processo, foram obtidas as variáveis: i) comprimento da raiz lateral em cm; ii) área superficial de raiz lateral em cm²; iii) diâmetro das raízes laterais em mm; iv) volume da raiz lateral em cm³; v) número de extremidades das raízes laterais (magnitude) e vi) número de bifurcações.

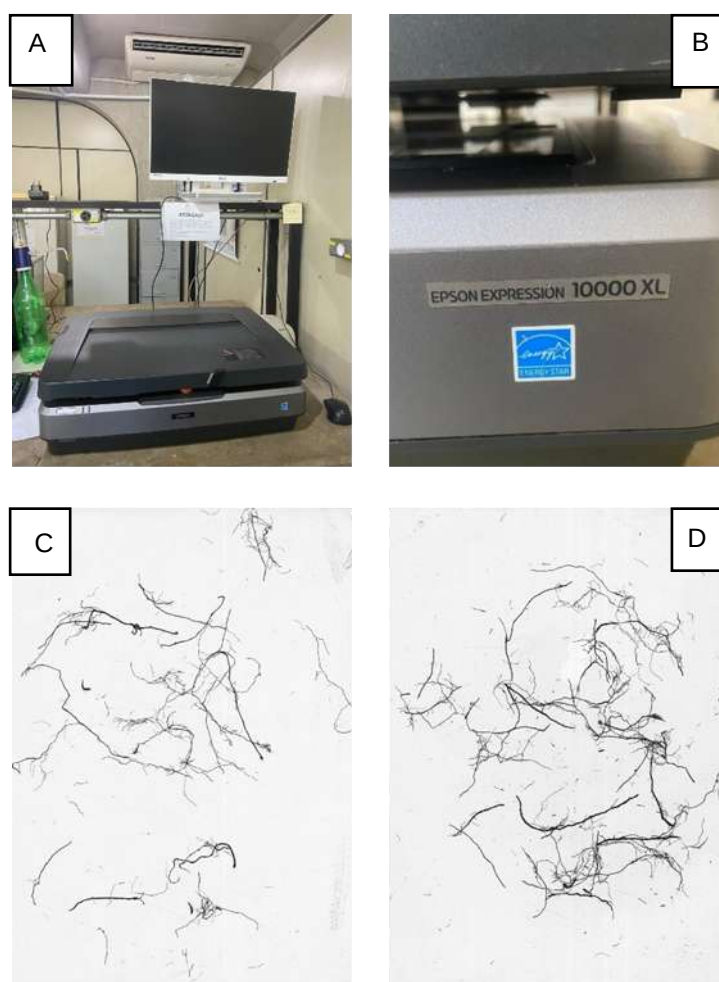


Figura 6 – Imagem do scanner utilizado para a quantificação das raízes através do software WinRhizo[®] (A e B) e as imagens obtidas para posteriores avaliações (C) raiz lateral de sementes e (D) raiz lateral de miniestaca.

Após esse procedimento, as raízes de sustentação e laterais foram colocadas em sacos de papel identificados e levadas para estufa de circulação forçada de ar a 68°C por 72 horas, sendo então pesadas, individualmente, em uma balança analítica.

4.4. EXPERIMENTO 3: AVALIAÇÃO DE PLANTAS ADULTAS CLONAIIS E SEMINÍFERAS NO CAMPO

4.4.1. Plantio no campo

Vinte mudas produzidas via seminífera e clonal, com 275 dias de idade, foram selecionadas e plantadas no campo, na unidade experimental da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), em Itaocara. O plantio foi realizado em linha, com espaçamento de 4 metros entre as plantas, em covas de 20 cm de diâmetro e 50 cm de profundidade. Foi realizada análise química do solo antes do plantio, com base nos resultados, foi recomendada a aplicação de adubação de base com fertilizante NPK (04–14–08) na quantidade de 200 g kg⁻¹. As plantas clonais e seminíferas foram alternadas na linha. As plantas estabelecidas no campo foram avaliadas a cada 3 meses quanto à altura, medida da base do caule até a gema apical, utilizando uma régua graduada, e o diâmetro do colo das plantas, com um paquímetro digital (mm). As medições foram realizadas até 15 meses após o plantio.



Figura 7 – Transporte das mudas de *P. peroba* para a UAP Itaocara (A); plantio das mudas (B); Avaliações trimestrais das plantas (C e D).

4.5. Estatística descritiva

O experimento foi conduzido em três etapas, todas utilizando o delineamento inteiramente casualizado (DIC), para garantir a homogeneidade das condições experimentais. Os tratamentos avaliados foram plantas oriundas de sementes e plantas clonais. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) ($p < 0,05$) para avaliar eventuais diferenças estatísticas entre os tratamentos, visando identificar o efeito dos fatores estudados sobre as variáveis analisadas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Experimento 1: Crescimento e morfologia do sistema radicular de mudas clonais e seminíferas de *Paratecoma peroba* em casa de vegetação

A Figura 8 ilustra o percentual de germinação de sementes e de enraizamento de miniestacas de *P. peroba*, ao longo de 220 dias após a semeadura e o estaqueamento. Por não haver réplicas na amostragem, a análise descritiva indica que houve boa germinação das sementes e que, embora mais lentamente, a produção de mudas por miniestaquia, atingiu 100% do enraizamento das miniestacas, como já observado por Silva (2019). Os resultados abaixo permitem destacar diferenças entre os dois métodos, no início do período avaliado, além de evidenciar que estes se equiparam ao longo do tempo.

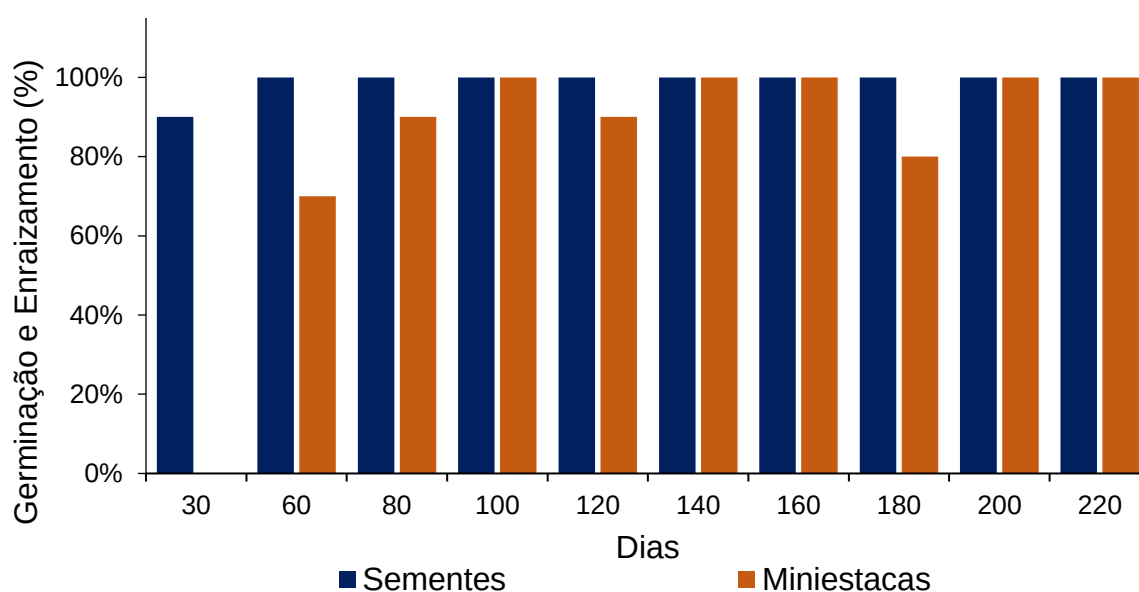


Figura 8 – Germinação de sementes e enraizamento de miniestacas de *P. peroba*, ao longo do tempo.

As mudas propagadas por sementes apresentaram 90% de germinação aos 30 dias após a semeadura, e 100% aos 60 dias.

Aos 60 dias após o estaqueamento, foram registrados 70% de enraizamento das miniestacas, que aumentou, atingindo 100% aos 100 dias após o estaqueamento, com pequenas variações na amostragem.

As miniestacas necessitam de um período maior para seu estabelecimento, pois precisam emitir raízes adventícias. Silva (2019) constatou em seus estudos que, aos 30 dias após o estaqueamento, 90% das miniestacas de *Paratecoma peroba* apresentavam calos, mas ainda sem a presença de raízes adventícias. Esse comportamento indica a necessidade de permanência em câmara de nebulização por mais tempo, conforme descrito pela autora, para assegurar as condições ideais para o enraizamento.

Os resultados obtidos no presente estudo corroboram os descritos por Silva (2019), a qual observou o início da formação de raízes adventícias em plantas clonais de *P. peroba* a partir de 40 dias após o estaqueamento, alcançando 80% de enraizamento aos 60 dias. A autora concluiu que o tempo mínimo necessário para a permanência das miniestacas em câmara de nebulização varia de 40 a 60 dias. Durante esse período, destacou que foi possível garantir um bom desenvolvimento do sistema radicular, mesmo sem o uso de reguladores de crescimento, evidenciando a eficiência natural do material genético utilizado.

No presente estudo, aos 60 dias, quando as miniestacas foram retiradas da câmara de nebulização, registrou-se um índice de enraizamento de 70%. Após essa etapa, o progresso foi contínuo, alcançando 100% de raízes formadas aos 100 dias. A partir desse ponto, os índices de enraizamento mantiveram-se estáveis até o final do período avaliado, aos 220 dias. Esses resultados indicam que, embora as miniestacas exijam mais tempo e cuidados específicos nos primeiros meses, elas eventualmente alcançam níveis de eficiência semelhantes aos das sementes em médio e longo prazo, configurando-se como um método de propagação viável para a produção comercial de mudas dessa espécie.

Os resultados apresentados têm implicações significativas para a escolha do método de enraizamento em práticas florestais. Em situações em que a rapidez do enraizamento é um fator relevante, como em condições edafoclimáticas mais desfavoráveis, o uso de sementes se destaca como a melhor alternativa devido à sua velocidade de estabelecimento. A miniestaquia pode ser útil quando se deseja flexibilidade temporal e seleção de materiais genéticos superiores.

Em relação ao número de raízes laterais de primeira ordem e adventícias, foram observadas diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) ao longo do ciclo de viveiro. As mudas propagadas por sementes apresentaram maior número de raízes laterais em comparação ao número de raízes adventícias das mudas produzidas por miniestaquia (Figura 9).

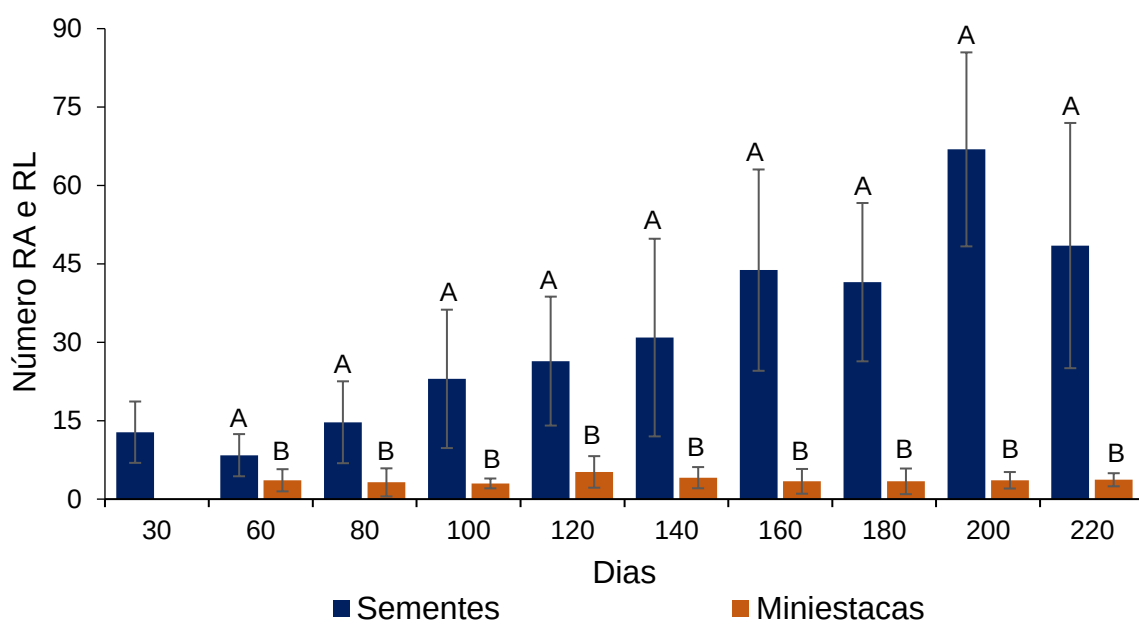


Figura 9 - Número de raízes laterais de mudas seminíferas (RL) e mudas clonais (RA) em mudas de *P. peroba*, produzidas por sementes e miniestacas, respectivamente, ao longo do tempo. *Barras representam o erro-padrão da média e letras maiúsculas comparam o método de propagação.

Com relação ao comprimento total das raízes laterais de primeira ordem e adventícias, avaliados ao longo do tempo (Figura 10), as diferenças ocorreram a partir de 160 dias ($p < 0,05$). Esse resultado indica que na fase inicial as mudas produzidas por miniestaquia apresentam um número menor de raízes. No entanto, apesar de apresentarem menor número, possuem comprimento similar às mudas produzidas por sementes, o que demonstra investimento inicial nas raízes de sustentação.

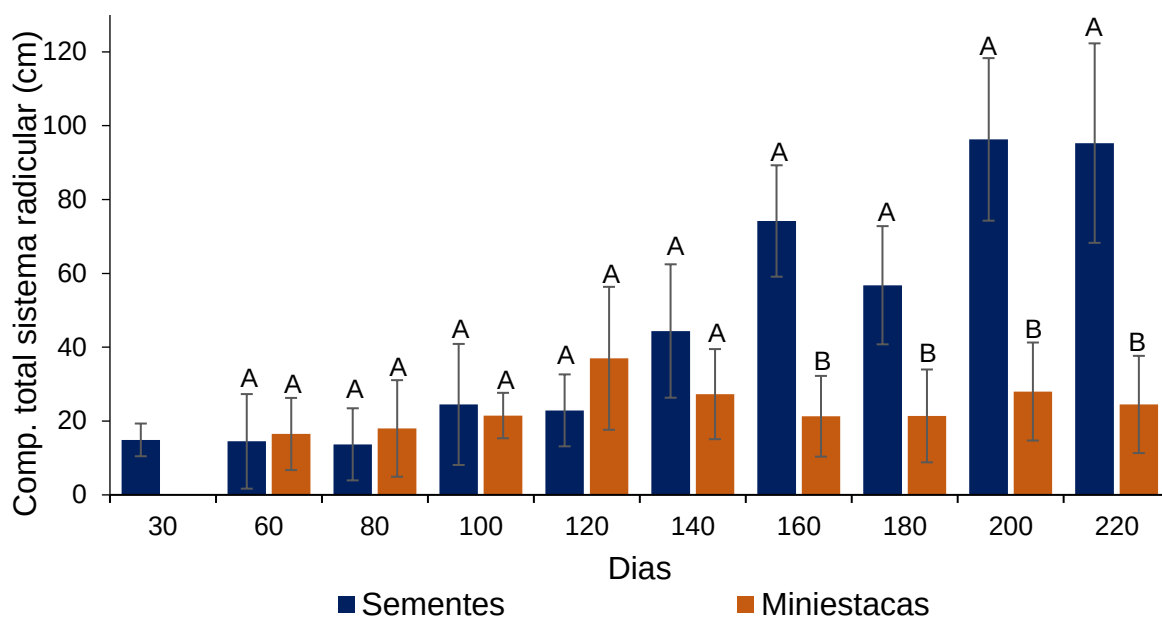


Figura 10 - Comprimento do sistema radicular das mudas de *P. peroba* propagadas por sementes e miniestacas ao longo do tempo. *Barras representam o erro-padrão da média e letras maiúsculas comparam o método de propagação.

As mudas seminíferas demonstraram emissão contínua e expressiva de raízes laterais ao longo de todo o período avaliado. Esse aumento progressivo do número de raízes laterais pode ser explicado pela maior quantidade de recursos e energia disponíveis nas sementes, como reservas nutricionais.

As mudas produzidas por miniestacas apresentaram menor número de raízes ao longo de todo o período avaliado. As miniestacas dependem exclusivamente da reativação dos tecidos meristemáticos para a formação das raízes (Druege et al., 2019).

De forma semelhante Carron et al. (2000) observaram, que mudas seminíferas de *Hevea brasiliensis* apresentaram um maior número de raízes laterais em comparação com as mudas cultivadas por microestaquia (*in vitro*), aos 3 anos após o plantio evidenciaram uma adaptação superior dessas plantas ao ambiente externo e uma maior capacidade de exploração do solo.

Kormanik (1986), estudando raízes laterais de *Liquidambar styraciflua* (sweetgum) e Kormanik et al. (1989; 1990), indicaram que o número de raízes laterais de primeira ordem está positivamente associado ao desempenho das mudas em campo. Essas raízes facilitam o acesso a uma área maior de solo, maximizando a absorção de água e nutrientes essenciais.

O padrão de crescimento radicular lateral observado no presente estudo está alinhado com os achados de Bellini et al. (2014), que também observaram que o aumento do número de raízes laterais reflete uma maior eficiência metabólica e fisiológica das plantas propagadas por sementes.

Schwarz et al. (2010) e Kormanik (1989) expandiram a análise para o impacto ecológico, sugerindo que o número de raízes laterais contribui para a estabilidade do solo e melhora o desempenho das plantações em áreas inclinadas e em condições climáticas adversas. Essas observações podem ser explicadas pela maior capacidade de fixação das plantas no solo, proporcionada pelas raízes laterais, que aumentam a resistência ao escoamento e à erosão do solo.

A formação de raízes laterais está intimamente relacionada à interação entre fatores ambientais e à regulação hormonal, especialmente das auxinas. Verstraeten et al. (2014) relataram que o sistema hormonal das plantas seminíferas é regulado endogenamente, o que favorece o crescimento uniforme e progressivo do sistema radicular.

Por outro lado, em estacas e miniestacas, o processo de enraizamento adventício envolve três fases sucessivas: indução, iniciação e expressão, reguladas principalmente por auxinas aplicadas exogenamente, sendo este processo altamente influenciado pelas condições ambientais e pelo manejo das plantas matrizes (Kumar et al., 2022).

Em relação ao sistema radicular das plantas clonais, a capacidade reduzida de desenvolvimento pode ser explicada pela dependência das miniestacas da reativação dos tecidos meristemáticos. A eficiência na absorção de água e nutrientes pode ser limitada no início. Geiss et al. (2018) descrevem que a formação de raízes adventícias em miniestacas é frequentemente impactada por estresses ambientais e pela disponibilidade de hormônios. A suplementação com reguladores de crescimento, como as auxinas, é muitas vezes necessária para superar essas limitações, embora os resultados não sejam consistentes para todas as espécies.

Apenas a partir de 160 dias houve diferença no comprimento total das raízes. Esse resultado sugere uma estabilização ou até mesmo uma limitação do potencial de crescimento radicular das miniestacas.

Diversos estudos ressaltam a importância adaptativa das raízes laterais em ambientes com baixa disponibilidade hídrica. De modo geral, raízes laterais longas e finas favorecem a exploração de maiores volumes de solo, otimizando a absorção

de água e nutrientes (Schenk e Jackson, 2002; Pregitzer et al., 2002). Essa estratégia morfológica está associada a um melhor desempenho em condições de seca, conforme demonstrado por Markesteijn e Poorter (2009), que identificaram uma relação direta entre o comprimento das raízes laterais e a tolerância à seca em espécies tropicais. Da mesma forma, Gazal e Kubiske (2004) destacaram que mudas com raízes laterais mais longas apresentaram maior resistência ao estresse ambiental logo após o plantio.

Em relação ao número de folhas as diferenças também ocorrem a partir dos 160 dias (Figura 11), refletindo o equilíbrio entre o comprimento das raízes laterais e adventícias e a parte aérea das mudas.

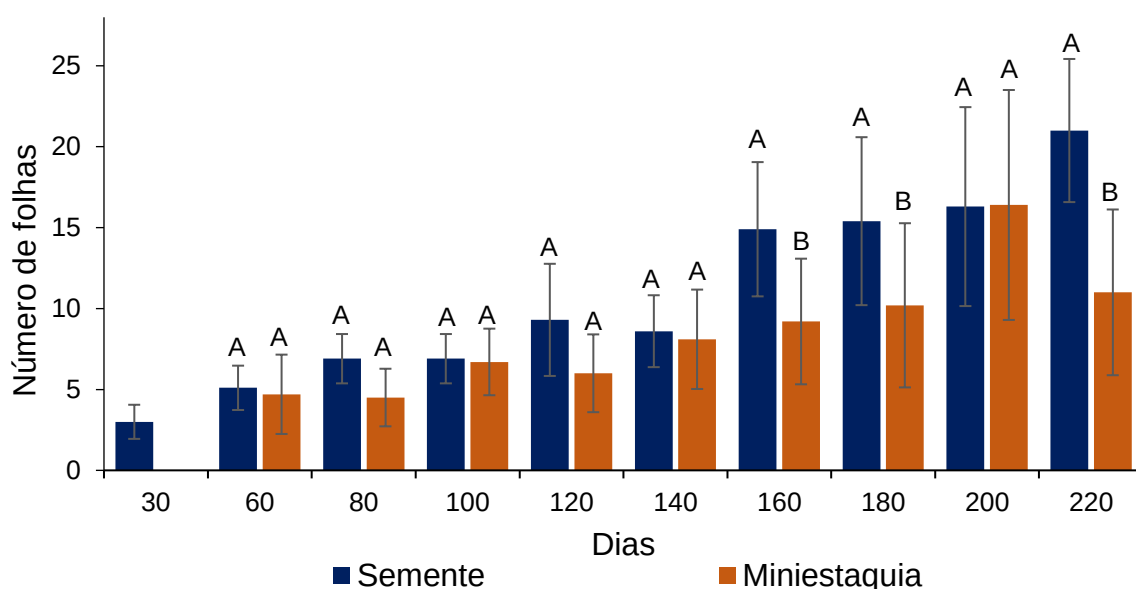


Figura 11 - Análise do número de folhas das mudas de *P. peroba* propagadas por sementes e miniestacas ao longo do tempo. *Barras representam o erro-padrão da média e letras maiúsculas comparam o método de propagação.

O resultado sugere que a propagação por sementes pode proporcionar um crescimento vegetativo mais acelerado a partir desse período.

Guedes et al. (2015) destacaram que sementes de alto vigor germinam mais rapidamente e geram plântulas com sistemas radiculares primários mais adaptados ao ambiente, o que proporciona um aproveitamento mais eficiente das reservas hídricas e nutricionais do solo. Esse desenvolvimento acelerado cria uma base sólida para um crescimento vegetativo vigoroso, como observado em maior número de folhas nas mudas seminíferas de *P. peroba*.

Em contrapartida, as miniestacas dependem da formação de raízes adventícias, um fator limitante para o crescimento inicial, conforme destacado por De Almeida et al. (2017). Esse atraso no desenvolvimento radicular impacta diretamente a capacidade da planta de sustentar um crescimento vegetativo acelerado, refletindo-se em um número menor de folhas.

Segundo Engel et al. (2019), o desenvolvimento de raízes adventícias é um processo complexo e multifatorial, frequentemente limitado por fatores ambientais e pela necessidade de reguladores de crescimento. Consequentemente, isso resulta em uma redistribuição de reservas e compostos energéticos para o enraizamento, comprometendo o crescimento vegetativo inicial, incluindo a produção de folhas.

As plantas seminíferas desenvolvem uma área foliar maior desde os estágios iniciais, resultando em uma capacidade fotossintética superior e uma maior produção de fotoassimilados (Avinio, 2021), que também contribuem para o crescimento mais acelerado das raízes. Por outro lado, as miniestacas, devido ao processo de enraizamento e aclimação, apresentam uma área foliar reduzida no início do desenvolvimento, o que limita sua capacidade fotossintética e, consequentemente, o crescimento do sistema radicular.

A ausência de estresse fisiológico no desenvolvimento inicial das mudas seminíferas também contribui para seu desempenho superior. Conforme evidenciado por Agudo (2022), enquanto as miniestacas passam por um período crítico de estresse para formação de raízes, as plantas oriundas de sementes crescem continuamente desde a germinação, direcionando energia para o crescimento foliar e vegetativo. O desenvolvimento contínuo do sistema radicular primário nas plantas seminíferas cria uma arquitetura radicular eficiente para absorção de nutrientes, o que suporta o crescimento vegetativo acelerado.

Não houve diferença na velocidade de crescimento das raízes entre mudas seminíferas e clonais (Tabela 1). Apesar das mudas provenientes de sementes terem apresentado desenvolvimento superior da parte aérea, com folhas visivelmente maiores, esse fator não se refletiu na velocidade de crescimento das raízes, que permaneceu semelhante entre os dois tratamentos. Cabe ressaltar, no entanto, que duas mudas clonais morreram durante o experimento, o que pode ter contribuído para uma leve redução da média final desse grupo. Assim, conclui-se

que a diferença no comprimento resulta da diferença no número de raízes entre os dois tipos de mudas.

Tabela 1 - Velocidade média de crescimento das mudas de *P. peroba* obtidas a partir de sementes (S1, S2, S3, S4 e S5) e miniestacas (M1, M2 e M3).

Tratamento	S1	S2	S3	S4	S5	M1	M2	M3	CV (%)
Velocidade Média (cm/dia)	0,64 a	0,73 a	0,75 a	0,84 a	0,61 a	0,55 a	0,63 a	0,70 a	43,00%

Médias seguidas de letras iguais na linha não diferem entre si pelo teste F a 5% de probabilidade. CV= coeficiente de variação.



Figura 12- Parte aérea de mudas semíníferas (A) e clonais (B) de *P. peroba*, aos 48 dias após o plantio em caixas, para avaliação da velocidade de crescimento de raízes laterais e adventícias.

Embora não tenham sido detectadas diferenças na velocidade de crescimento das raízes com a metodologia utilizada, segundo Chavarría-Krauser et al. (2008), a velocidade de crescimento não é homogênea ao longo da raiz, mas apresenta variações localizadas, possivelmente relacionadas a gradientes hormonais e de tensão mecânica.

Wendling et al. (2016) observaram que plantas clonais de *Araucaria angustifolia* desenvolveram raízes finas com maior volume sob condições edafoclimáticas uniformes. É comum que a propagação vegetativa em algumas espécies resulte em sistemas radiculares diferenciados, caracterizados pelo desenvolvimento de raízes com maior volume no estágio inicial. Essa característica pode conferir às plantas clonais uma maior capacidade adaptativa, especialmente

em situações de déficit hídrico e nutricional (Gonçalves e Mello, 2005; Santin et al., 2015).

5.2. Experimento 2: Análise morfológica do sistema radicular de plantas clonais e seminíferas após o plantio em vasos

Houve diferenças significativas ($p < 0,05$) nas variáveis avaliadas relacionadas ao diâmetro do colo, bem como nos diâmetros inicial, médio e final das raízes de sustentação (pivotante e adventícias) de plantas propagadas pelos dois métodos (Tabela 2). As plantas seminíferas apresentaram diâmetro radicular maior do que as plantas clonais ao longo de toda a extensão. A propagação de *P. peroba* por sementes tende a favorecer um sistema radicular mais robusto, enquanto a propagação clonal resulta em um sistema radicular menos vigoroso, em termos de diâmetro.

Tabela 2 - Características do sistema radicular de plantas de *P. peroba*, produzidas por sementes e por miniestaquia, aos 323 dias após o plantio em vasos.

Variáveis	Unidade	Sementes	Miniestacas	CV (%)
Diâmetro do colo	mm	15,26 a	13,58 b	14,567%
Diâmetro inicial RS	mm	14,71 a	8,29 b	32,13%
Diâmetro médio RS	mm	11,63 a	6,03 b	31,31%
Diâmetro final RS	mm	6,11 a	3,09 b	46,55%
Nº raiz de sustentação	-	1,5 b	3,15 a	49,11%
Nº raiz lateral	-	68,4 a	58,8 b	18,52%
Comprimento médio RS	cm	30,55 a	26,88 a	20,52%
Comprimento total RS	cm	44,97 b	78,17 a	37,36%
*Comprimento específico da raiz	(cm/cm³)	253,83 a	234,57 b	12,19%
Massa seca RS	g	22,62 a	11,79 b	42,18%
Massa seca RL	g	2,07 a	1,62 b	33,95%
**Comprimento total RL	cm	3235,17 a	2175,35 b	20,08%
**Área superficial	cm²	623,28 a	468,65 b	20,19%
**Diâmetro médio RL	mm	1,187 b	1,388 a	18,99%
**Bifurcações	-	10975,5 a	5747,65 b	37,74%
**Extremidade	-	6003,15 a	3749,65 b	24,38%
**Volume RL	cm³	9,639 a	8,294 a	19,87%

Médias seguidas de letras diferentes na linha diferem entre si e médias seguidas de letras iguais na linha não diferem entre si pelo teste F a 5% de probabilidade.

Análise= *Gia Roots; **WinRhizo. CV= coeficiente de variação; RS= raízes de sustentação; RL= raízes laterais.

Os aspectos fisiológicos e genéticos podem influenciar as variações no desenvolvimento radicular. As plantas propagadas por sementes possuem maior diversidade genética, o que possibilita uma adaptação mais ampla às condições ambientais. Portanto, a interação entre as plantas e seu ambiente pode afetar as propriedades das raízes, como o diâmetro, que, por sua vez, influencia o vigor, produtividade e resistência.

Essa diversidade genética pode resultar em variações mais significativas no diâmetro das raízes e em outras características (Salinier et al., 2019). O fato de as plantas seminíferas possuírem raízes de sustentação mais robustas e desenvolvidas em relação às plantas clonais deve-se à alocação de mais recursos para o crescimento da raiz principal, que atua como um órgão de armazenamento de carboidratos e outros nutrientes (Luo et al., 2020; Berg et al., 2021; Jiang, 2023).

Essa maior área de absorção exige adaptações no sistema vascular, com vasos de floema mais desenvolvidos para receber e transportar a carga de nutrientes e assimilados até as raízes, e vasos de xilema de maior diâmetro para conduzir o volume de água absorvido, proporcional à capacidade do sistema radicular (Sperry, 2003; Konrad et al., 2021)

O diâmetro é um indicador importante da qualidade das plantas (Ritchie e Landis, 2008), uma vez que plantas com diâmetro maior apresentam um desenvolvimento mais acentuado, especialmente em relação ao sistema radicular (Schmidt, 1966; Schubert e Adams, 1971; Carneiro, 1976).

Li et al. (2022) observaram que plantas de *Cunninghamia lanceolata* originadas de sementes apresentaram diâmetros médios das raízes superiores aos das plantas provenientes de cultura de tecidos ou de estacas enraizadas. Os autores sugerem que as diferenças nas características das raízes entre os métodos de propagação podem refletir distintas habilidades de absorção de recursos do solo. O mecanismo genético desempenha um papel fundamental nesse processo, uma vez que os genes regulam o desenvolvimento das raízes. Isso implica que o comportamento das raízes, dependendo do método de propagação, pode ser em parte determinado pela genética das plantas.

Fassio et al. (2016) observaram que a arquitetura radicular do abacateiro 'Duke 7' varia de acordo com a técnica de propagação e o uso de enxertia. Mudanças clonais, enxertadas ou não, apresentaram sistema radicular raso, com ausência de raiz. Já as plantas de sementes não enxertadas desenvolveram uma raiz principal espessa e profunda, com maior capacidade de absorção de água e nutrientes nas camadas mais profundas do solo. Esse padrão de diferenciação em função do método de propagação também foi verificado no presente estudo.

Avaliando a arquitetura das plantas clonais e seminíferas de *Vaccinium meridionale*, Cano et al. (2015) observaram diâmetro basal do caule maior em indivíduos provenientes de sementes em comparação com as plantas clonais. Esse comportamento é semelhante ao observado no presente estudo, no qual a maior robustez das raízes em plantas propagadas por sementes pode estar relacionada ao processo embrionário, que promove a diferenciação celular e o crescimento coordenado das estruturas radiculares.

Santin et al. (2015) compararam mudas de erva-mate produzidas por miniestaquia e por sementes e observaram que o diâmetro do colo foi semelhante entre os métodos. Os autores justificam que a semelhança no diâmetro do colo entre as mudas de erva-mate propagadas por sementes e por miniestaquia se deve à capacidade adaptativa das plantas, ou seja, à habilidade de se ajustarem ao ambiente, não dependendo do método de propagação utilizado. No entanto, para *P. peroba*, o método de propagação exerceu influência sobre essa característica.

Embora a propagação vegetativa possa impactar negativamente aspectos morfológicos do sistema radicular, como a ausência de raiz pivotante e uma maior fragilidade caracterizada por menor resistência mecânica e capacidade de fixação do sistema radicular adventício, que, por se desenvolver de forma mais superficial, torna-se mais suscetível a danos físicos e à limitação hídrica (Wendling, 2004), esse efeito não se refletiu na sobrevivência ou no crescimento em diâmetro do colo. Isso indica que os aspectos fisiológicos essenciais para a absorção de água e nutrientes permaneceram equivalentes entre os diferentes métodos de propagação de *P. peroba*.

O comprimento e o diâmetro do sistema radicular estão interligados. As raízes de absorção, que possuem menor diâmetro e maior comprimento, ampliam a área de contato com o solo, aumentando a eficiência na captação de água e nutrientes. Por outro lado, as raízes de sustentação, caracterizadas por um

diâmetro maior, oferecem suporte estrutural à planta, garantindo estabilidade e facilitando o transporte eficiente de água e nutrientes para o caule.

Para o número de raízes laterais e de sustentação (Tabela 2), diferenças estatísticas significativas foram apresentadas ($p < 0,05$). As plantas propagadas por sementes apresentaram um número maior de raízes laterais. Esse padrão pode ser explicado pelo fato de que a propagação por sementes resulta em uma arquitetura radicular mais densa.

Resultados opostos aos observados no presente estudo foram relatados por Albrecht et al. (2017) em relação ao número de raízes laterais. Em seus experimentos com citrus, os autores constataram que as plantas propagadas por estacas apresentaram um número total de raízes adventícias laterais de primeira ordem superior (108–185) em comparação com as plantas propagadas por cultura de tecidos (53–103) e aquelas propagadas por sementes (43–78).

De forma semelhante, Li et al. (2022) também observaram que as plantas seminíferas apresentaram um menor número de raízes laterais em comparação às propagadas por miniestacas ou cultura de tecidos. Os autores destacaram que as plantas cultivadas a partir de sementes tendem a investir suas reservas no desenvolvimento de uma raiz pivotante mais acentuada, enquanto as originadas de cultura de tecidos possuem um sistema radicular predominantemente raso, formado por raízes adventícias, o que limita a profundidade do sistema radicular.

O estudo de Pages (1995) com mudas de carvalho (*Quercus robur*) reforça a ideia de que o padrão de crescimento das raízes laterais, desempenha um papel na sobrevivência inicial das mudas no campo. Raízes laterais mais longas e numerosas possibilitam que a planta explore de maneira mais eficiente os recursos em ambientes competitivos.

Entre os diversos tipos de raízes, as raízes laterais são significativas por sua capacidade de aumentar a área superficial da raiz de uma planta, melhorando a absorção de água e nutrientes do solo (Irshad et al., 2024). A formação das raízes laterais ocorre tipicamente durante o desenvolvimento inicial da planta, especialmente quando esta possui cerca de sete a nove dias de idade (Dubrovsky et al., 2006; De Smet, 2012).

A diversidade genética desempenha um papel fundamental, uma vez que a propagação por sementes possibilita uma gama mais ampla de características, incluindo a variabilidade na arquitetura das raízes. Em contrapartida, os métodos

de miniestaquia produzem descendentes geneticamente uniformes, que podem não apresentar essa capacidade adaptativa (Bui et al., 2022). A propagação por sementes oferece um grau maior de diversidade genética, resultando em uma variabilidade superior nas características das raízes, o que permite que as plantas propagadas por sementes tenham maior flexibilidade para se adaptar às condições do solo.

No presente estudo, observou-se que as plantas de *P. peroba* propagadas por sementes apresentaram maior número de raízes laterais em comparação às plantas originadas de miniestacas, desde a fase inicial.

A arquitetura do sistema radicular refere-se à distribuição espacial das raízes, a qual é influenciada por diversas características, como a profundidade de enraizamento, o ângulo de crescimento das raízes e o diâmetro das raízes. Esses fatores são essenciais para otimizar a aquisição de recursos em condições ambientais variáveis (Kou et al., 2022; Choudhary e Kumari, 2021).

As plantas desenvolveram mecanismos de adaptabilidade notáveis que lhes permitem modificar sua morfologia em resposta a estímulos bióticos e abióticos. As plantas propagadas por sementes tendem a exibir um grau maior de plasticidade em seus sistemas radiculares, pois se adaptam a sinais ambientais, como a umidade do solo e a disponibilidade de nutrientes (Kou et al., 2022; Yalamanchili et al., 2024). Essa plasticidade se manifesta no desenvolvimento aprimorado de raízes laterais, o que aumenta sua capacidade de explorar o solo e acessar água e nutrientes de forma mais eficiente.

Alguns fatores influenciam o desenvolvimento das raízes laterais. A variabilidade genética, por exemplo, é um aspecto que desempenha um papel importante no crescimento das raízes das plantas.

A propagação de sementes tende a gerar um grau maior de diversidade genética em comparação à propagação por estacas, que resulta em descendentes geneticamente idênticos. Essa diversidade genética nas plantas propagadas por sementes possibilita uma variedade mais ampla de traços e características, incluindo o potencial para o desenvolvimento de um maior número de raízes laterais. Em contrapartida, as plantas originadas de miniestacas, por serem clones da planta-mãe, podem apresentar uma arquitetura radicular limitada e, conseqüentemente, podem não formar tantas raízes laterais, conforme a seleção feita (Bui et al., 2022). É importante destacar que, no presente experimento, as

plantas clonais foram oriundas de miniestacas produzidas a partir de diferentes minicepas seminíferas, o que significa que não se tratava de clones de um único indivíduo, mas sim de um conjunto de materiais vegetativos com base genética distinta. A seleção do material e o manejo adequado podem mitigar possíveis limitações associadas à arquitetura radicular em plantas clonais.

Os hormônios também são fatores que impactam a iniciação e o crescimento das raízes laterais (Tanimoto, 2005; De Smet et al., 2015; Agusti et al., 2021; Jan et al., 2024). Por exemplo, hormônios específicos, como as auxinas, são conhecidos por promover a indução de raízes laterais, e sua disponibilidade pode variar consideravelmente entre plantas propagadas por sementes e miniestacas.

Referente ao número de raízes de sustentação este foi maior em plantas propagadas por miniestacas. Essas raízes formadas indicam uma distribuição das reservas no espaço, e esse comportamento reflete uma adaptação fisiológica das plantas clonais, que desenvolvem mais estruturas de ancoragem para compensar a ausência de uma raiz pivotante.

A formação de raízes de sustentação em plantas originadas de miniestacas indica uma estratégia de redistribuição de reservas, favorecendo a ancoragem e a adaptação ao ambiente. Em vez de concentrar suas reservas em uma única raiz pivotante, como ocorre nas plantas provenientes de sementes, as plantas clonais podem diversificar seu sistema radicular para criar múltiplos pontos de fixação, como ocorrido com a *P. peroba*. Essa estratégia pode ser vantajosa em solos mais pobres ou heterogêneos, onde uma estrutura radicular dispersa maximiza a exploração do solo e melhora a captação de nutrientes e água.

Embora o sistema radicular de plantas propagadas vegetativamente seja diferente daquele obtido a partir de sementes, essas diferenças não implicam necessariamente em desvantagens no crescimento ou na produtividade. Por exemplo, em testes de campo com *Pinus radiata*, o crescimento em altura e diâmetro de mudas originadas por propagação vegetativa foi semelhante ou superior ao das mudas propagadas por sementes, especialmente quando foram utilizados propágulos mais juvenis (Frampton e Foster, 1993).

Em relação ao comprimento total e médio das raízes de sustentação, foram observadas diferenças estatísticas significativas ($p < 0,05$). A partir dos resultados apresentados na Tabela 2, nota-se que as raízes de sustentação (adventícias) das plantas propagadas por miniestaquia apresentam um comprimento total maior. Por

outro lado, o comprimento médio das raízes não demonstrou variação tão expressiva entre os dois métodos de propagação. Esse comportamento sugere que, embora as plantas clonais possuam um sistema radicular mais extenso em termos de comprimento total, essa extensão não se traduz em um aumento proporcional no comprimento médio das raízes.

Nos estudos realizados por Li et al. (2022) com a espécie conífera *Cunninghamia lanceolata*, os autores obtiveram resultados opostos aos do presente estudo. Em seus experimentos, o comprimento das raízes das plantas seminíferas e das plantas propagadas por cultura de tecidos foi significativamente maior do que o das propagadas por estacas. De acordo com os autores, seus resultados sugerem uma maior capacidade das plantas desta espécie provenientes de sementes em desenvolverem raízes mais longas e profundas. Essa configuração do sistema radicular das plantas de sementes favorece a absorção de recursos do solo, proporcionando um crescimento mais eficiente em ambientes diversos.

No entanto, as plantas propagadas por miniestaquia também podem apresentar um comprimento total maior das raízes de sustentação (adventícias), devido à necessidade de compensar a sustentação da árvore, acumulando assim reservas em mais de uma raiz. Durante a indução da rizogênese adventícia, ocorre um aumento na proliferação de raízes, o que contribui para a extensão total do sistema radicular. Essa capacidade de ramificação está frequentemente associada a características genéticas que favorecem o enraizamento, permitindo que as plantas clonais se estabeleçam rapidamente em novos ambientes (Titon et al., 2002).

A relação entre a disponibilidade de nutrientes no solo e o desenvolvimento do sistema radicular é dinâmica e condicionada pela oferta desses recursos, influenciando diretamente o padrão de crescimento e a arquitetura das raízes.

Plantas clonais geralmente ajustam o comprimento das raízes em resposta às concentrações de nutrientes, o que pode resultar em um desenvolvimento radicular mais acentuado (Ye et al., 2016). Essa adaptabilidade ressalta a importância ecológica do comprimento das raízes para a sobrevivência das plantas clonais. Plantas clonais podem otimizar seu sistema radicular, ajustando a absorção de recursos específicos com base na disponibilidade local (Herms et al., 2022), o que favorece sua sustentação no campo.

Essa cooperação não apenas aumenta o comprimento total das raízes de sustentação adventícias, mas também contribui para a capacidade da planta de lidar com ambientes heterogêneos. Consequentemente, as implicações de um maior comprimento total das raízes adventícias vão além do desempenho individual da planta, influenciando a dinâmica da comunidade vegetal, ciclagem de nutrientes e a fertilidade do solo, o que torna esse tema uma área significativa de estudo (Si et al., 2020).

A plasticidade nas respostas das plantas às condições ambientais é um fator significativo que afeta o comprimento das raízes. Plantas clonais exibem variação fenotípica em resposta a ambientes heterogêneos, tanto espacial quanto temporalmente, o que lhes permite adaptar o crescimento de suas raízes com base na disponibilidade de recursos locais (Herms et al., 2022). Assim, as plantas clonais podem modular o comprimento de suas raízes em ambientes instáveis, evidenciando a importância do contexto ambiental na formação da morfologia e arquitetura radicular (Herms et al., 2022). Por meio da interação desses fatores arquitetura das raízes, disponibilidade de nutrientes e plasticidade ambiental, as plantas clonais conseguem ajustar efetivamente o comprimento de suas raízes, consequentemente, melhorando sua sobrevivência e crescimento em diversos habitats.

Em *Eucalyptus grandis*, por exemplo, as raízes adventícias demonstram um crescimento mais distribuído e menos concentrado em uma só raiz (Hartmann et al., 2011). Esse mesmo padrão foi observado no presente trabalho com a *P. peroba*, indicando uma estratégia semelhante de distribuição radicular.

O aumento pouco expressivo no comprimento médio sugere que o sistema radicular clonal tende a ser mais difuso. Essa configuração pode ter implicações significativas para a funcionalidade do sistema radicular. Em relação à ancoragem, a raiz adventícia pode proporcionar estabilidade, mas pode ser mais vulnerável a ventos fortes ou a solos menos compactados, em comparação com a raiz pivotante das plantas propagadas por sementes.

No contexto silvicultural e de conservação, essas características podem ser decisivas na escolha do método de propagação para espécies como a *P. peroba*. Se o objetivo for o reflorestamento e conservação, as raízes de sustentação mais extensas das plantas clonais pode ser uma opção viável, especialmente por desenvolverem um maior número de raízes de sustentação, o que favorece a

exploração mais eficiente do solo. Ainda que a massa seca dessas raízes seja menor, esse padrão pode indicar uma estratégia adaptativa de investimento em maior distribuição radicular, podendo ser benéfica para o estabelecimento em áreas degradadas, devido à sua maior capacidade de exploração do solo. No entanto, para a produção madeireira, plantas propagadas por sementes ainda se tornam uma melhor opção pois oferecerem maior estabilidade estrutural a longo prazo, algo essencial para árvores de grande porte. Apesar das vantagens da propagação clonal, como a uniformidade genética e o controle sobre características desejáveis, é fundamental monitorar o desempenho das plantas clonais ao longo do tempo, especialmente em condições ambientais extremas (Leahey, 2014).

Outro fator fundamental é investigar as interações entre fatores genéticos, fisiológicos e ambientais que regulam o desenvolvimento radicular. Bellini et al. (2014) destacam que as sementes são particularmente eficazes na exploração de recursos em solos competitivos, enquanto as miniestacas, embora menos eficientes, podem ser aprimoradas por meio de técnicas avançadas de manejo, como a aplicação controlada de indutores de enraizamento e a otimização das condições ambientais. Kormanik e Ruehle (1986) enfatizam que viveiros podem melhorar a qualidade das mudas ao incentivar o desenvolvimento de raízes por meio de práticas culturais e manejos específicos.

Para as variáveis analisada no software Gia Roots diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) foram observadas em relação ao comprimento específico das raízes (cm/cm^3) (Tabela 2). As plantas seminíferas apresentaram melhor desempenho em comparação às de miniestacas. Esse resultado revela uma maior eficiência exploratória das raízes das plantas seminíferas, o que pode estar relacionado à estrutura anatômica do seu sistema radicular.

O comprimento específico das raízes é uma métrica que expressa quanto de solo uma planta consegue explorar por massa seca de raízes finas. Valores mais altos indicam maior eficiência na absorção, embora possam estar associados a raízes mais frágeis (Ostonen et al., 2007; Lopez et al., 2023). Maurice et al. (2010) também destacam que o comprimento específico das raízes reflete diretamente o custo-benefício entre o crescimento radicular e a eficiência exploratória do solo.

Os resultados obtidos neste experimento estão alinhados com os achados de Kong et al. (2014), que avaliaram 96 espécies florestais subtropicais e

identificaram uma ampla variação nos valores de comprimento específico das raízes, associando os maiores valores a espécies com maior eficiência de aquisição de recursos. Segundo os autores, espécies com comprimento específico das raízes elevado demonstram maior capacidade de explorar solos pobres, o que oferece vantagem competitiva em ambientes naturais. As plantas de *Paratecoma peroba* oriundas de sementes, ao apresentarem comprimento específico das raízes mais elevado, encaixam-se nesse padrão funcional, indicando maior capacidade adaptativa e eficiência funcional.

A maior eficiência observada nas plantas propagadas por sementes pode ser explicada também por aspectos anatômicos e fisiológicos. Como demonstrado por Lelu-Walter et al. (2013), plantas seminíferas iniciam seu desenvolvimento a partir de tecidos meristemáticos primários, o que resulta em raízes mais bem definidas e funcionais. Em contraste, plantas propagadas por miniestacas dependem da formação de raízes adventícias, cuja morfologia e capacidade funcional podem ser menos eficientes e mais variáveis. Essas diferenças estruturais explicam, em parte, o maior comprimento específico das raízes nas plantas seminíferas. Observa-se que a propagação por sementes de *P. peroba* resultou em sistemas radiculares mais extensos e ramificados, devido ao crescimento direto da radícula embrionária.

Ranalli (1997) afirma que sementes contêm maiores reservas energéticas, permitindo o desenvolvimento mais vigoroso e eficiente do sistema radicular. Isso reforça a observação de que o investimento inicial em biomassa das plantas seminíferas resultou em raízes finas com maior capacidade de exploração do solo, expressa pelos valores superiores de comprimento específico das raízes obtidos neste estudo.

Em relação à resposta a condições ambientais, Lozano et al. (2020) observaram que o comprimento específico das raízes tende a aumentar em algumas espécies sob estresse hídrico leve ou moderado, como uma estratégia de adaptação, permitindo maior absorção de água com menor custo metabólico. Ainda que o presente experimento tenha sido conduzido sob condições controladas, sem estresse hídrico severo, a diferença entre os tipos de propagação, com comprimento específico das raízes mais elevado nas plantas de sementes, sugere maior capacidade plástica destas frente a ambientes menos favoráveis.

Essa interpretação é sustentada pelo conceito de plasticidade fenotípica, discutido por Paz et al. (2015), segundo o qual plantas capazes de ajustar sua morfologia radicular em resposta às variações ambientais tendem a apresentar maior sucesso ecológico. O comprimento específico das raízes mais elevado nas plantas seminíferas pode, assim, ser interpretado como um indicativo dessa plasticidade adaptativa, refletindo maior flexibilidade funcional para absorção de recursos.

Visser et al. (1997) também apontam que a plasticidade associada à disponibilidade de recursos é essencial para a eficiência na absorção de água e nutrientes, o que se reflete diretamente em métricas como o comprimento específico das raízes. A semelhança entre essas observações e os resultados obtidos no presente estudo reforça a ideia de que o comprimento específico das raízes elevado nas plantas de sementes representa uma estratégia eficiente de aquisição de recursos.

Sun et al. (2024) realizaram uma meta-análise demonstrando que, sob estresse hídrico intenso e prolongado, muitas espécies apresentam redução no comprimento específico das raízes, devido ao aumento na densidade tecidual das raízes finas. Essa resposta representa uma tentativa de aumentar a resistência das raízes à seca. Essa diferença em relação ao presente estudo é compreensível, já que não se avaliou o comportamento das plantas sob seca severa, e sim em ambiente controlado. Dessa forma, o maior comprimento específico das raízes nas plantas seminíferas pode ser atribuído à sua estrutura morfofisiológica e à plasticidade adaptativa, e não necessariamente a uma resposta ao estresse ambiental.

Kou et al. (2022) ressaltam que, em condições de seca moderada, plantas propagadas por sementes tendem a desenvolver sistemas radiculares mais finos e extensos, com maior ramificação. Isso está de acordo com os dados obtidos neste experimento, uma vez que o comprimento específico das raízes mais elevado nas plantas seminíferas pode refletir essa maior extensão das raízes finas em relação à biomassa investida.

Por outro lado, a propagação por miniestacas, embora seja eficiente em termos de uniformidade genética e manejo, apresenta limitações na capacidade de gerar raízes em quantidade e funcionalidade comparáveis às plantas propagadas por sementes. Essa questão é particularmente evidente em espécies nas quais a

formação de raízes adventícias enfrenta barreiras anatômicas ou depende de fatores exógenos, conforme discutido por Braun e Wyse (2019).

As raízes formadas a partir de sementes apresentam uma maior capacidade de aprofundar-se no solo e de ramificar-se em busca de recursos. Esse processo inicia-se a partir da radícula, que, por ser a primeira raiz da planta, tem um desenvolvimento voltado para o crescimento profundo. Em comparação, as raízes adventícias, que se formam por métodos vegetativos, não possuem o mesmo potencial de crescimento vertical, o que pode limitar sua capacidade de exploração. No presente experimento, essa diferença foi evidenciada pelo maior diâmetro médio das raízes observado nas plantas provenientes de sementes (Tabela 2), indicando um maior potencial de crescimento e aprofundamento do sistema radicular em comparação às plantas de miniestacas.

A compreensão da morfologia da raiz e suas implicações para o crescimento das plantas é importante para as práticas florestais em diferentes tipos de solo.

A massa seca das raízes de sustentação e laterais, foram diferentes ($p < 0,05$) entre plantas provenientes de sementes e de miniestacas (Tabela 2). As plantas provenientes de sementes apresentaram maior peso seco nas raízes de sustentação, uma vez que desenvolvem uma raiz pivotante que se aprofunda no solo. Essa raiz principal acumula mais biomassa, sendo mais eficiente na fixação da planta. Em relação às raízes laterais, as plantas provenientes de sementes também apresentaram resultados superiores. Isso reforça a ideia de que o sistema radicular das plantas seminíferas é, de modo geral, mais bem desenvolvido, enquanto as miniestacas, embora também formem raízes laterais.

Resultados semelhantes foram reportados por Wulff (1986) que relatou que as plantas originadas de sementes apresentaram um sistema radicular mais desenvolvido e robusto, especialmente em condições controladas. O estudo constatou que a maior biomassa das plantas provenientes de sementes pode ser atribuída ao melhor acesso a nutrientes armazenados e à capacidade dessas plantas de estabelecer um sistema radicular profundo.

Do mesmo modo, Silva e Delatorre (2009) demonstraram que as adaptações estruturais da arquitetura do sistema radicular, em resposta à maior disponibilidade de nutrientes no solo, estão associadas ao aumento do peso seco das raízes. Embora no presente estudo a variável manipulada tenha sido o método

de propagação e não a disponibilidade nutricional, a resposta observada nas plantas de sementes, com maior massa seca de raízes laterais e de sustentação, sugere que estas apresentam maior capacidade de modificação morfofuncional para alocar biomassa radicular, comportamento congruente ao relatado pelos autores.

Albrecht et al. (2017) reforçam diretamente seus resultados ao compararem a arquitetura radicular e o crescimento de plantas de citrus, demonstrando que as plantas propagadas por sementes tendem a alocar uma maior fração de biomassa para as raízes. Os resultados obtidos pelos autores indicam que a massa seca das raízes é significativamente maior em plantas originadas de sementes (16% a 29% da biomassa total) em comparação com aquelas propagadas por miniestacas (11% a 16%). Esses dados corroboram os resultados do presente estudo, que também evidenciou maior alocação de biomassa radicular nas plantas oriundas de sementes. Ainda, os autores indicam que plantas de citrus cultivadas a partir de sementes apresentaram uma fração de massa radicular variando de 21% a 30%, enquanto as propagadas por miniestacas mostraram frações significativamente menores, entre 11% e 16%.

As plantas seminíferas geralmente apresentam maior peso seco nas raízes devido ao seu melhor desenvolvimento inicial, o que lhes confere uma vantagem em termos de resistência e adaptação ao longo do tempo (Bhatia e Ashwath, 2004). Os autores ressaltam que, embora as plantas clonais possam ter um crescimento inicial relativamente rápido, frequentemente não conseguem se igualar ao desenvolvimento radicular das plantas provenientes de sementes ao longo do tempo.

A alocação de biomassa para o sistema radicular representa um investimento metabólico significativo por parte da planta, refletindo estratégias adaptativas distintas entre indivíduos seminíferos e clonais. Plantas seminíferas tendem a desenvolver raízes pivotantes mais profundas e espessas, que não apenas conferem maior ancoragem em solos profundos, reduzindo a possibilidade de tombamento, como também favorecem a exploração hídrica em camadas mais profundas do solo, aumentando a tolerância à seca (Lynch, 1995; Comas et al., 2013). Esse padrão de alocação radicular implica em um custo metabólico mais elevado inicialmente, mas pode ser vantajoso em ambientes com limitação hídrica

ou solos mais soltos, onde o crescimento vertical favorece o acesso a recursos mais estáveis.

Por outro lado, mudas clonais desenvolvem sistemas radiculares compostos por raízes adventícias, muitas vezes com bifurcações próximas à superfície, que podem facilitar o estabelecimento inicial em solos pedregosos ou rasos, onde o crescimento vertical da raiz pivotante seria limitado ou inviável (Hartmann et al., 2011; Bustillo-Avendaño et al., 2018). A ramificação precoce pode resultar em uma maior densidade de raízes laterais de primeira ordem, o que amplia a superfície de contato com o solo e favorece a aquisição de nutrientes e água nas camadas mais superficiais e intermediárias do perfil (Kormanik et al., 1990; Eshel e Beeckman, 2013). Essa característica pode ser particularmente benéfica em solos com maior disponibilidade de nutrientes na camada superior ou em ambientes com precipitação mais frequente, mas menos intensa.

As raízes laterais são essenciais para a arquitetura do sistema radicular, contribuindo de maneira significativa para a absorção de água e nutrientes. Elas emergem do periciclo da raiz principal e se ramificam, ampliando a área de superfície disponível para a absorção. As raízes adventícias são formadas a partir de tecidos não radiculares, como o caule, hipocótilo ou folhas. Elas se desenvolvem quando células parenquimáticas de regiões como o floema secundário, tecidos corticais ou vasculares sofrem desdiferenciação e se reprogramam para originar primórdios radiculares. Esse processo é altamente dependente da sinalização hormonal, especialmente de auxinas, que regulam a expressão de genes relacionados à formação de raízes (Bellini et al., 2014; Guan et al., 2015; Steffens e Rasmussen, 2016; Gonin et al., 2019).

A relação entre o crescimento das raízes laterais e o fornecimento de carboidratos é significativa; um suprimento adequado de carboidratos pode estimular o crescimento dessas raízes, resultando em uma maior massa seca (Hund et al., 2008). Análises sobre a biomassa subterrânea permitem avaliar a capacidade de adaptação das plantas a diferentes condições ambientais, como estresse hídrico ou deficiência de nutrientes, fornecendo informações para práticas de manejo sustentável e estratégias de conservação. É importante correlacionar essas características com o estabelecimento das plantas no campo.

As análises realizadas com o programa WinRhizo revelaram diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) entre mudas seminíferas e clonais, nas

raízes laterais (Tabela 2), destacando-se as variáveis diâmetro das raízes laterais (mm), comprimento total das raízes laterais (cm), área superficial (cm²), número de extremidades e bifurcações. No entanto, a variável volume não apresentou diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$).

Ao comparar os métodos de propagação, observou-se que as plantas clonais apresentaram maior diâmetro das raízes laterais adventícias, com médias dos resultados superiores às das seminíferas. Esses dados se assemelham aos relatados por Freschet et al. (2018), que observaram que raízes com maior diâmetro tendem a apresentar maior investimento estrutural, mas podem ser menos eficientes na exploração do solo e aquisição de nutrientes, reforçando a vantagem funcional de raízes mais finas em ambientes limitantes.

Para as demais variáveis, como volume, comprimento, área superficial, número de extremidades e bifurcações das raízes, as plantas provenientes de sementes demonstraram melhores resultados. Esse padrão também foi verificado por Merino et al. (2024), que encontraram aumento de comprimento total e área superficial em raízes submetidas a diferentes regimes de poda. De forma semelhante, Markesteijn e Poorter (2009) destacaram que plantas com raízes de maior comprimento e menor espessura em diâmetro são favorecidas em ambientes secos devido à maior exploração volumétrica do solo.

As plantas provenientes de sementes apresentaram sistema radicular mais robusto e com características de eficiência, como menor diâmetro de raízes laterais. Os achados de Alvarez-Flores et al. (2018), indicam que a maior plasticidade radicular em espécies sob déficit hídrico, com redução do diâmetro radicular pode favorecer maior superfície específica de absorção.

O maior comprimento das raízes laterais em plantas propagadas por sementes sugere uma capacidade superior de exploração do solo, que, aliado ao menor diâmetro e maior área superficial, tende a permitir maior absorção de nutrientes e água (Wang et al., 2020).

O número de extremidades e bifurcações nas raízes laterais indica um maior grau de ramificação do sistema radicular, influenciando diretamente sua capacidade de absorção de água em condições de estresse hídrico. Quanto maior a ramificação, maior sua eficiência na obtenção de recursos. Esse atributo é essencial para a resistência ao déficit hídrico, evidenciando a adaptação das

plantas a ambientes áridos, pois permite a exploração de maiores volumes e profundidades do perfil do solo (Starkey et al., 2012; Wang et al., 2020).

Xing et al. (2025) mostraram que o aumento no número de bifurcações e extremidades foi um dos principais fatores morfofisiológicos de adaptação em *Paeonia ostii* submetida à restrição radicular. De maneira semelhante, Liu et al. (2023) observaram que plantas forrageiras submetidas a interações competitivas intensificaram a formação de ramificações radiculares como forma de ampliar sua eficiência de absorção.

As bifurcações têm implicações diretas na formação de novos pontos de crescimento e, conseqüentemente, de pelos radiculares, estruturas essenciais para a absorção. Segundo McCully e Canny (1988), os pelos radiculares se desenvolvem predominantemente nas regiões jovens das raízes, localizadas logo após as bifurcações, e são responsáveis por absorver a maior parte da água e dos nutrientes no solo. Isso indica que as mudas provenientes de sementes, ao apresentarem maior número de bifurcações, também tendem a apresentar maior densidade de zonas pilíferas, favorecendo a absorção.

Corroborando essa relação, Leitner et al. (2009) mostraram, por meio de modelos dinâmicos, que regiões com mais extremidades, resultantes das bifurcações, promovem maior fluxo de nutrientes como nitrogênio e fósforo, sendo, portanto, zonas preferenciais de absorção. A eficiência dessas regiões está diretamente ligada à presença de pelos radiculares, cuja atuação ocorre especialmente nas zonas jovens e em crescimento.

Zhang et al. (2018) demonstraram que a presença de bifurcações não apenas aumenta o número de extremidades radiculares, mas também estimula a emissão de pelos radiculares, o que amplia ainda mais a superfície de absorção.

5.3. Experimento 3: Plantas de *Paratecoma peroba* clonais e seminíferas após o plantio

Foram observadas diferenças estatísticas ($p < 0,05$) no crescimento em diâmetro e altura (Figuras 13 e 14) após o plantio. No campo, as mudas produzidas a partir de sementes mantiveram maior crescimento em diâmetro e altura e essa

diferença foi mantida ao longo dos 15 meses após o plantio. Além disso, não foi registrada mortalidade de nenhuma das plantas durante o período de observação.

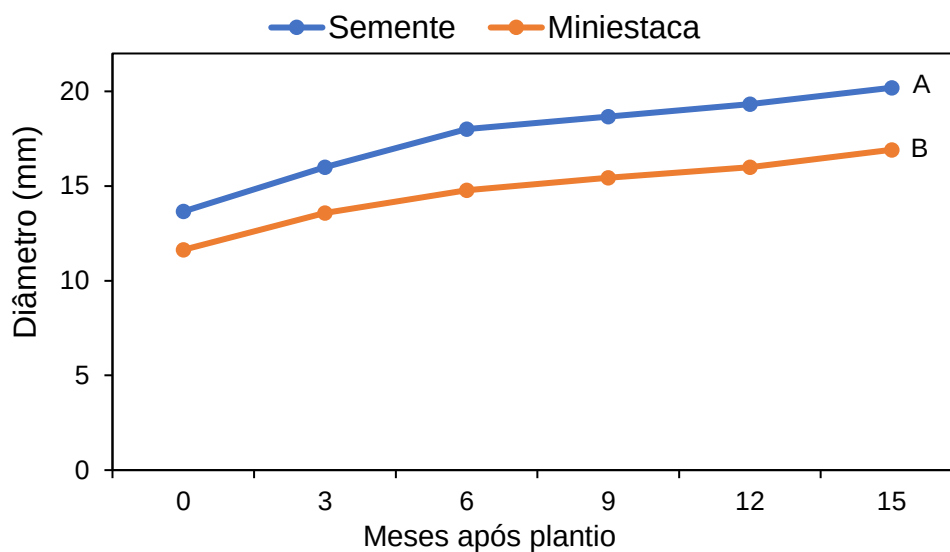


Figura 13 - Diâmetro do colo de plantas de *P. peroba* propagadas por sementes e miniestacas, ao longo de 15 meses após o plantio no campo. *Letras maiúsculas comparam o método de propagação.

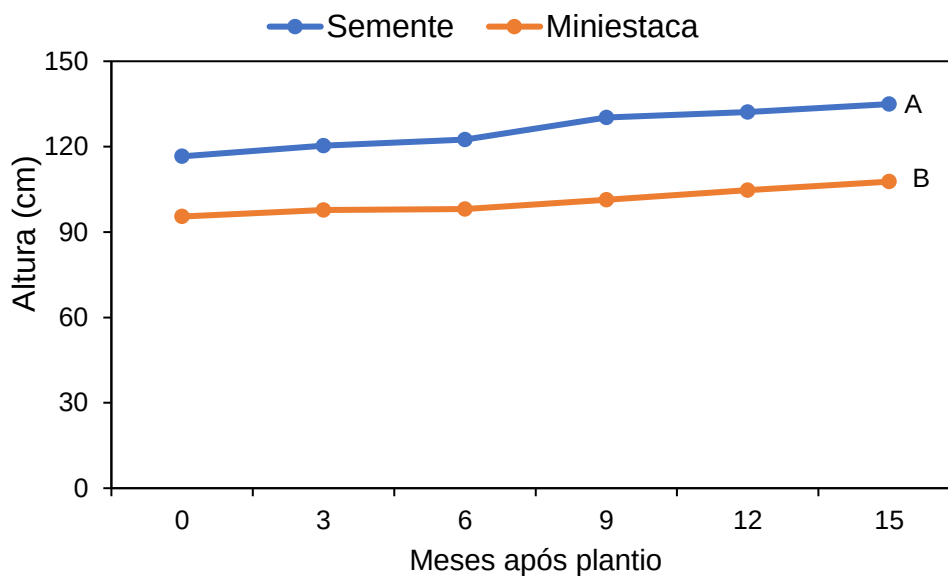


Figura 14 - Altura de plantas de *P. peroba* propagadas por sementes e miniestacas ao longo de 15 meses após o plantio no campo. *Letras maiúsculas comparam o método de propagação.

As plantas provenientes de sementes já apresentavam diâmetro e altura superiores às oriundas de miniestacas, indicando uma vantagem inicial no crescimento.

As diferenças mantidas refletem também as características avaliadas no sistema radicular das mudas e na simulação de campo em vasos, em que o sistema radicular das mudas produzidas por sementes se mostrou mais desenvolvido e estruturalmente robusto.

O método de propagação influencia diretamente o desenvolvimento inicial e o desempenho das plantas no campo. Estudos, como o de Kiragu et al. (2015), que analisaram o desempenho de *Moringa oleifera*, demonstraram que as plantas propagadas por sementes apresentaram taxas de crescimento superiores, o que pode ser explicado pelo vigor inicial conferido pelo desenvolvimento embrionário completo.

Embora as miniestacas apresentem um crescimento contínuo ao longo do tempo, sua *performance* inicial inferior pode estar associada a limitações no estabelecimento do sistema radicular, conforme descrito por Awotedu et al. (2021). Esses autores destacam que o método de propagação vegetativa, por depender da regeneração de tecidos, pode apresentar desvantagens no início do ciclo de crescimento, resultando em taxas de incremento de diâmetro mais lentas.

Li et al. (2022) analisaram a arquitetura radicular em plantas propagadas por sementes e por métodos vegetativos, destacando que as plantas originadas de sementes desenvolvem sistemas radiculares mais profundos e ramificados. Essa característica proporciona maior estabilidade e uma capacidade superior de absorção de recursos, contribuindo para um crescimento mais acelerado do caule e, conseqüentemente, para maior incremento em diâmetro, como observado no presente estudo.

Para Chong (2011), fatores como o tipo de solo e as condições ambientais podem acentuar as diferenças entre os métodos de propagação. No caso das miniestacas, quando cultivadas em solos com baixa aeração ou menor capacidade de retenção hídrica, o estresse durante a fase inicial de enraizamento tende a ser mais intenso, comprometendo o estabelecimento do sistema radicular e, por consequência, limitando o crescimento das plantas. Nos resultados obtidos, esse efeito adverso pode estar relacionado às condições do solo no campo, caracterizado por alta acidez e pela elevação do lençol freático durante o período

experimental, fatores que possivelmente dificultaram o desenvolvimento inicial das miniestacas.

Os resultados do presente estudo também indicam uma maior adaptabilidade das plantas seminíferas a solos heterogêneos e a condições de ambientes variáveis. De forma semelhante, Zahawi e Holl (2014) concluíram que a propagação por sementes é superior em termos de desenvolvimento do sistema radicular e crescimento em altura, corroborando os resultados obtidos neste trabalho.

O vigor inicial superior e o desenvolvimento de um sistema radicular mais robusto, em termos de diâmetro e comprimento das raízes de sustentação, são características da propagação por sementes que favorecem a adaptação das plantas a condições ambientais adversas. Entretanto, caso o interesse seja a implantação de plantios comerciais a partir de materiais selecionados, ou pomares clonais de sementes, a miniestaquia é uma técnica viável para a espécie.

Não houve diferença estatística ($p > 0,05$) no incremento relativo em diâmetro (Figura 15), entretanto, houve diferença no incremento em altura (Figura 16) entre as plantas provenientes de sementes e de miniestacas.

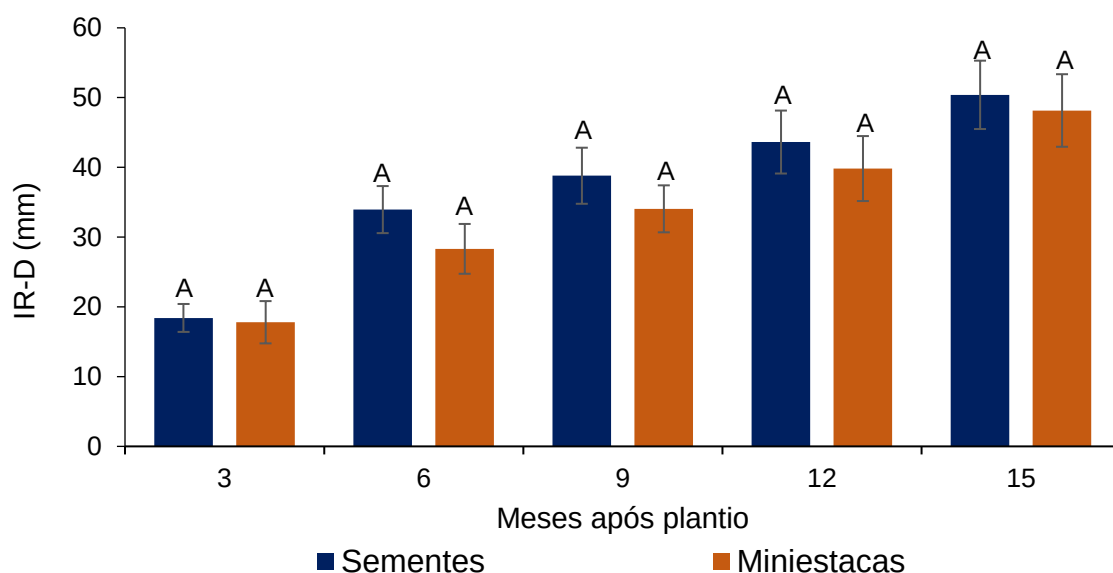


Figura 15 - Avaliação do incremento relativo em diâmetro (IR-D) ao longo dos meses das plantas de *P. peroba* propagadas por sementes e miniestacas. *Barras representam o erro-padrão da média e letras maiúsculas comparam o método de propagação.

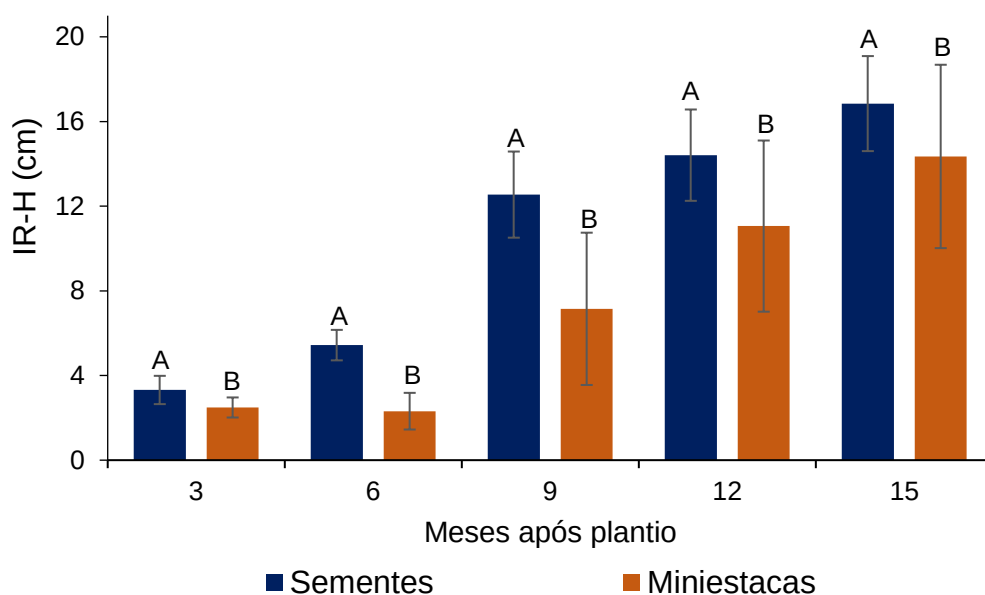


Figura 16 - Avaliação do incremento relativo em altura (IR-H) ao longo dos meses das plantas de *P. peroba* propagadas por sementes e miniestacas. *Barras representam o erro-padrão da média e letras maiúsculas comparam o método de propagação.

A diferença na taxa de crescimento em diâmetro e altura foi mantida durante os 15 meses após o plantio para os dois materiais

Do ponto de vista prático, a escolha entre sementes e miniestacas dependerá dos objetivos específicos do produtor. Para projetos que priorizam um rápido estabelecimento inicial e redução nos custos de manejo, as sementes podem ser mais indicadas. Por outro lado, em programas de melhoramento genético, nos quais há necessidade de replicar genótipos superiores, as miniestacas oferecem maior controle e previsibilidade no desenvolvimento das plantas e embora com crescimento mais lento, mostram-se viáveis.

O estudo de Finegan et al. (1999) investigou o aumento do diâmetro de 106 espécies arbóreas em florestas tropicais na Costa Rica. Os autores destacaram que o incremento em diâmetro varia amplamente entre as espécies, dependendo de fatores como as condições ambientais e características intrínsecas da planta. Seus achados corroboram o presente estudo, que demonstra que o tipo de propagação influencia a arquitetura do sistema radicular, a qual, por sua vez, afeta o crescimento em diâmetro do caule, refletindo diferentes estratégias de adaptação ao ambiente.

Os resultados sugerem que a origem do material propagativo pode desempenhar um papel significativo no crescimento inicial de *Paratecoma peroba*, auxiliando na escolha do método de propagação aos diferentes objetivos de manejo.

Vanclay (1991) destacou a utilidade das agregações de espécies para o desenvolvimento de equações de incremento, enfatizando a importância do incremento relativo como uma métrica complementar para o manejo florestal. O presente estudo demonstra que o incremento relativo oferece informações adicionais sobre o desempenho de plantas propagadas por diferentes métodos.

Em relação aos dados obtidos referentes ao incremento relativo em altura, observa-se que as plantas produzidas por sementes tiveram um incremento médio superior ao das miniestacas em todos os meses analisados. Apesar desta diferença, observa-se uma tendência de redução das diferenças nas taxas de crescimento em altura (Figura 16) ao longo das avaliações, sendo possível, no longo prazo, que as diferenças desapareçam. Esse comportamento é semelhante ao observado por Figueiredo et al. (2011), que relataram que mudas clonais dos híbridos *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*, apesar de apresentarem crescimento inicial superior devido às maiores dimensões iniciais, tenderam a equalizar o desenvolvimento com o tempo.

A produção florestal é frequentemente avaliada com base no diâmetro e na altura das plantas. Assim, é importante saber se diferentes métodos de propagação impactam o crescimento das plantas, e se as diferenças que ocorrem no viveiro podem ser compensadas após o plantio.

No presente estudo as diferenças morfológicas observadas no viveiro refletiram-se parcialmente na *performance* no campo. As mudas propagadas por sementes, que apresentaram maior número de raízes laterais e maior número de folhas, mantiveram crescimento superior em diâmetro e altura nos primeiros quinze meses após o plantio. Essa vantagem inicial do sistema radicular pode ter favorecido a absorção de recursos e o estabelecimento no campo, enquanto as mudas de miniestacas, embora com raízes adventícias mais longas no viveiro, mostraram desempenho inferior. Esses resultados sugerem que as diferenças estruturais no sistema radicular originadas pelo método de propagação influenciam o crescimento das plantas no campo, mesmo após o período de viveiro.

De forma geral, o crescimento das plantas reflete a eficiência na utilização do espaço e dos recursos disponíveis, indicando que as diferenças no sistema radicular podem impactar o crescimento inicial das mudas no campo.

Os resultados apresentados indicam que a propagação por sementes proporciona um crescimento inicial superior da *P. peroba* após o plantio.

6. CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo permitiram concluir que na produção de mudas clonais e seminíferas de *Paratecoma peroba*, ambos os métodos de propagação são viáveis, porém apresentam padrões distintos de crescimento radicular. As mudas seminíferas desenvolveram raízes pivotantes mais longas e grossas, enquanto as clonais exibiram um sistema radicular mais ramificado e superficial. Essas diferenças estruturais influenciaram a velocidade de crescimento inicial, sendo as mudas seminíferas mais vigorosas nas fases iniciais do experimento.

Aos 10 meses após o plantio em vasos, as plantas originadas de sementes apresentaram raízes de sustentação com maior crescimento do que aquelas produzidas por miniestaquia.

No campo, as diferenças na altura e diâmetro entre os métodos de propagação obtidos em viveiro foram mantidas até 15 meses após o plantio, com as plantas seminíferas mantendo um crescimento inicial mais acelerado.

Embora com diferenças no crescimento, ambas as formas de propagação são tecnicamente viáveis para a produção comercial de mudas de *P. peroba*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abarca, D., Pizarro, A., Hernández, I., Sánchez, C., Solana, S. P., del Amo, A., Carneros, E., Díaz-Sala, C. (2014) The GRAS gene family in pine: Transcript expression patterns associated with the maturation-related decline of competence to form adventitious roots. *BMC Plant Biology*, 14:354. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12870-014-0354-8>

Agudo, T. C. (2022) Bioestimulante e ácido giberélico como nova proposta no enraizamento de miniestacas de *Ilex paraguariensis* A. St.-Hil. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), Guarapuava, 95 f. Disponível em: <<http://tede.unicentro.br:8080/jspui/handle/jspui/2082>> Acesso em: 13 de janeiro de 2025.

Agusti, J., Ramireddy, E., Brumós, J. (2021) Editorial: Integration of Hormonal Signals Shaping Root Growth, Development, and Architecture. *Frontiers in Plant Science*, 12:634066. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.634066>

Albrecht, U., Bordas, M., Lamb, B., Meyering, B., Bowman, K. D. (2017) Influence of Propagation Method on Root Architecture and Other Traits of Young Citrus Rootstock Plants. *HortScience*, 52(11), 1569–1576.

Alfenas, A. C., Zalza, A. A., Mafia, R. G., Assis, T. F. (2009) Clonagem e doenças do eucalipto 2. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 500p.

Alvarez, R., Nissen, S.J., Sutter, E.G. (1989) Relationship between indole-3-acetic acid levels in apple (*Malus pumila* Mill) rootstocks cultured *in vitro* and adventitious root formation in the presence of indole-3-butyric acid. *Plant Physiology*, 89:439-444. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.89.2.439>

Alvarez-Flores, R., Nguyen-Thi-Truc, A., Peredo-Parada, S., Joffre, R., Winkel, T. (2018) Rooting plasticity in wild and cultivated Andean *Chenopodium* species under soil water deficit. *Plant and Soil*, 425:479-492. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3588-7>

Antunes, D. F., Machado, A. J. T., Carvalho, M. N. M. (2022) Diversidade florística da chapada do Araripe. 1. ed. Curitiba: Editora Omnis Scientia, v. 1.

Araújo, E. F., Gibson, E. L., Santos, A. R., Gonçalves, E. O., Wendling, I., Alexandre, R. S., Pola, L. A. (2019) Mini-cutting technique for vegetative propagation of *Paratecoma peroba*. *Cerne*, 25:314-325.

Archanjo, K. M. P. A., Silva, G. F., Chichorro, J. F., Soares, C. P. B. (2012) Estrutura do componente arbóreo da Reserva Particular do Patrimônio Natural Cafundó, Cachoeiro de Itapemirim, Espírito Santo, Brasil. *Floresta*, 42:145-160.

Assis, T. F., Abad, J. I. M., Aguiar, A. M. (2015) Melhoramento genético do eucalipto. *Silvicultura do eucalipto no Brasil*. Santa Maria: UFMS, 308p.

Atkinson, J.A., Rasmussen, A., Traini, R., Voss, U., Sturrock, C., Mooney, S.J., Wells, D.M., Bennett, M.J. (2014) Branching Out in Roots: Uncovering Form, Function, and Regulation. *Plant Physiology*, 166:538-552. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.114.243998>

Ávila, P. A. (2020) Aspectos morfofisiológicos da copa e do sistema radicular de espécies de *Eucalyptus* e *Corymbia* com diferentes tolerâncias à deficiência hídrica. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 135p. Disponível em < <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-13082020-122418/pt-br.php> > Acesso em: 10 de setembro de 2024.

Avinio, R. S. (2021) Competência ao enraizamento adventício de miniestacas de *Acacia mearnsii* De Wild. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 86 p. Disponível em: < https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/22735/DIS_PPGEF_2021_AVINIO_RENATA.pdf?sequence=1&isAllowed=y > Acesso em: 13 de janeiro de 2025.

Awotedu, B.F., Omolola, T. O., Akala, A. O., Awotedu, O. L., Olaoti-Laaro, S. O. (2021) Vegetative Propagation: A Unique Technique of Improving Plants Growth. *World News of Natural Sciences*, 35:83-101.

Bandeira, F. S., Xavier, A., Otoni, W. C., Lani, E. R. G. (2007) Aclimatização *ex vitro* de plantas propagadas pela enxertia *in vitro* de clones de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*. *Revista Árvore*, 31:773-781.

Barbeta, A., Peñuelas, J. (2017) Relative contribution of groundwater to plant transpiration estimated with stable isotopes. *Scientific Reports*, 7:10.

Barroso, D. G. (1999) Qualidade de mudas de *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus urophylla* produzidas em tubetes e em blocos prensados com diferentes substratos. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos do Goytacazes, 79p.

Baul, T. K., Mezbahuddin, M., Hossain, M. M., Mohiuddin, M. (2010) Vegetative propagation of *Holarrhena pubescens*, a wild tropical medicinal plant: effect of indole-3- butyric acid (IBA) on stem cuttings. *Forestry Studies in China*, 12(4):228-235. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11632-010-0409-3>

Beidler, K., Taylor, B., N. Strand, A., E. Cooper, E. R., Schönholz, M., Pritchard, S. G. (2015) Changes in root architecture under elevated concentrations of CO₂ and nitrogen reflect alternate soil exploration strategies. *New Phytologist* 205(3):1153-1163. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.13123>

Bellini, C., Pacurar, D. I., Perrone, I. (2014) Adventitious roots and lateral roots: similarities and differences. *Plant Biology*, 65(1):639-666.

Benin, C. C., Peres, F. S. B., Garcia, F. A. de. (2013) O enraizamento de miniestacas apicais, intermediárias e basais em clones de *Eucalyptus benthamii*. *Floresta*, 43(3):421-428. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11632-010-0409-310.5380/rf.v43i3.28542>

Berg, W. K., Brouder, S. M., Cunningham, S. M., Volenec, J. J. (2021) Potassium and phosphorus fertilizer impacts on alfalfa taproot carbon and nitrogen reserve accumulation and use during fall acclimation and initial growth in spring. *Frontiers in Plant Science*, 12:1-14.

- Berude, M. C., Araújo, E. F., Sant'Ana, B. T., Alexandre, R. S., Gonçalves, E. O. (2020) Rooting of *Inga edulis* Mart. (Leguminosae- Mimosoideae) mini-cuttings. *Floresta*, 50:1091-1098.
- Bhatia, P., Ashwath, N. (2004) Comparative performance of micropropagated and seed-grown tomato plants. *Biologia Plantarum*, 48(4):625-628.
- Biedrzycki, M. L., Jilany, T. A., Dudley, S. A., Bais, H. P. (2010) Root exudates mediate kin recognition in plants. *Communicative & Integrative Biology*, 3:1-8.
- Bilbrough, C.J., Caldwell, M.M. (1997) Exploitation of Springtime Ephemeral N Pulses by Six Great Basin Plant Species. *Ecology*, 78:231-243.
- Boivin, J. R., Salifu, K.F., Timmer, R. (2004) Late-season fertilization of *Picea mariana* seedlings: intensive loading and outplanting response on greenhouse bioassays. *Annals of Forest Science*, 61:737-745.
- Bonser, A., Lynch, J., Snapp, S. (1996) Effect of phosphorus deficiency on growth angle of basal roots in *Phaseolus vulgaris*. *New Phytologist*, 132:281-288.
- Bontpart, T., Concha, C., Giuffrida, M., Robertson, I., Admkie, K., Degefu, T., Girma, N., Tesfaye, K., Haileselassie, T., Fikre, A., Fetene, M., Tsaftaris, S. A., Doerner, P. (2020) Affordable and Robust Phenotyping Framework to Analyse Root System Architecture of Soil-Grown Plants. *The Plant Journal*, 103:2330-2343.
- BRASIL (2014) Ministério do Meio Ambiente. Lista de espécies madeireiras comerciais ameaçadas de extinção. Disponível em: <<https://snif.florestal.gov.br/volumebr/ptbr/>>. Acesso em: 28 de janeiro de 2023.
- Braun, L., Wyse D. (2019) Optimizing IBA Concentration and Stem and Segment Size for Rooting of Hybrid Hazelnuts from Hardwood Stem Cuttings. *Journal of Environmental Horticulture*, 37:1-8.
- Brondani, G. E., Wendling, I., Grossi, F., Dutra, L. F., Araújo, M.A. (2010) Miniestaquia de *Eucalyptus benthamii* × *Eucalyptus dunnii*: (II) sobrevivência e

enraizamento de miniestacas em função das coletas e estações do ano. *Ciência Florestal*, 22:509-520.

Brondani, G. E., Wendling, I., Grossi, F., Dutra, L. F., Araújo, M.A. (2012) Miniestaquia de *Eucalyptus benthamii* × *Eucalyptus dunnii*: (I) sobrevivência de minicepas e produção de miniestacas em função das coletas e estações do ano. *Ciência Florestal*, 22:11-21.

Brunner, I., Godbold, D. (2007) Tree roots in a changing world. *Journal of Forest Research*, 12:78-82.

Brunoni, F., Ljung, K., Bellini, C. (2019) Control of root meristem establishment in conifers. *Physiologia Plantarum*, 165:81-89.

Bui, K.T., Naruse, T., Yoshida, H., Toda, Y., Omori, Y., Tsuda, M., Kaga, A., Yamasaki, Y., Tsujimoto, H., Ichihashi, Y., Hirai, M., Fujiwara, T., Iwata, H., Matsuoka, M., Takahashi, H., Nakazono, M. (2022) Effects of irrigation on root growth and development of soybean: A 3-year sandy field experiment. *Frontiers in Plant Science*, 13:1-15.

Bustillo-Avendaño, E., Ibáñez, S., Sanz, O., Sousa Barros, J.A., Gude, I., Perianez-Rodriguez, J., Micol, J.L., Del Pozo, J.C., Moreno-Risueno, M.A., Pérez-Pérez, J.M. (2018) Regulation of Hormonal Control, Cell Reprogramming, and Patterning during De Novo Root Organogenesis. *Plant Physiology*, 176:1709-1727.

Cano, C. I. M., Arias, M. L., Colorado, A. A. C., Cardona, L. E. (2015) Análisis del desarrollo de plantas de mortño (*Vaccinium meridionale* Swart.) bajo dos sistemas de propagación: clonal y sexual. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 16:65-77.

Carneiro, J.G. de A. (1976) Determinação do padrão de qualidade de *Pinus taeda* para plantio definitivo. Tese de Mestrado em Ciências – Engenharia Florestal, Curitiba: UFPR, 70p.

Carron, M. P., Le Roux, Y., Tison, J., Dea, B. G., Caussanel, V., Clair, J., Keli, J. (2000) Compared root system architectures in seedlings and *in vitro* plantlets of

Hevea brasiliensis, in the initial years of growth in the field. *Plant and Soil*, 223:73-85.

Carvalho, I. M. M., Queirós, L. D., Brito, L. F., Santos, F. A., Moreira, A., Souza, A. L., de Queiroz, J.H. (2012) Caracterização química da castanha de sapucaia (*Lecythis pisonis* Cambess.) da região da zona da mata mineira. *Bioscience Journal*, 28:971-977.

Cascone, I., Napione, L., Maniero, F., Serini, G., Bussolino, F. (2005) Stable interaction between $\alpha 5 \beta 1$ integrin and Tie2 tyrosine kinase receptor regulates endothelial cell response to Ang-1. *The Journal of Cell Biology*, 170:993-1004.

Chavarría-Krauser, A., Nagel, K.A., Palme, K., Schurr, U., Walter, A., Scharr, H. (2008) Spatio-temporal quantification of differential growth processes in root growth zones based on a novel combination of image sequence processing and refined concepts describing curvature production. *New Phytologist*, 177:811-821.

Chong, C. (2011) Chapter 5. Media and containers for seed and cutting propagation and transplanting, in: Beyl, C.A., Trigiano, R.N. (Eds.), *Plant Propagation: Concepts and laboratory exercises*. CRC Press, London: 54.

Choudhary, M., Kumari, A. (2021) Understanding Plant Hormones: Mechanisms and Functions in Growth and Development. *Plant Science Archives*, 6:1-3.

Chouhan, R., Nautiyal, A.K., Sharma, N., Gandhi, S.G. (2023) Plant transcription factors and root development. *Plant Transcription Factors*, Academic Press, 63-76.

Clima Tempo. (2024) Climatologia em Itaocara, BR. Disponível em: <<https://www.climatempo.com.br/climatologia/2668/itaocara-rj>> Acesso em: 5 de agosto de 2024.

Climate Data. ClimateData.org, OpenStreetMap.org. (2024) Disponível em: <<http://pt.climate-data.org/location/4053/>> Acesso em: 22 de janeiro de 2024.

Clowes, F. A. L. (2000) Pattern in root meristem development in angiosperms. *New Phytologist*, 146:83–94.

CNCFlora (2023). *Paratecoma peroba* in Lista vermelha da flora brasileira versão 2012.2. Centro Nacional de Conservação da Flora. Disponível em: <<http://cncflora.jbrj.gov.br/volumebr/portal/pt-br/profile/Paratecomaperoba>> Acesso em: 20 de novembro de 2023.

Comas, L. H., Becker, S. R., Von Mark, C., Byrne, P. F., Dierig, D. A. (2013) Root traits contributing to plant productivity under drought. *Frontiers in Plant Science*, 4, 442.

Cuesta, B., Vega, J., Villar-Salvador, P., Rey-Benayas, J. M. (2010) Root growth dynamics of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) seedlings in relation to shoot elongation, plant size and tissue nitrogen concentration. *Trees*, 24:899–908.

Davis, K. T., Dobrowski, S. Z., Higuera, P., Holden, Z.A., Veblen, T.T., Rother, M.T., Parks, S.A., Sala, A., Maneta, M.P. (2019) Wildfires and climate change push low-elevation forests across a critical climate threshold for tree regeneration. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116:6193–6198.

De Almeida, M.R., Aumond Jr, M., Da Costa, C.T., Schwambach, J., Ruedell, C. M., Correa, L. R., Fett-Neto, A. G. (2017) Environmental control of adventitious rooting in *Eucalyptus* and *Populus* cuttings. *Trees*, 31:1377–1390.

De Klerk, G.J., Van der Krieken, W., de Jong, J.C. (1999) Review the formation of adventitious roots: New concepts, new possibilities. *In Vitro Cell. Biology Plant*, 35:189–199.

De Smet, I. (2012) Lateral root initiation: one step at a time. *New Phytologist*, 193:867–873.

De Smet, S., Cuypers, A., Vangronsveld, J., Remans, T. (2015) Gene Networks Involved in Hormonal Control of Root Development in *Arabidopsis thaliana*: A Framework for Studying Its Disturbance by Metal Stress. *International Journal of Molecular Science*, 16:19195–224.

Della Rovere, F., Fattorini, L., D'Angeli, S., Veloccia, A., Falasca, G., Altamura, M.M. (2013) Auxin and cytokinin control formation of the quiescent centre in the adventitious root apex of *Arabidopsis*. *Annals of Botany*, 112:1395–1407.

- Dello Ioio, R., Linhares, F.S., Scacchi, E., Casamitjana-Martinez, E., Heidstra, R., Costantino, P., Sabatini S. (2007) Cytokinins determine *Arabidopsis* root-meristem size by controlling cell differentiation. *Current Biology*, 17:678–682.
- Den Herder, G., Van Isterdael, G., Beeckman, T., De Smet, I. (2010) The roots of a new green revolution. *Trends Plant Science*, 15:600–607.
- Di Iorio, A., Lasserre, B., Scippa, G. S., Chiatante, D. (2005) Root system architecture of *Quercus pubescens* trees growing on different sloping conditions. *Annals of Botany*, 95: 351–361.
- Dias, B. A. S. (2011) Análise comparativa de tubetes biodegradáveis e de polietileno na produção de mudas de *Paratecoma peroba* (Record & Mell) Kuhlmann. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 84p.
- Dias, P. C., Oliveira, L. S., Xavier, A., Wendling, I. (2012) Estaquia e miniestaquia de espécies florestais lenhosas do Brasil. *Brazilian Journal of Forestry Research. Pesq. flor. bras.*, Colombo, 32(72):453-462.
- Dias, P. C., Xavier, A., Oliveira, L. S., Correia, A. C. G., Barbosa, G. A. (2015) Tipo de miniestaca e substrato na propagação vegetativa de Angico-vermelho (*Anadenanthera macrocarpa* (Benth.) Brenan). *Ciência Florestal*, 25(4): 909 – 919.
- Díaz-Sala, C. (2014) Direct reprogramming of adult somatic cells toward adventitious root formation in forest tree species: the effect of the juvenile–adult transition. *Frontiers in Plant Science*, 5:310.
- Ding, Y., Schiestl-Aalto, P., Helmisaari, H.S., Makita, N., Ryhti, K., Kulmala, L. (2020) Temperature and moisture dependence of daily growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) roots in Southern Finland. *Tree Physiology*, 40: 272–283.
- Dolan, L., Janmaat, K., Willemsen, V., Linstead, P., Poethig, S., Roberts, K., Scheres, B. (1993) Cellular organization of the *Arabidopsis thaliana* root. *Development*, 119(1):71–84.

de Dorlodot, S., Forster, B., Pagès, L., Price, A., Tuberosa, R., Draye, X. (2007) Root system architecture: opportunities and constraints for genetic improvement of crops. *Trends Plant Science*, 12(10): 474–481.

Druege, U., Hilo, A., Pérez-Pérez, J.M., Klopotek, Y., Acosta, M., Shahinnia, F., Zerche, S., Franken, P., Hajirezaei, M. R. (2019) Molecular and physiological control of adventitious rooting in cuttings: phytohormone action meets resource allocation, *Annals of Botany*, 123:929–949.

Dubrovsky, J. G., Gambetta, G.A., Barrera A.H., Shishkova, S., González, I. (2006) Lateral root initiation in *Arabidopsis*: developmental window, spatial patterning, density and predictability. *Annals of Botany*, Oxford, 97:903–915.

Engel, M. L., Alcantara, G. B., Flôres Júnior, P. C., Higa, A. R. (2019) Indução de brotações em matrizes de *Acacia mearnsii* De Wildeman em relação a idades e quatro estações do ano. *Scientia Forestalis*, 47(122):235-244.

Engel, V. L., Martins, F. R. (2005) Reproductive phenology of Atlantic Forest tree species em Brazil: an eleven-year study. *Tropical Ecology*, 46(1):1-16.

Eshel, A. Beeckman, T. (Eds.) (2013) Plant roots: the hidden half. CRC Press.

Fachinello, J.C., Hoffmann, A., Nachtigal, J.C. (2005) Propagação de plantas frutíferas. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, 221p.

Fassio, C., Cautin, R., Pérez-Donoso, A., Bonomelli, C., Castro, M. (2016) Propagation Techniques and Grafting Modify the Morphological Traits of Roots and Biomass Allocation in Avocado Trees. *HortTechnology*, 26(1):63-69.

Fett-Neto, A.G., Fett, J.P., Goulart, L.W., Pasquali, G., Termignoni, R.R., Ferreira, A.G. (2001) Distinct effects of auxin and light on adventitious root development in *Eucalyptus saligna* and *Eucalyptus globulus*. *Tree Physiol*, 21(7):457–464.

Figueiredo, F. A. M. de A., Carneiro, J. G. A., Penchel, R. M., Barroso, D. G., Daher, R.F. (2011) Efeito das variações biométricas de mudas clonais de eucalipto sobre o crescimento no campo. *Revista Árvore*, 35(1):1-9.

Finegan, B., Camacho, M., Zamora, N. (1999) Diameter increment patterns among 106 species in a logged and silviculturally treated Costa Rican rain forest. *Forest Ecology and Management*, 121:159-176.

Fitter, A.H. (2002) Characteristics and Functions of Root Systems. In: Plant Roots the Hidden Half (Waisel, Eshel & Kafkafi eds.), 49-78, CRC Press.

Flora do Brasil. (2020) *Paratecoma peroba*. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://floradobrasil2020.jbrj.gov.br/volumebr/reflora/floradobrasil/FB114203>> Acesso em: 07 de novembro de 2023.

Folk, R. S., Grossnickle, S. C. (2000) Stock-type patterns of phosphorus uptake, retranslocation, net photosynthesis and morphological development in interior spruce seedlings. *New Forests*, 19:27–49.

Fonta, J. E., Giri, J., Vejchasarn, P., Lynch, J. P., Brown, K. M. (2022) Spatiotemporal responses of rice root architecture and anatomy to drought. *Plant Soil*, 479: 443–464.

Forde, B., Lorenzo, H. (2001) The nutritional control of the root development. *Plant and Soil*, 232: 51-68.

Fragoso, R. O., Stuepp, C. A., Sá, F. P., Kratz, D., Zuffellato Ribas, K. C. Wendling, I. (2017) Vegetative rescue and *ex vitro* system production of *Tibouchina sellowiana* clonal plants by cutting and mini-cutting. *Ciência Rural*, 47(11):1-9.

Frampton, L. J., Foster, G. S. (1993) Field testing vegetative propagules. In: AHUJA, M. R. LIBBY, W. J. Clonal forestry I: genetics and biotechnology. Budapest: Springer-Verlag, p. 110-134.

Freschet, G. T., Violle, C., Bourget, M.Y., Scherer-Lorenzen, M., Forte, F. (2018) Allocation, morphology, physiology, architecture: the multiple facets of plant above- and below-ground responses to resource stress. *New Phytologist*, 219(4): 1338–1352.

Freschet, G. T., Pagès, L., Iversen, C. M., Comas, L. H., Rewald, B., Roumet, C., et al. (2021) A starting guide to root ecology: strengthening ecological concepts and standardising root classification, sampling, processing and trait measurements. *New Phytologist Foundation*, 232:973–1122.

Fromm, H. (2019) Root plasticity in the pursuit of water. *Plants*, 8(7):236.

Gatto, M. B. (2023) Propagação vegetativa de *Eugenia uniflora* L. Trabalho de Conclusão de Curso (Agronomia) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Campus Ibirubá, 25p. Disponível em: <<https://dspace.ifrs.edu.br/bitstream/handle/123456789/1330/1234567891330.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso em: 07 de março de 2025.

Gazal, R. M., Kubiske, M. E. (2004) Influence of initial root length on physiological responses of cherrybark oak and shumard oak seedlings to field drought conditions. *For. Ecol. Manage.*, 189:295–305.

Geiss, G., Gutierrez, L., Bellini, C. (2009) Adventitious root formation: new insights and perspectives. In: Beeckman, T. (Ed.) *Annual plant reviews. Root development*. Chichester, West Sussex: Wiley & Sons, 37:127–156.

Geiss, G., Gutierrez, L., Bellini, C. (2018) Adventitious root formation: new insights and perspectives. *Annual Plant Reviews*, 37(1):127-156.

Gentry, A.H. (1974) Flowering phenology and diversity in tropical Bignoniaceae. *Biotropica*, 6:64-68.

Gomes, J. M., Carvalho, J. O. P., Ruschel, A. R., Silva, J. N. M., Ramos, E. M. L. S., Castro, T. C., Costa, N. S. L., Carneiro, F. S., D'arace, L. M. B. (2021) Regeneração natural de espécies ameaçadas de extinção em áreas experimentais na Amazônia Oriental. *Biodiversidade Brasileira*, 11(3):623-634.

Gonçalves, E. D., Caldeira, M. W., Araújo, E. F., Sant'Ana, B. T., Ramalho, A. S., Gibson, E. L., Feletti, T. A., Tertuliano, L. A., Pola, L. A., Rezende, G. P. (2021) Propagação assexuada em espécies arbóreas da floresta atlântica. *Sistemas Integrados de Produção: pesquisa e desenvolvimento de tecnologias*, Editora Científica Digital, 7:127-144.

Gonçalves, J. L. D., Alvares, C. A., Higa, A. R., Silva, L. D., Alfenas, A. C., Stahl, J., Ferraz, S. F. D., Lima, W. D. P., Brancalion, P. H. S., Hubner, A., Bouillet, J. P. D., Laclau, J. P., Nouvellon, Y., Epron, D. (2013) Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management*, 301:6-27.

Gonçalves, J. L. M., Mello, S. L. M. (2005) O sistema radicular das árvores. In: Nutrição e fertilização florestal. Piracicaba: *IPEF*, p. 219-267.

Gonçalves, J.L.M., Benedetti, V. (eds.) (2000) Nutrição e fertilização florestal. Piracicaba: *Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais*, p.1-57.

Gonçalves, S. L., Lynch, J. P. (2014) Raízes de plantas anuais: tolerância a estresses ambientais, eficiência na absorção de nutrientes e métodos para seleção de genótipos. Londrina: Embrapa Soja, 67 p.

Gonin, M., Bergougnoux, V., Nguyen, T.D., Gantet, P., Champion, A. (2019) What Makes Adventitious Roots? *Plants*, 8(7):1-24.

Guan, L., Murphy, A. S., Peer, W. A., Gan, L. Li, Y., Cheng, Z. M. (2015) Physiological and Molecular Regulation of Adventitious Root Formation. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 34(5):506–521.

Guedes, R. S., Alves, E. D., Santos-Moura, S. S., Galindo. E.A. (2015) Teste de comprimento de plântula na avaliação da qualidade fisiológica de sementes de *Amburana cearensis* (Allemão) A.C. Smith. *Semina: Ciências Agrárias*, 36(4): 2373-2382.

Hamanishi, E. T., Campbell, M. M. (2011) Genome-wide responses to drought in forest trees. *Forestry*, 84:273–283.

Hartmann, H. T., Kerster, D. E., Davies Jr, F. T., Geneve, R. L. (2011) Hartmann and Kerster's Plant Propagation: principles and practices. 8ª Ed. Boston: Prentice Hall, 915p.

Herms, C. H., Hennessy, R. C., Bak, F., Dresboll, D. B., Nicolaisen, M. H. (2022) Back to our roots: exploring the role of root morphology as a mediator of beneficial plant–microbe interactions. *Environmental Microbiology*, 24(8):3264–3272.

Ho, M.D., Rosas, J.C., Brown, K.M., Lynch, J.P. (2005) Roots architectural tradeoffs for water and phosphorus acquisition. *Functional Plant Biology*, 32:737-748.

Hund, A., Fracheboud, Y., Soldati, A., Stamp, P. (2008) Cold tolerance of maize seedlings as determined by root morphology and photosynthetic traits. *Elsevier, European Journal of Agronomy*, 28:178-185.

Ibáñez, T. S., Wardle, D. A., Gundale, M. J., Nilsson, M. C. (2022) Effects of Soil Abiotic and Biotic Factors on Tree Seedling Regeneration Following a Boreal Forest Wildfire. *Ecosystems*, 25:471–487

ICMBio (2022) Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Atualização da lista oficial das espécies ameaçadas de extinção. Disponível em: <<https://www.icmbio.gov.br/cepsul/destaques-e-eventos/704-atualizacao-da-lista-oficial-das-especies-ameacadas-de-extincao.html>> Acesso em: 20 de janeiro de 2024.

INMET. (2024) Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais?utm_source=com> Acesso em: 02 de julho de 2024.

Irshad, A., Ahmad, H., Muhammad, I., Khan, S. U., Raza, S. (2024) Editorial: The role of water stress and soil texture on plant roots anatomy, architecture, and senescence. *Frontiers in Plant Science*, 15:1-3.

Iwama, A., Yamashino, T., Tanaka, Y., Sakakibara, H., Kakimoto, T., Sato, S., Kato, T., Tabata, S., Nagatani, A., Mizuno, T. (2007) AHK5 histidine kinase regulates root elongation through an ETR1-dependent abscisic acid and ethylene signaling pathway in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Cell Physiology*, 48:375–380.

Jan, M., Muhammad, S., Jin, W., Zhong, W., Zhang, S., Lin, Y., Zhou, Y., Liu, J., Liu, H., Munir, R., Yue, Q., Afzal, M., Wang, G. (2024) Modulating root system

architecture: cross-talk between auxin and phytohormones. *Frontiers in Plant Science*, 15:1-11.

Jia, Z., Giehl, R.F.H., Wirén, N. (2022) Nutrient–hormone relations: Driving root plasticity in plants. *Molecular Plant*, 15:86–103.

Jiang, J., Wang, Z., Chen, Z., Wu, Y., Mu, M., Nie, W., Zhao, S., Cui, G., Yin, X. (2023) Identification and Evolutionary Analysis of the Auxin Response Factor (ARF) Family Based on Transcriptome Data from Caucasian Clover and Analysis of Expression Responses to Hormones. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(15357):1-13.

Kageyama, P. Y., Castro, C. F. A. (1989) Sucessão secundária, estrutura genética e plantações de espécies arbóreas nativas. *IPEF*, Piracicaba, n. 41/42, p. 83 – 93.

Kahn, B. A., Stoffella, P. J., Sandsted, R. F., Zobel, R. W. (1985) Influence of Flooding on Root Morphological Components of Young Black Beans. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 110(5):623-627.

Karlova, R., Boer, D., Hayes, S., Testerink, C. (2021) Root plasticity under abiotic stress, *Plant Physiology*, 187:1057–1070.

Kerk, D., Sussex, I. (2012) Roots and Root System Development. In: WILEY ONLINE LIBRARY. Encyclopedia of Plant and Crop Science. 2. Ed, p. 1-10.

Kiragu, J.W., Mathenge, P., Kireger, E. (2015) Growth Performance of *Moringa oleifera* Planting Materials Derived from Cuttings and Seeds. *International Journal of Plant Science and Ecology*, 1(4):142-148.

Koevoets, I. T., Venema, J. H., Elzenga, J.T.M., Testerink, C. (2016) Roots withstanding their environment: exploiting root system architecture responses to abiotic stress to improve crop tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 7:1–19.

Kong, D., Ma, C., Zhang, Q., Li, L., Chen, X., Zeng, H., Guo, D. (2014) Leading dimensions in absorptive root trait variation across 96 subtropical forest species. *New Phytologist*, Oxford, 203(3):863–872.

Konrad, W., Miranda, T., Ebner, M. (2021) From tree to architecture: how functional morphology of arborescence connects plant biology, evolution and physics. *Fossil Record*, 24:223–243.

Kormanik, P.P. (1986) Lateral Root Morphology as an Expression of Sweetgum Seedling Quality, *Forest Science*, 32(3):595–604.

Kormanik, P. P (1989) Importance of first-order lateral roots in the early development of forest tree seedlings. *Developments in Soil Science-Elsevier*,18:157–169.

Kormanik, P. P., Ruehle, J. L. (1986) Lateral root development may define nursery seedling quality. In: Proceedings of the Southern Nursery Conference, Athens, GA: U.S. Forest Service.

Kormanik, P. P., Ruehle, J.L., Muse, H.D. (1990) Frequency Distribution and Heritability of First-Order Lateral Roots in Loblolly Pine Seedlings, *Forest Science*, 36(3):802–814.si

Kou, X., Han, W., Kang, J. (2022) Responses of root system architecture to water stress at multiple levels: A meta-analysis of trials under controlled conditions. *Frontiers in Plant Science*,13:1-16.

Krichen, K., Mariem, H. B., Chaieb, M. (2014) Ecophysiological requirements on seed germination of a Mediterranean perennial grass (*Stipa tenacissima* L.) under controlled temperatures and water stress. *South African Journal of Botany*, 94: 210-217.

Kroons, H., Hutchings, M.J. (1995) Morphological Plasticity in Clonal Plants: The Foraging Concept Reconsidered. *Journal of Ecology*, 83(1):143-152.

Kumar, A., Choudhary, A., Kaur, H., Sangeetha, K., Mehta, S., Husen, A. (2022) Physiological and environmental control of adventitious root formation in cuttings: an overview. In: Husen, A. (Ed.), Environmental, Physiological and Chemical Controls of Adventitious Rooting in Cuttings. Cambridge, MA: Academic Press (*Elsevier*), p. 1–24.

Lak, Z. A., Sandén, H., Mayer, M., Godbold, D.L., Rewald, B. (2020) Plasticity of Root Traits under Competition for a Nutrient-Rich Patch Depends on Tree Species and Possesses a Large Congruency between Intra- and Interspecific Situations. *Forests*, 11(5):528.

Leakey, R.R.B. (2014) Plant Cloning: Macropropagation. In: Neal Van Alfen, editor-in-chief. *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, San Diego: Elsevier, 4:349-359.

Legué, V., Rigal A., Bhalerao R. P. (2014) Adventitious root formation in tree species: involvement of transcription factors. *Physiologia Plantarum*, 151(2):192–198.

Leite, A. F. Gomes, M. A. S. (2013) Dinâmica ambiental e produção do espaço urbano e regional no norte fluminense. Campos dos Goytacazes, RJ. Essentia Editora, 165 p.

Leitner, D. Klepsch, S. Ptashnyk, M. Marchant, A. Kirk, G.J.D. Schnepf, A. Roose, T. (2009) A dynamic model of nutrient uptake by root hairs. *New Phytologist*, 185(3):792-802.

Lelu Walter, M.A., Thompson, D., Harvengt, L., Sanchez, L., Toribio, M., Pâques, L.E. (2013) Somatic embryogenesis in forestry with a focus on Europe: state of the art, benefits, challenges and future direction. *Tree Genetics & Genomes*, 9:883- 899.

Liu, X., Jiao, Y., Zhao, X., Y., Yu, X., Zhang, Q., Li, S., Ma, L., Tang, W., Yang, C., Yang, G., Sun, J., Miao, F. (2023) Root architecture of forage species varies with intercropping combinations. *Agronomy*, 13(9):2223.

Li, L., Deng, X., Zhang, T., Tian, Y., Ma, X., Wu, P. (2022) Propagation Methods Decide Root Architecture of Chinese Fir: Evidence from Tissue Culturing, Rooted Cutting and Seed Germination. *Plants*, 11:2472.

Li, N., Zhang, Y., Wang, X., Ma, H., Sun, Y., Li, G., Zhang, S. (2022) Integration of Transcriptomic and Proteomic Profiles Reveals Multiple Levels of Genetic

Regulation of Taproot Growth in Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.). *Frontiers in Plant Science*, 13:1-16.

Li, S.W., Xue, L., Xu, S., Feng, H., An, L. (2009) Mediators, Genes and Signaling in Adventitious Rooting. *The Botanical Review*, 75(2):230-247.

Lins, B. L. A., Nascimento, M. T. (2007) Efeito do corte seletivo na fenologia de *Paratecoma peroba* (Record) Kuhl. (Bignoniaceae) em uma mata de tabuleiro na Estação Ecológica Estadual de Guaxindiba, São Francisco de Itabapoana, RJ. Anais do VIII Congresso de Ecologia do Brasil, 23 a 28 de setembro de 2007, Caxambu – MG.

Lins, B. L. A., Nascimento, M. T. (2010) Fenologia de *Paratecoma peroba* (Bignoniaceae) em uma Floresta Estacional Semidecidual do Norte Fluminense, Brasil. *Rodriguésia*, 61(3):559-568.

Lohmann, L.G. e Ulloa, U. (2011) Bignoniaceae in iPlants prototype Checklist. Disponível em: <<http://www.iplants.org>>. Acesso em: 05 de dezembro de 2023.

Lohmann, L.G. (2024) *Paratecoma* in Flora e Funga do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB114203>>. Acesso em: 22 de janeiro de 2024.

Lohmann, L.G., Kaehler, M., Fonseca, L.H.M., Farias-Singer, R., Firetti, F., Silva Castro, M.M., Gomes, B.M., Frazão, A., Francisco, J.N.C., Thode, V.A., Zuntini, A.R., Medeiros, M.C.M.P., Kataoka, E.Y., Beyer, M. (2020) Bignoniaceae in Flora do Brasil 2020. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://floradobrasil2020.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB112305>>. Acesso em: 8 de dezembro de 2023.

Lopez, G., Ahmadi, S. H., Amelung, W., Athmann, M., Ewert, F., Gaiser, T., Gocke, M. I., Kautz, T., Postma, J., Rachmilevitch, S., Schaaf, G., Schnepf, A., Stoschus, A., Watt, M., Yu, P., Seidel, S.J. (2023) Nutrient deficiency effects on root architecture and root-to-shoot ratio in arable crops. *Frontiers in Plant Science*, 13:1-18.

Lorenzi, H. (2009) Árvores brasileiras – Manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. Nova Odessa: *Instituto Plantarum*, 2(3):384.

Lozano, Yudi M., Aguilar-Trigueros, C. A., Flaig, I. C., Rillig, M. C. (2020) Root trait responses to drought are more heterogeneous than leaf trait responses. *Functional Ecology*, 34(11):2224–2235.

Luis, C., Puértolas, J., Climent, J., Peters, J., González-Rodríguez, A. M., Morales, D., Jiménez, M. S. (2009) Nursery fertilization enhances survival and physiological status in Canary Island pine (*Pinus canariensis*) seedlings planted in a semiarid environment. *European Journal of Forest Research*, 128:221–229.

Luo, H. Xu, H. Chu, C. He, F. Fang, S. (2020) High temperature can change root system architecture and intensify root interactions of plant seedlings. *Frontiers in Plant Science*, 11:160. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00160>

Luxmoore, R. J., Cunningham, M., Mann, L. K., Tjoelker, M. G. (1993) Urea fertilization effects on nutrient uptake and growth of *Platanus occidentalis* during plantation establishment. *Trees*, 7:250–257.

Lynch, J., Marschner, P., and Rengel, Z. (2012) Effect of Internal and External Factors on Root Growth and Development. In: Marschner, P. (ed.) *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (3.^a ed.), San Diego: Academic Press, p. 331-346. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00013-3>

Lynch, J.P. (1995) Root architecture and plant productivity. *Plant Physiology*, 95:7-13.

Lynch, J.P. (2013) Steep, cheap and deep: an ideotype to optimize water and N acquisition by maize root systems. *Annals of Botany*, 112:347–357.

Mackay, D. S., Savoy, P. R., Grossiord, C., Tai, X. N., Pleban, J. R., Wang, D. R., McDowell, N.G., Adams, H.D., Sperry, J.S. (2020) Conifers depend on established roots during drought: results from a coupled model of carbon allocation and hydraulics. *New Phytologist*, 225:679–692.

- Malamy, J. E. (2005) Intrinsic and environmental response pathways that regulate root system architecture. *Plant Cell Environ*, 28:67–77.
- Malele, J., Kleynhans, R., Prinsloo, G., Matsiliza-Mlathi, B. (2021) Optimizing the cutting production of *Greyia radlkoferi*. *South African Journal of Botany*, 142:293-298.
- Mantovani, N., Roveda, M., Tres, L., Fortes, F. D. O., Grando, M. F. (2017) Cultivo de canafístula (*Peltophorum dubium*) em minijardim clonal e propagação por miniestacas. *Ciência Florestal*, 27(1):225-236.
- Markesteyn, I., Poorter, L. (2009) Seedling root morphology and biomass allocation of 62 tropical tree species in relation to drought- and shade-tolerance. *Journal of Ecology*, 97(2):311-325.
- Martinelli, G., Moraes, M. A. (2013) Livro Vermelho da Flora do Brasil. Centro Nacional de Conservação da Flora. Rio de Janeiro: Andrea Jacobson. 1102 p.
- Martínková, J., Klimeš, A., Klimešová, J. (2018) No evidence for nutrient foraging in root-sprouting clonal plants. *Basic and Applied Ecology*, 28:27-36.
- Martins, M. C. (2011) Ecologia, manejo, silvicultura e tecnologia de espécies nativas da Mata Atlântica. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, n.3, p 18.
- Mauer, O., Palátová, E. (2010) Decline of Norway spruce in the Krkonoše Mts. *Journal of forest science*, 56(8):361–372.
- Maurice, J., Laclau, J. P., Re, D. S., Gonçalves, J. L. M., Nouvellon, Y., Bouillet, J. P., Satpe, J. L., Ranger, J., Behling, M., Chopart, J. L. (2010) Fine root isotropy in *Eucalyptus grandis* plantations. Towards the prediction of root length densities from root counts on trench walls. *Plant Soil*, 334:261-275.
- McCully, M. E., Canny, M. J. (1988) Pathways and processes of water and nutrient movement in roots. *Plant and Soil*, 111(2):159–170.

Medeiros, A. C. S. (2001) Aspectos de dormência em sementes de espécies arbóreas. Embrapa Florestas. Circular técnica, 55.

Meng, Y., Xing, L., Li, K., Wei, Y., Wang, H., Mao, J., Dong, F., Ma, D., Zhang, Z., Han, M. (2019) Genome-wide identification, characterization and expression analysis of novel long non-coding RNAs that mediate IBA-induced adventitious root formation in apple rootstocks. *Plant Growth Regulation*, 87:287–302.

Merino, M.V., Aguilar, R. I., Rivero, M. J., Ordóñez, I. P., Piña, L. F., López-Belchí, M. D., Schoebitz, M. I., Noriega, F. A., Pérez, C. I., Cooke, A. S., Guedes, L. M. (2024) Distribution of Non-Structural Carbohydrates and Root Structure of *Plantago lanceolata* L. under Different Defoliation Frequencies and Intensities. *Plants*, 13(19):2773.

Montagnoli, A., Lasserre, B., Terzaghi, M., Byambadorj, S.O., Nyam-Osor, B., Scippa, G.S., Chiatante, D. (2022) Fertilization Reduces Root Architecture Plasticity in *Ulmus pumila* Used for Afforesting Mongolian Semi-Arid Steppe. *Frontiers in Plant Science*, 13:1-14.

Morellato, L.P.C., Rodrigues, R.R., Leitão Filho, H.F., Joly, C.A. (1989) Estudo comparativo da fenologia de espécies arbóreas de floresta de altitude e floresta mesófila semidecídua na Serra do Japi, Jundiaí, São Paulo. *Revista Brasileira de Botânica*, 12:85-98.

Motte, H., Beeckman, T. (2019) The evolution of root branching: increasing the level of plasticity. *Journal of Experimental Botany*, 70:785–793.

Moubayidin, L., Di Mambro, R., Sabatini, S. (2009) Cytokinin-auxin crosstalk. *Trends Plant Science*, 10:557-62.

Newstrom, L.E., Frankie, G.W., Baker, H.G. (1994) A new classification for plant phenology based on flowering patterns in Lowland Tropical Rain Forest trees at La Selva, Costa Rica. *Biotropica*, 26:141-159.

NomadSeason. (2024) Disponível em: <
<https://nomadseason.com/climate/brazil/rio-de-janeiro/itaocara.html>> Acesso em:
 02 de julho de 2024.

- Nunes, Y.R.F., Fagundes, M., Santos, R.M., Domingues, E.B.S., Almeida, H.S., Gonzaga, A.P.D. (2005) Atividades fenológicas de *Guazuma ulmifolia* Lam. (Malvaceae) em uma floresta estacional decidual no norte de Minas Gerais. *Lundiana, Revista Internacional de Biodiversidade*, 6(2):99-105.
- Nyam-Osor, B., Byambadorj, S.O., Park, B.B., Terzaghi, M., Scippa, G.S., Stanturf, J.A., Chiatante, D., Montagnoli, A. (2021) Root Biomass Distribution of *Populus sibirica* and *Ulmus pumila* Afforestation Stands Is Affected by Watering Regimes and Fertilization in the Mongolian Semi-Arid Steppe. *Frontiers in Plant Science*, 12:1-22.
- Oliveira, T.P.F., Barroso, D.G., Lamônica, K.R., Carvalho, G.C.M.W. (2016) Aplicação de AIB e tipo de miniestacas na produção de mudas de *Handroanthus heptaphyllus* Mattos. *Ciência Florestal*, 26(1):313-320.
- Oliveira, de P. S. (1996) Avaliação do sistema de irrigação por sulco da fazenda do alto em Campos dos Goytacazes – RJ. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, Campos dos Goytacazes – RJ, 94p.
- Osterc, G., Štefančič, M., Štampar, F. (2009) Juvenile stockplant material enhances root development through higher endogenous auxin level. *Acta Physiologiae Plantarum*, 31(5), 899-903.
- Ostonen, I., Püttsepp, Ü., Biel, C., Alberton, O., Bakker, M. R., Löhmus, K., ... Brunner, I. (2007) Specific root length as an indicator of environmental change. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology*, 14(3):426–442.
- Pages, L. (1995) Growth patterns of the lateral roots of young oak (*Quercus robur*) tree seedlings Relationship with apical diameter. *New Phytologist*, 130:503-509.
- Paradizo, I. C., Macieira, B. P. B., Gama, V.N., Zanetti, L.V., Cuzzuol, G. R. F. (2015) Plasticidade fenotípica como indicador de arbóreas não pioneiras mais tolerantes à elevada luminosidade. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 35(84):359-369.

- Paz, H., Pineda-García, F., Pinzón-Pérez, L.F. (2015) Root depth and morphology in response to soil drought: comparing ecological groups along the secondary succession in a tropical dry forest. *Oecologia*, 179:551–561.
- Pedroni, F., Sanchez, M., Santos, F.A.M. (2002) Fenologia da copaíba (*Copaifera langsdorfii* Desf. - Leguminosae, Caesalpinoideae) em uma floresta semidecídua no sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Botânica*, 25:183-194.
- Perilli, S., Di Mambro, R., Sabatini, S. (2012) Growth and development of the root apical meristem. *Current Opinion in Plant Biology*, 15:17–23.
- Perry, G., Pianka, E. R. (1997) Animal foraging: Past, present and future. *Trends in Ecology and Evolution*, 12(9):360-364.
- Pizarro, A., Díaz-Sala C. (2020) Effect of polar auxin transport and gibberellins on xylem formation in pine cuttings under adventitious rooting conditions. *Israel Journal of Plant Sciences*, 67(1-2):1-13.
- Pizarro, A., Díaz-Sala C. (2019) Cellular dynamics during maturation-related decline of adventitious root formation in forest tree species. *Physiologia Plantarum*, 165(1):73–80.
- Pregitzer, K. S. (2002) Fine Roots of Trees: A New Perspective. *The New Phytologist*, 154(2):267-270.
- Pregitzer, K.S., Deforest, J.L., Burton, A. J., Allen, M. F., Ruess, R. W., Hendrick, R. L. (2002) Fine root architecture of nine north american trees. *Ecological Monographs*, 72(2):293–309.
- Primo-Millo, E., Agustí, M., Talon, M., Caruso, M., Gmitter, F.G. (2020) Chapter 10 - Vegetative Growth. Woodhead Publishing, pp. 193–217. Eds. The Genus *Citrus*.
- Puhe, J. (2003) Growth and development of the root system of Norway spruce (*Picea abies*) in forest stands—A review. *Forest Ecology and Management*, 175(1-3):253-273.

Pulido, F., García, E., Obrador, J. J., Moreno, G. (2010) Multiple pathways for tree regeneration in anthropogenic savannas: incorporating biotic and abiotic drivers into management schemes. *Journal of Applied Ecology*, 47:1272–1281.

Ranalli, P. (1997) Innovative propagation methods in seed tuber multiplication programmes. *Potato Research*, 40:439–453.

Rani Debi, B., Chhun, T., Taketa, S., Tsurumi, S., Xia, K., Miyao, A., Hirochika, H., Ichii, M. (2005) Defects in root development and gravity response in the *aem1* mutant of rice are associated with reduced auxin efflux. *J. Plant Physiology*, 162:678–685.

Rich, S.M., Watt, M. (2013) Soil conditions and cereal root system architecture: review and considerations for linking Darwin and Weaver. *Journal of Experimental Botany*, 64:1193-1208.

Rigal, A., Yordanov, Y. S., Perrone, I., Karlberg, A., Tisserant, E., Bellini, C., Busov, V.B., Martin, F., Kohler, A., Bhalerao, R., Legué, V. (2012) The *aintegumenta like1* homeotic transcription factor *PtAIL1* controls the formation of adventitious root primordia in poplar. *Plant Physiology*, 160(4):1996–2006

Ritchie, G. A., Landis, T. D. (2008) The container tree nursery manual. USDA Agricultural Handbook, 7:17-80.

Rolim, S. R., Piotto, D., Carvalho, A. M. de, Latorraca, J. V., Reis, C. A., Souza, J. de, Siqueira, G. S., Orellana, E., Silva, C. E. S. da, Carvalho, P. C. L. de, Maciel, N. da S. R., Pace, J. H. C., Castro, J. P., Santos, G. C. V. dos, Ferreira, M. E. S., Sakai, E. S., Jesus, R. M. de. (2018) Crescimento e características da madeira de espécies arbóreas em experimentos silviculturais no norte do Espírito Santo. In: *Silvicultura e tecnologia de espécies da Mata Atlântica*. Belo Horizonte. Editora Rona, p. 53-159.

Roychoudhry, S., Kepinski, S. (2022) Auxin in root development. *Cold Spring Harb Perspect Biology*, 14:39933.

Sáenz-Romero, C., Mendoza-Maya, E., Gómez-Pineda, E., García, A. B., Endara-Agramont, A. R., Lindig-Cisneros, R., López-Upton, J., Trejo-Ramírez, O. (2020)

Recent evidence of Mexican temperate forest decline and the need for *ex situ* conservation, assisted migration, and translocation of species ensembles as adaptive management to face projected climatic change impacts in a megadiverse country. *Canadian Journal of Forest Research*, 50:843–854.

Salifu, K. F., Apostol, K. G., Jacobs, D. F., Islam, M. A. (2008) Growth, physiology, and nutrient retranslocation in nitrogen-15 fertilized *Quercus rubra* seedlings. *Annals of Forest Science*, 65:101–101.

Salifu, K.F., Timmer, R. (2001) Nutrient retranslocation response of *Picea mariana* seedlings to nitrogen supply. *Soil Science Society of America Journal*, 65:905–913.

Salinier, J., Daunay, M. C., Talmot, V., Lecarpentier, C., Pagès, L., Bardel, A., Fournier, C., Torres, M., Stevens, R. (2019) Root Architectural Trait Diversity in Aubergine (*Solanum melongena* L.) and Related Species and Correlations with Plant Biomass. *Crop Breeding, Genetics and Genomics*, 1:1- 23.

Sánchez, C., Vielba, J. M., Ferro, E., Covelo, G., Solé, A., Abarca, D., Mier, B.S., Díaz-Sala, C. (2007) Two scarecrow-like genes are induced in response to exogenous auxin in rooting-competent cuttings of distantly related forest species. *Tree Physiology*, 27:1459–1470.

Santin, D., Wendling, I., Benedetti, E. L., Morandi, D., Domingos, D. M. (2015) Sobrevivência, crescimento e produtividade de plantas de erva-mate produzidas por miniestacas juvenis e por sementes. *Ciência Florestal*, 25(3):571–579.

Schenk, H.J. Jackson, R. B. (2002) Rooting Depths, Lateral Root Spreads and Below-Ground/Above-Ground Allometries of Plants in Water-Limited Ecosystems. *Journal of Ecology*, 90(30):480-494.

Scherbina, V. G. (2021) Allelopathic tension of biotopes in forest ecosystems of wet subtropics. *Monitoring Systems of Environment*, 1:95-106. DOI: <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2021-1-95-106>

Schmidt – (1966) Vogt, H. Wachstum und Qualität von Forstpflanzen. München, BLV, p.210.

Schubert, G.H., Adams, R.S. (1971) Reforestation practices for conifers in California, State of California, Division of Forestry, Sacramento, CA, p.357.

Schwarz, M., Lehmann, P., Or, D. (2010) Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes – from a bundle of roots to tree stands. *Earth Surface Processes and Landforms-The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 35(3):354-367.

Seager, R. Ting, M. Held, I., Kushnir, Y., Lu, J., Vecchi, G., Huang, H.P., Harnik, N., Leetmaa, A., Naik, N. (2007) Model projections of an imminent transition to a more arid climate in southwestern North America. *Science*, 316(5828):1181–1184.

Shelden, M.C., Munns, R. (2023) Crop root system plasticity for improved yields in saline soils. *Frontiers in Plant Science*, 14:1-14.

Si, C., Alpert, P., Zhang, J.F., Lin, J., Wang, Y.Y., Hong, M.M., Roiloa, S.R., Yu, F.H. (2020) Capacity for clonal integration in introduced *versus* native clones of the invasive plant *Hydrocotyle vulgaris*. *Science of The Total Environment*, 745(25).

Silva, A. A., Delatorre, C. A. (2009) Alterações na arquitetura de raiz em resposta à disponibilidade de fósforo e nitrogênio. *Revista de Ciência Agroveterinárias*, 8(2):152-163.

Silva, G. C., Nascimento, M. T. (2001) Fitossociologia de um Remanescente de Mata sobre Tabuleiros no Norte do estado do Rio de Janeiro (Mata do Carvão). *Revista Brasileira de Botânica*, 24(1):51-62.

Silva, M. K. F., Siqueira, D. P., Carvalho, G. C. M. W., Silva, R. D., Aguiar, A., Barroso, D. G. (2021) Vegetative rescue of *Cordia trichotoma* (Vell.) Arráb. ex Steud. via induction of epicormic sprouts in branches from mature trees. *Rhizosphere*, 20:100431.

Silva, R. D. (2019) Miniestaquia de *Paratecoma peroba* (Record) Kuhl.: Capacidade de enraizamento e utilização de brassinosteroide. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes- RJ, 74p.

- Silva, R. D., Siqueira, D. P., Carvalho, G. C. M. W., Silva, M. K. F., Barroso, D. G. (2021) Vegetative rescue of *Paratecoma peroba* adult trees: adventitious rooting of epicormic sprouts from detached branches. *Rhizosphere*, 19:100419.
- Singh, M., Sonkusale, S. A., Niratker, C., Shukla, P. (2014) Micropropagation of *Shorea robusta*: an economically important woody plant. *Journal of Forest Science*, 60(2):70-74.
- Singh, S., Ansari, S. A. (2014) Callus formation impedes adventitious rhizogenesis in air layers of broadleaved tree species. *Annals of Forest Research*, 57(1):47-54.
- Sobral, B. S., Oliveira-Júnior, J. F., Gois, G., Terassi, P. M. (2018) Variabilidade espaço-temporal e interanual da chuva no estado do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Climatologia*, 22(1):281-308. DOI: <https://doi.org/10.5380/abclima.v22i0.55592>
- Solé, A., Sánchez, C., Vielba, J. M., Valladares, S., Abarca, D., Díaz-Sala, C. (2008) Characterization and expression of a *Pinus radiata* putative ortholog to the *Arabidopsis* short-root gene. *Tree Physiology*, 28:1629–1639.
- Sousa, M. A. R., Dionisio, L. F. S., Lima, A. C. (2021) Fine root biomass and seed bank in secondary and primary forests in Eastern Amazon. *Revista Interação*. DOI: <https://doi.org/10.53660/inter-134-sSS11>
- Souza, O. M. M., Collicchio, E. (2013) Zoneamento edafoclimático para a cultura do eucalipto (*Eucalyptus* spp) no estado do Tocantins. In: 9º Seminário de Iniciação Científica da UFT, volume 5.
- Sperry, J. S. (2003) Evolution of water transport and xylem structure. *International Journal of Plant Sciences*, 164(3):115–127.
- Starkey, T. E., Enebak, S. A., South, D. B., Cross, R. E. (2012) Particle size and composition of polymer root gels affect loblolly pine seedling survival. *Native Plants Journal*, [s.l.], 13(1):19-26.
- Steffens, B., Rasmussen, A. (2016) The Physiology of Adventitious Roots. *Plant Physiology*, 170(2):603–617.

Stuepp, C. A., Wendling, I., Xavier, A., Zuffellato-Ribas, K. C. (2018) Vegetative propagation and application of clonal forestry in Brazilian native tree species. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 53(9):985-1002.

Sun, Y., Robert, C.A., Thakur, M.P. (2024) Drought intensity and duration effects on morphological root traits vary across trait type and plant functional groups: a meta-analysis. *BMC Ecology and Evolution*, 24:22756.

Tahir, M.M., Mao, J., Li, S., Li, K., Liu, Y., Shao, Y., Zhang, D., Zhang, X. (2022) Insights into Factors Controlling Adventitious Root Formation in Apples. *Horticulture*, 8(276): 2-19.

Taiz, L., Zeiger, E. (2004) Fisiologia vegetal. Trad.: Eliane R. Santarém et al., 3 ed., Porto Alegre: Artmed, 719p.

Tang, Y., Liu, X., Lian, J., Cheng, X., Wang, G.G., Zhang, J. (2023) Soil Depth Can Modify the Contribution of Root System Architecture to the Root Decomposition Rate. *Forests*, 14:1092.

Tanimoto, E. (2005) Regulation of Root Growth by Plant Hormones—Roles for Auxin and Gibberellin. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 24(4):249–265.

Titon, M., Xavier, A., Otoni, W. C. (2002) Dinâmica do enraizamento de microestacas e miniestacas de clones de *Eucalyptus grandis*. *Revista Árvore*, 26(6):665-673.

Toca, A., Moler, E., Nelson, A., Jacobs, D. F. (2022) Environmental conditions in the nursery regulate root system development and architecture of forest tree seedlings: a systematic review. *New Forests*, 53(6):1113-1143.

Toca, A., Oliet, J. A., Villar-Salvador, P., Catalán, R. A. M., Jacobs, D. F. (2019) Ecologically distinct pine species show differential root development after outplanting in response to nursery nutrient cultivation. *Forest Ecology and Management*, 451,117562, 1-10.

- Torres-Martínez, H.H., Rodríguez-Alonso, G., Shishkova, S., Dubrovsky, J.G. (2019) Lateral Root Primordium Morphogenesis in Angiosperms. *Frontiers in Plant Science*, 10:206.
- Vanclay, J. K. (1991) Aggregating tree species to develop diameter increment equations for tropical rainforests. *Forest Ecology and Management*, 42(3-4):143-168.
- Verstraeten, I., Schotte, S., Geelen, D. (2014) Hypocotyl adventitious root organogenesis differs from lateral root development. *Frontiers in Plant Science*, 5:1-13.
- Veselá, P., Vasutová, M., Hofmannová, K., Edwards-Jonášová, M., Cudlín, P. (2019) Ectomycorrhizal Community on Norway Spruce Seedlings Following Bark Beetle Infestation. *Forest*, 10(9):740.
- Viégas, L. B. (2015) Viabilidade do recipiente biodegradável na produção de mudas florestais nativas. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu-SP, 157p.
- Vielba J. M., Díaz-Sala, C., Ferro, E., Rico, S., Lamprecht, M., Abarca, D., Ballester, A., Sánchez, C. (2011) CsSCL1 is differentially regulated upon maturation in chestnut microshoots, and is specifically expressed in rooting-competent cells. *Tree Physiology*, 31:1152–1160.
- Vilches-Barro, A., Maizel A. (2015) Talking through walls: mechanisms of lateral root emergence in *Arabidopsis thaliana*. *Current Opinion in Plant Biology*, 23:31-38.
- Visser, E.J.W., Nabben, R.H.M., Blom, C.W.P.M., Voesenek, L.A.C.J. (1997) Elongation by primary lateral roots and adventitious roots during conditions of hypoxia and high ethylene concentration. *Plant Cell and Environment*, 20: 647-653.
- Wang, G., Liu, S., Fang, Y., Shangguan, Z. (2020) Adaptive changes in root morphological traits of Gramineae and Leguminosae seedlings in the ecological

restoration of the semiarid region of northwest China. *Land Degradation & Development*, [s.l.], 31(16):2417- 2429.

Wang, Y., Dong, X., Wang, H., Wang, Z., Gu, J. (2016) Root tip morphology, anatomy, chemistry and potential hydraulic conductivity vary with soil depth in three temperate hardwood species, *Tree Physiology*, 36:99–108.

Wendling, I. (2004) Propagação vegetativa de erva-mate (*Ilex paraguariensis* Saint Hilaire): estado da arte e tendências futuras. Colombo: Embrapa Florestas, 46 p. (Documentos, 91).

Wendling, I., Stuepp, C.A., Zuffellato-Ribas, K. C. (2016) Araucaria clonal forestry: types of cuttings and mother tree sex in field survival and growth. *Cerne*, 22(1): 19-26.

Wu, G., Lewis, D. R., Spalding, E. P. (2007) Mutations in *Arabidopsis* multidrug resistance-like ABC transporters separate the roles of acropetal and basipetal auxin transport in lateral root development. *The Plant Cell*, 19:1826–1837.

Wulff, R. D. (1986) Seed Size Variation in *Desmodium Paniculatum*: II. Effects on Seedling Growth and Physiological Performance. *Journal of Ecology*, 74(1):99-114.

Xavier, A., Santos, G. A., Wendling, I., Oliveira, M. L. (2003) Propagação vegetativa de cedro-rosa por miniestaquia. *Revista Árvore*, 27(3):139 – 143.

Xavier, A. Wendling, I. Silva, R. L. (2009) Silvicultura clonal: princípios e técnicas. Viçosa: Ed UFV, 272 p.

Xavier, A., Wendling, I., Silva, R. L. (2013) Silvicultura clonal - Princípios e Técnicas. 2ª ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 280p.

Xing, Q., Zhao, R., Zhou, P., Qin, J., Liu, H., Yu, S., Zhao, B., Hu, Y. (2025) Plasticity of Root Architecture and ROS–Auxin Regulation in *Paeonia ostii* Under Root-Zone Restriction. *Plants*, 14(12):1889.

Yalamanchili, K., Vermeer, J.E.M., Scheres, B., Willemsen, V. (2024) Shaping root architecture: towards understanding the mechanisms involved in lateral root development. *Biology Direct*, 19(87):2-19.

Ye, X. H., Zhang, Y.L., Liu, Z.L., Gao, S.Q., Song, Y.B., Liu, F.B., Dong, M. (2016) Plant Clonal Integration Mediates the Horizontal Redistribution of Soil Resources, Benefiting Neighboring Plants. *Frontiers in Plant Science*, 7:1-9.

Yetgin, A. (2024) Exploring the dynamic nature of root plasticity and morphology in the face of changing environments. *Ecological Frontiers*, 44(1), 112-119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2023.07.008>

Zadworny, M., Jagodzinski, A. M., Łakomy, P., Mucha, J., Oleksyn, J., Rodríguez-Calcerrada, J., Ufnalski, K. (2019) Regeneration origin affects radial growth patterns preceding oak decline and death - insights from tree-ring $\delta C-13$ and $\delta O-18$. *Agricultural and Forest Meteorology*, 278(12).

Zahawi, R.A., Holl, K.D. (2014) Evaluation of different tree propagation methods in ecological restoration in the neotropics. In: Bozzano, M., Jalonen, R., Thomas, E., Boshier, D., Gallo, L., Cavers, S., Bordács, S., Smith, P., Loo, J. (Eds.), Genetic Considerations in Ecosystem Restoration Using Native Tree Species. UN FAO, Rome, Italy, p. 85–96.

Zhang, D.J., Yang, Y.J., Liu, C.Y., Zhang, F., Wu, Q.S. (2018) Root hair growth and development in response to nutrients and phytohormones. In: *Root Biology*. Cham: Springer International Publishing, p. 65–84.

Zhang, R., Peng, F., Yan, P., Cao, F., Liu, Z., Le, D., Tan, P. (2015) Effects of Root Pruning on Germinated Pecan Seedlings. *HortScience*, 50(10):1549-1552.

Zheng, C., Bochmann, H., Liu, Z., Kant, J., Schrey, S. D., Wojciechowski, T., Postma, J. (2023) Plant root plasticity during drought and recovery: What do we know and where to go? *Frontiers in Plant Science*, 14:1-14.

Zhou, G., Zhou, X., Nie, Y., Bai, S.H., Zhou, L., Shao, J., Cheng, W., Wang, J., Hu, F., Fu, Y. (2018) Drought-Induced Changes in Root Biomass Largely Result

from Altered Root Morphological Traits: Evidence from a Synthesis of Global Field Trials. *Plant Cell Environ*, 41:2589- 2599.

Zhu, J., Ingram, P. A., Benfey, P. N., Elich, T. (2011) From lab to field, new approaches to phenotyping root system architecture. *Current Opinion in Plant Biology*, 14:310-317.

Zobel, R. W. (2011) A developmental genetic basis for defining root classes. *Crop Science*, 51:1410–1413.

Zobel, R. W., Waisel, Y. (2010) A plant root system architectural taxonomy: a framework for root nomenclature. *Plant Biosystems*, 144:507–512.

Zwetsloot, M.J., Goebel, M., Paya, A., Grams, T.E.E., Bauerle, T.L. (2019) Specific spatio-temporal dynamics of absorptive fine roots in response to neighbor species identity in a mixed beech–spruce forest. *Tree Physiology*, 39:1867–1879.