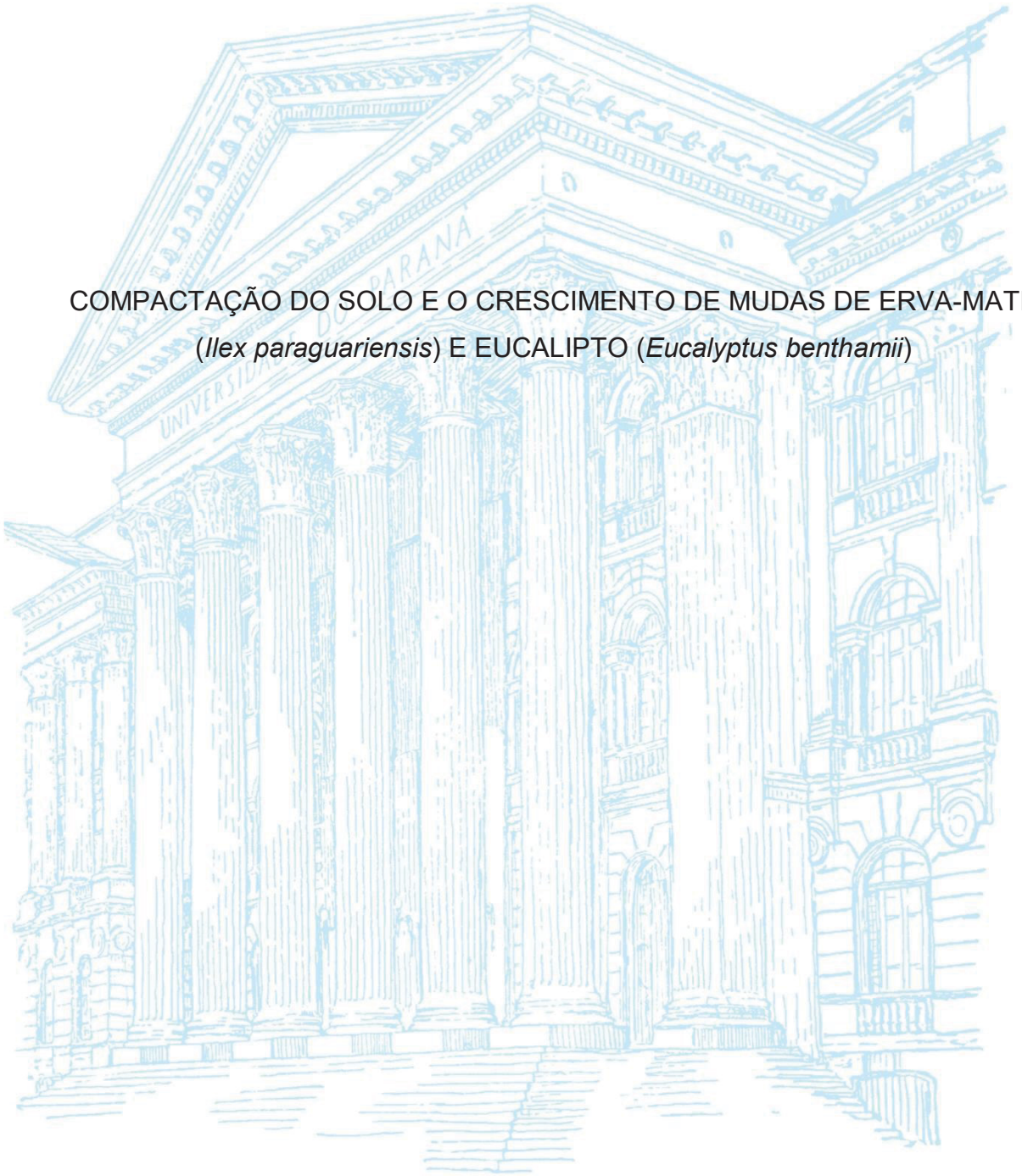
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

KALINE APARECIDA WAGNER



COMPACTAÇÃO DO SOLO E O CRESCIMENTO DE MUDAS DE ERVA-MATE (*Ilex paraguariensis*) E EUCALIPTO (*Eucalyptus benthamii*)

CURITIBA - PR

2024

KALINE APARECIDA WAGNER

COMPACTAÇÃO DO SOLO E O CRESCIMENTO DE MUDAS DE ERVA-MATE (*Ilex paraguariensis*) E EUCALIPTO (*Eucalyptus benthamii*)

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo, Área de Concentração Solo e Ambiente.

Orientadora: Profa. Dra. Karina Maria Vieira Cavalieri-Polizeli

Coorientador: Prof. Dr. Volnei Pauletti

CURITIBA - PR

2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

Wagner, Kaline Aparecida
Compactação do solo e o crescimento de mudas de erva-mate (*Ilex paraguariensis*) e eucalipto (*Eucalyptus benthamii*) / Kaline Aparecida Wagner. – Curitiba, 2024.
1 recurso online: PDF.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.
Orientadora: Profª Drª Karina Maria Vieira Cavalieri-Polizeli
Coorientador: Prof. Dr. Volnei Pauletti

1. Erva-mate. 2. Eucalipto. 3. Solos - Compactação. 4. Plantas - Desenvolvimento. I. Cavalieri-Polizeli, Karina Maria Vieira. II. Pauletti, Volnei. III. Universidade Federal do Paraná. Programa Pós-Graduação em Ciência do Solo. IV. Título.

Bibliotecária: Telma Terezinha Stresser de Assis CRB-9/944

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIA DO SOLO - 40001016014P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação CIÊNCIA DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **KALINE APARECIDA WAGNER** intitulada: **COMPACTAÇÃO DO SOLO E O CRESCIMENTO DE MUDAS DE ERVA-MATE (*Ilex paraguariensis*) E EUCALIPTO (*Eucalyptus benthamii*)** , sob orientação da Profa. Dra. KARINA MARIA VIEIRA CAVALIERI POLIZELI, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 19 de Fevereiro de 2024.

Assinatura Eletrônica
26/02/2024 10:38:43.0
KARINA MARIA VIEIRA CAVALIERI POLIZELI
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
22/02/2024 22:29:19.0
FABIANE MACHADO VEZZANI
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
23/02/2024 21:34:21.0
VOLNEI PAULETTI
Coorientador(a)

Assinatura Eletrônica
22/02/2024 16:57:53.0
IVAR WENDLING
Avaliador Externo (EMBRAPA FLORESTAS)

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.
Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 337075

Aos meus pais e irmão:

Helio Malek Wagner
Veronica Aparecida das Chagas e
William Wagner

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, pois Ele é o autor do meu destino e me guiou com sabedoria nos momentos de dificuldade.

Ao meu amado pai, Helio Malek Wagner, minha maior inspiração, agradeço de coração por seu constante incentivo e apoio. Seu exemplo de força e dedicação são fundamentais em minha vida.

À minha querida mãe, Veronica Aparecida das Chagas, por seu amor inabalável, compreensão e apoio incondicional ao longo de toda a jornada. Seu encorajamento constante foi a luz que iluminou meu caminho, inspirando-me a buscar sempre o melhor de mim.

A Baldo S/A Comércio, Indústria e Exportação, na pessoa de Leandro B. Gheno, por toda a confiança e incentivo depositados neste trabalho. Agradeço sinceramente por proporcionar as condições necessárias para a realização deste projeto.

Aos funcionários da Baldo S/A Comércio, Indústria e Exportação, filial de São Mateus do Sul - PR, em especial: Luiz Fernando Grabowski, Juliana A. L. dos Santos, Kyrlana S. Mielke, Juliana N. Lima, Leonilda L. Trindade, Lucas B. Orlowski, Daniel O. Batista, Guilherme F. Guimarães, Marcos A. Zielinski, Alexandre Polack e Tayná J. Ben.

À minha orientadora, Karina Maria Vieira Cavalieri-Polizeli. Por sua dedicação, por investir tempo e energia em meu crescimento acadêmico e pessoal. Suas palavras de sabedoria, incentivo, sua disponibilidade para ouvir minhas preocupações e sua orientação foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu coorientador, Volnei Pauletti, pela confiança depositada em mim e pelo compartilhamento de valiosos momentos de aprendizado.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, especialmente ao professor André Carlos Auler, professor Antônio Carlos Vargas

Motta, professora Fabiane Machado Vezzani, professor Jairo Calderari de Oliveira Júnior e ao professor Jefferson Dieckow.

Às técnicas de laboratório Josianne Meyer e Carla Albuquerque pelo apoio com as análises de laboratório.

À secretária do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Denise de Conti, pela amizade, conversas e apoio constante.

Ao meu companheiro Lucas Eduardo Ribas Serpe, gratidão por seu apoio, compreensão e parceria ao longo deste caminho.

À Universidade Federal do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, por viabilizarem a realização deste mestrado e por proporcionarem um ambiente acadêmico propício ao desenvolvimento da pesquisa.

À CAPES, pelo suporte financeiro por meio da bolsa de estudos.

Por fim, gratidão a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram com este trabalho, seja através de discussões construtivas, incentivo moral ou simplesmente estando ao meu lado durante este percurso.

“Qualquer que seja a capacidade de alguém, o esforço é o que deflagra a capacidade e a transforma em realização”.

Carol S. Dweck

RESUMO

Os estudos acerca da compactação do solo em espécies florestais de interesse econômico desempenham um papel essencial na compreensão dos impactos no desenvolvimento dessas plantas. No entanto, ainda são escassos os estudos de compactação do solo para algumas espécies florestais. Assim, este estudo abrange dois experimentos conduzidos em casa de vegetação, um direcionado à cultura da erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil), com mudas clonais (BRS BLD Yari) e seminais, e outro ao eucalipto (*Eucalyptus benthamii*) com mudas seminais. Os experimentos foram realizados em vasos com diferentes níveis de compactação (alta, média e sem compactação) na camada inferior do vaso, enquanto as mudas foram plantadas na parte superior. Avaliações mensais de altura e diâmetro foram realizadas até a abertura dos vasos aos 236 dias para erva-mate e 135 dias para o eucalipto. Os parâmetros da erva-mate incluíram resistência à penetração de raízes, número de ramos e folhas, altura, diâmetro do colo, massa fresca e seca da parte aérea e radicular, densidade e porcentagem de raízes. Parâmetros do solo, como densidade, macroporosidade, microporosidade, porosidade total e resistência à penetração de raízes, foram avaliados com anéis volumétricos. Para o *E. benthamii*, foram avaliados resistência do solo à penetração de raízes, altura, diâmetro, massa fresca e seca da parte aérea e radicular, densidade e porcentagem de raízes. No experimento da erva-mate, as mudas clonais (BRS BLD Yari) mostraram maior sensibilidade na parte aérea, com redução significativa do número de ramos, massa fresca e seca da parte aérea, conforme a compactação aumentou. Mudanças físicas do solo foram observadas, tais como maior densidade e resistência à penetração em níveis de compactação média e alta. No experimento com eucalipto, não houve variações na parte aérea, mas a resistência à penetração aumentou no nível médio e alto de compactação. Resultados mais expressivos foram encontrados nas raízes, destacando uma redução significativa na massa fresca e seca, densidade e porcentagem de raízes nas camadas de compactação média e alta para ambas as espécies. Estes experimentos sublinham a importância de considerar a compactação do solo no cultivo destas espécies e ressaltam a necessidade de focar na qualidade física do solo e implementar práticas sustentáveis no manejo de solos florestais. Ressalta-se a importância de estudos de mais longo prazo, devido aos longos ciclos de produção das espécies florestais, bem como, com diferentes materiais genéticos.

Palavras-chave: Desenvolvimento de Plantas. Florestas. Manejo. Respostas Radiculares.

ABSTRACT

Studies on soil compaction in forest species of economic interest play an essential role in understanding the impacts on the development of these plants. However, studies on soil compaction for some forest species are still scarce. Thus, this study covers two experiments conducted in a greenhouse, one aimed at the cultivation of yerba mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil), with clonal plants (BRS BLD Yari) and seminal seedlings, and another at eucalyptus (*Eucalyptus benthamii*) with seminal seedlings. The experiments were carried out in pots with different levels of compaction (high, medium, and no compaction) in the lower layer of the pot, while the plants were planted in the upper part. Monthly evaluations of height and diameter were conducted until the pots were opened at 236 days for yerba mate and 135 days for eucalyptus. Yerba mate parameters included number of branches and leaves, height, diameter, fresh and dry mass of shoot and root parts, density, and percentage of roots. Soil parameters: bulk density, macroporosity, microporosity, total porosity, and root penetration resistance, were evaluated with volumetric rings. For *E. benthamii*, soil penetration resistance, height, diameter, fresh and dry mass of shoots and roots, density, and percentage of roots were evaluated. In the yerba mate experiment, clonal plants showed greater sensitivity in the shoots, with a significant reduction in the branches numb, and shoots fresh and dry mass, as compaction increased. Soil physical changes were observed, such as greater bulk density and soil penetration resistance at medium and high levels of compaction. In the experiment with *Eucalyptus*, there were no variations in the aerial part, but penetration resistance increased at medium and high levels of compaction. More expressive results were found in the roots, highlighting a significant reduction in fresh and dry mass, density, and percentage of roots in the medium and high compaction layers for both species. These experiments highlight the importance of considering soil compaction when cultivating species and highlight the need to focus on soil physical quality and implement sustainable practices in the management of forest soils. The importance of longer-term studies is emphasized due to the long production cycles of forest species, as well as different genetic materials.

Keywords: Plant Development. Forests. Management. Roots Responses.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

FIGURA 1 – ÁREA DE OCORRÊNCIA NATURAL DA ERVA-MATE E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL EM SÃO MATEUS DO SUL - PR 23
FIGURA 2 – CURVA DE COMPACTAÇÃO DO SOLO UTILIZADO NO EXPERIMENTO 26
FIGURA 3 – COLETA DA PARTE AÉREA DE MUDAS CLONAIS (BRS BLD YARI) E SEMINAIS DE ERVA-MATE AOS 236 DIAS APÓS O TRANSPLANTIO NOS VASOS 27
FIGURA 4 – ESQUEMA DE AMOSTRAGEM DE PARTE AÉREA E SOLO NOS VASOS AOS 236 DIAS APÓS A IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO 28
FIGURA 5 – ASPECTO VISUAL DAS RAÍZES DE MUDAS DE ERVA-MATE AOS 236 DIAS APÓS O TRANSPLANTIO NA METADE DOS VASOS EM QUE FORAM CULTIVADAS E ANÁLISE NO SOFTWARE ROOTSNAP 30
FIGURA 6 – EVOLUÇÃO DO CRESCIMENTO EM ALTURA E DIÂMETRO DA PARTE AÉREA DE MUDAS CLONAIS (BRS BLD YARI) E SEMINAIS DE ERVA-MATE DO PRIMEIRO AO OITAVO MÊS APÓS O TRANSPLANTIO DAS MUDAS PARA OS VASOS 33
FIGURA 7 – PARÂMETROS DE PARTE AÉREA DE MUDAS CLONAIS (BRS BLD YARI) E SEMINAIS DE ERVA-MATE SUBMETIDAS A DIFERENTES NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO APÓS 236 DIAS DE CULTIVO 34
FIGURA 8 – RESULTADOS DE MASSA FRESCA E SECA DE MUDAS CLONAIS (BRS BLD YARI) E SEMINAIS DE ERVA-MATE SUBMETIDAS A DIFERENTES NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO AOS 236 DIAS APÓS O TRANSPLANTIO NOS VASOS 35
FIGURA 9 – RESULTADOS DE MASSA COMERCIAL E DESCARTADA DE MUDAS CLONAIS (BRS BLD YARI) E SEMINAIS DE ERVA-MATE SUBMETIDAS A DIFERENTES NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO AOS 236 DIAS APÓS O TRANSPLANTIO NOS VASOS 36
FIGURA 10 – MASSA FRESCA E SECA DE RAÍZES DE MUDAS CLONAIS (BRS BLD YARI) E SEMINAIS DE ERVA-MATE SUBMETIDAS A DIFERENTES NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO AOS 236 DIAS APÓS O TRANSPLANTIO NOS VASOS 41

FIGURA 11 – DENSIDADE E PORCENTAGEM DE RAÍZES DE MUDAS CLONAIS (BRS BLD YARI) E SEMINAIS DE ERVA-MATE SUBMETIDAS A DIFERENTES NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO AOS 236 DIAS APÓS O TRANSPLANTIO NOS VASOS 42
FIGURA 12 – CRESCIMENTO RADICULAR DE MUDAS CLONAIS (BRS BLD YARI) E SEMINAIS DE ERVA-MATE NOS DIFERENTES NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO DO SOLO AOS 236 DIAS 43

CAPÍTULO II

FIGURA 1 – CURVA DE COMPACTAÇÃO DO SOLO UTILIZADO NO EXPERIMENTO 69
FIGURA 2 – ESQUEMA DE AMOSTRAGEM DAS PLANTAS E RAÍZES E DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO NOS VASOS AOS 140 DIAS APÓS A IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO 70
FIGURA 3 – TRATAMENTO DAS IMAGENS DO SISTEMA RADICULAR DE MUDAS DE *Eucalyptus benthamii* SUBMETIDAS A DIFERENTES NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO POR 140 DIAS E ANÁLISE NO SOFTWARE ROOTSNAP 72
FIGURA 4 – EVOLUÇÃO DA ALTURA E DIÂMETRO DE CAULE DE MUDAS DE *Eucalyptus benthamii* ATÉ OS 135 DIAS APÓS O TRANSPLANTIO DAS MESMAS PARA OS VASOS 74
FIGURA 5 – VARIAÇÃO DA ALTURA E DIÂMETRO DE CAULE DE MUDAS DE *Eucalyptus benthamii* AOS 135 DIAS APÓS O TRANSPLANTIO DAS MESMAS PARA OS VASOS 75
FIGURA 6 – MASSA FRESCA E SECA DE RAÍZES DE MUDAS DE *Eucalyptus benthamii* AOS 135 DIAS APÓS O CULTIVO NOS VASOS 77
FIGURA 7 – DENSIDADE E PORCENTAGEM DE RAÍZES DE MUDAS DE *Eucalyptus benthamii* AOS 135 DIAS APÓS O CULTIVO NOS VASOS 78
FIGURA 8A – PORCENTAGEM DE RAÍZES DE MUDAS DE *Eucalyptus benthamii* SUMBETIDAS A DIFERENTES NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO, NAS 8 REPETIÇÕES, OBTIDAS PELO SOFTWARE ROOTSNAP NA CAMADA SUPERIOR DOS VASOS 79
FIGURA 8B – PORCENTAGEM DE RAÍZES DE MUDAS DE *Eucalyptus benthamii* SUBMETIDAS A DIFERENTES NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO, NAS 8 REPETIÇÕES,

OBTIDAS PELO SOFTWARE ROOTSNAP NA CAMADA INFERIOR DOS VASOS
.....80

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

TABELA 1 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO SOLO UTILIZADO NO EXPERIMENTO 23
TABELA 2 – VALORES MÉDIOS DE DENSIDADE DO SOLO, POROSIDADE TOTAL, MICROPOROSIDADE, MACROPOROSIDADE, E RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO NA CAMADA SUPERIOR E INFERIOR DO SOLO CULTIVADO COM MUDAS CLONAIS (BRS BLD YARI) E SEMINAIS DE ERVA-MATE 39

CAPÍTULO II

TABELA 1 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO SOLO UTILIZADO NO EXPERIMENTO 67
TABELA 2 – VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO (MPa) NA CAMADA SUPERIOR E INFERIOR DOS VASOS, E UMIDADE GRAVIMÉTRICA (g g^{-1}) DAS 3 CAMADAS AMOSTRADAS PARA OS TRÊS NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO 76

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL 16
2 CAPÍTULO I: COMPACTAÇÃO DO SOLO E SUA INFLUÊNCIA NO CRESCIMENTO DE MUDAS DE ERVA-MATE (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil) 18
2.1 RESUMO 18
2.2 ABSTRACT 18
2.3 INTRODUÇÃO 19
2.4 MATERIAL E MÉTODOS 22
2.4.1 CARACTERÍSTICAS DO SOLO 22
2.4.2 OBTENÇÃO DAS MUDAS 24
2.4.3 MONTAGEM DO EXPERIMENTO 24
2.4.4 DETERMINAÇÃO DOS ATRIBUTOS DE PLANTAS (PARTE AÉREA) 27
2.4.5 DETERMINAÇÃO DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO 28
2.4.6 ANÁLISES FÍSICAS 29
2.4.7 PROCESSAMENTO DE AMOSTRAS DE RAÍZES 30
2.4.8 ANÁLISES ESTATÍSTICAS 31
2.5 RESULTADOS 32
2.5.1 PARTE AÉREA 32
2.5.2 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO 36
2.5.3 SISTEMA RADICULAR 40
2.6 DISCUSSÃO 43
2.6.1 PARTE AÉREA 43
2.6.2 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO 46
2.6.3 SISTEMA RADICULAR 48
2.7 CONCLUSÕES 51
2.8 REFERÊNCIAS 52
3 **CAPÍTULO II: EFEITOS DA COMPACTAÇÃO DO SOLO NO CRESCIMENTO DE MUDAS DE *Eucalyptus benthamii* 63**
3.1 RESUMO 63
3.2 ABSTRACT 63
3.3 INTRODUÇÃO 64
3.4 MATERIAL E MÉTODOS 66
3.4.1 CARACTERÍSTICAS DO SOLO 66

3.4.2 PREPARO DAS MUDAS 67
3.4.3 MONTAGEM DO EXPERIMENTO 68
3.4.4 PARÂMETROS AVALIADOS 70
3.4.5 DETERMINAÇÃO DOS ATRIBUTOS DE PLANTAS 71
3.4.6 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO (RP) 71
3.4.7 PROCESSAMENTO DE AMOSTRAS DE RAÍZES 72
3.4.8 ANÁLISES ESTATÍSTICAS 73
3.5 RESULTADOS 73
3.5.1 PARTE AÉREA 73
3.5.2 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO E CRESCIMENTO RADICULAR 75
3.6 DISCUSSÃO 81
3.6.1 PARTE AÉREA 81
3.6.2 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO E CRESCIMENTO RADICULAR 82
3.7 CONCLUSÕES 85
3.8 REFERÊNCIAS 86
4 CONCLUSÃO GERAL 98
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 98
6 REFERÊNCIAS 99
APÊNDICE 1 – PARÂMETROS DE PLANTA E SOLO INFLUENCIADOS PELO AUMENTO DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DO SOLO 120
APÊNDICE 2 – COMPACTION IN FOREST SOILS 121

1 INTRODUÇÃO GERAL

A compactação do solo representa uma ameaça significativa para os ecossistemas terrestres, sendo um fator crítico na degradação física do solo. Essa degradação compromete a capacidade do solo de sustentar a biodiversidade, prejudica a filtragem e o armazenamento de água e pode impactar negativamente o sequestro de carbono (Dörner et al., 2022). Em solos destinados a práticas agrícolas, espera-se que estes forneçam uma estrutura adequada para o desenvolvimento das plantas. Além disso, segundo Dörner et al. (2022), é crucial manter um sistema de poros contínuos que permita a adequada infiltração de água, evitando escoamento excessivo, ao mesmo tempo em que mantém uma quantidade adequada de água disponível para as plantas.

Estudos prévios têm destacado os impactos negativos da compactação do solo nas florestas ao longo do tempo, influenciando significativamente o crescimento e desenvolvimento destas (Munns, 1947; Steinbrenner & Gessel, 1955). Em estudos conduzidos por Horn et al. (2007), observou-se redução de 5 a 15% no crescimento florestal devido à compactação do solo, decorrente do tráfego de máquinas. Especificamente durante a colheita de madeira com maquinário pesado, a compactação do solo é intensificada (Horn et al., 2007; Jourgholami et al., 2018; Reichert et al., 2018). Este fenômeno não apenas compromete a aeração do solo, mas também afeta a troca de gases, a infiltração de água, a disponibilidade de nutrientes, e o crescimento radicular, contribuindo ainda para a erosão do solo (Page-Dumroese et al., 2010; Cambi et al., 2015).

De acordo com França et al. (2021) a compactação do solo impacta o crescimento inicial de mudas florestais e, consequentemente, a futura uniformidade e produtividade florestal. Assim, solos com alta resistência à penetração, apresentam restrições ao crescimento radicular, limitando a exploração eficaz do solo pelas raízes e, por conseguinte, prejudicando a absorção de água e nutrientes (Jesus et al., 2015).

A literatura científica dedicada aos estudos de compactação para o eucalipto destaca como uma evidência clara o interesse global e o impacto significativo que essa espécie tem em diversas áreas, como silvicultura, produção de papel, bioenergia e restauração ambiental (Milanez et al., 2013; Simioni et al. 2018). No entanto, a falta de estudos sobre a influência da compactação do solo para diferentes espécies de

mudas florestais, como o *Eucalyptus benthamii*, representa uma lacuna importante na pesquisa.

Por outro lado, ao observar o cenário científico relacionado à compactação do solo para a erva-mate (*Ilex paraguariensis*), percebe-se a escassez de estudos dedicados a esse tema. A erva-mate, desempenha papel crucial em aspectos socioculturais, econômicos e ambientais, mas não recebe a mesma atenção dedicada ao eucalipto, por exemplo, apesar de sua importância regional e ambiental. Esta planta, que é cultivada extensivamente no Sul da América Latina, antes era manejada de maneira tradicional, de forma extrativista em florestas nativas, por agricultores familiares, e hoje enfrenta desafios decorrentes do processo de modernização da agricultura. Esse processo se caracteriza pela implantação de monoculturas e à motomecanização (Marques et al., 2019).

Ao analisar a interação entre a compactação do solo e o desenvolvimento dessas espécies, é possível desenvolver estratégias eficazes de manejo que promovam o crescimento adequado dessas culturas, garantindo assim a viabilidade e produtividade a longo prazo. Esta pesquisa, portanto, não apenas aborda uma importante questão científica, mas também tem implicações práticas, para a conservação e utilização sustentável, dessas importantes espécies florestais em cenários globais, regionais e locais.

Nesse contexto, este estudo visou compreender melhor a influência da compactação do solo no crescimento inicial de duas espécies florestais de importante interesse econômico, na região Sul do Brasil: a erva-mate, uma cultura nativa da América do Sul, e a espécie *Eucalyptus benthamii*, originária do Leste da Austrália e utilizada em plantações operacionais na América do Sul, em locais sujeitos a ocorrência de geadas. A premissa central deste estudo é a hipótese de que a compactação do solo compromete o crescimento inicial de mudas florestais, o que pode afetar seu estabelecimento.

2 CAPÍTULO I: COMPACTAÇÃO DO SOLO E SUA INFLUÊNCIA NO CRESCIMENTO DE MUDAS DE ERVA-MATE (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil)

2.1 RESUMO

A erva-mate é uma cultura com importância econômica relevante, especialmente, para os pequenos agricultores do Sul do Brasil, que cultivam a espécie, na maioria das vezes, em conjunto com florestas nativas. No entanto, apesar dos avanços no manejo dos cultivos nos últimos anos, pouca ênfase é dada à qualidade física dos solos em que a planta é cultivada. Assim, problemas como a compactação do solo podem ser limitantes para o crescimento adequado das mudas de erva-mate. Neste sentido, o presente estudo teve como objetivo avaliar o crescimento de mudas submetidas à diferentes níveis de compactação do solo. Para isso, foi conduzido experimento em casa de vegetação, em vasos de 20 cm de diâmetro e 30 cm de altura. Com base na densidade máxima do solo, foram definidos três níveis de compactação: alta, média e sem compactação, para a camada inferior dos vasos. As mudas utilizadas no experimento foram seminais e clonais (BRS BLD Yari), e foram plantadas na parte superior dos vasos. Houveram avaliações mensais da altura e diâmetro das mudas, até a abertura dos vasos, que ocorreu aos 236 dias após o plantio. Os parâmetros das plantas avaliados incluíram número de ramos e folhas, altura e diâmetro, massa fresca e seca da parte aérea e radicular, densidade e porcentagem de raízes. Parâmetros do solo, como densidade, macroporosidade, microporosidade, porosidade total e resistência à penetração de raízes, foram avaliados por meio de amostras indeformadas. Nas mudas clonais (BRS BLD Yari) a parte aérea diferiu significativamente entre os níveis de compactação, com diminuição do número de ramos, da massa fresca e seca, com aumento da compactação do solo. Nas mudas seminais, não houve variação nos atributos da parte aérea durante o período estudado. Os atributos físicos do solo tiveram variação entre os níveis de compactação, na parte inferior dos vasos, com maiores valores de densidade e resistência à penetração nos níveis de compactação média e alta. Os resultados mais significativos foram observados nas raízes, com redução da densidade e porcentagem de raízes nas camadas compactadas, tanto para mudas clonais quanto seminais. Essas descobertas destacam a importância de considerar a qualidade física do solo no plantio de mudas de erva-mate.

Palavras-chave: Densidade de Raízes. Densidade do Solo. Manejo de Solos Florestais. Qualidade Física do Solo. Resistência à Penetração do Solo.

2.2 ABSTRACT

Yerba mate is a crop of significant economic importance, especially for small farmers in the Southern region of Brazil, who often cultivate the species, mostly in conjunction with native forests. However, despite advances in crop management in recent years, little emphasis is given to the physical quality of the soils in which the plant is grown. Thus, issues such as soil compaction can be limiting factors for the proper growth of yerba mate plants. In this sense, the present study aimed to evaluate the growth of plants subjected to different levels of soil compaction. For this purpose, an experiment was conducted in a greenhouse, using pots measuring 20 cm in diameter and 30 cm in height. Based on the maximum soil density, three levels of compaction were defined: high, medium, and non-compacted, for the lower layer of the

pots. The plants used in the experiment were both seminal seedlings and clonal plants (BRS BLD Yari), and were planted in the upper part of the pots. Monthly evaluations of the height and diameter of the seedlings were conducted until the pots were opened, which occurred 236 days after planting. Evaluated plant parameters included the number of branches and leaves, height and diameter, fresh and dry mass of the aboveground and root parts, density, and percentage of roots. Soil parameters, such as density, macroporosity, microporosity, total porosity, and root penetration resistance, were evaluated using undisturbed samples. In clonal plants, the aboveground part differed between compaction levels, with a decrease in the branches numb, fresh and dry mass, with increased soil compaction. In seminal seedlings, there was no variation in aboveground attributes during the studied period. Soil physical attributes varied between compaction levels in the lower parts of the pots, with higher values of density and penetration resistance at medium and high compaction levels. The most significant results were observed in the roots, with a reduction in density and root percentage in the compacted layers, for both clonal and seminal seedlings. These findings highlight the importance of considering the physical quality of the soil in yerba mate seedling planting.

Keywords: Roots Density. Soil Density. Forest Soil Management. Soil Physical Quality. Soil Penetration Resistance.

2.3 INTRODUÇÃO

A erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil) é uma espécie arbórea endêmica da América do Sul. No Brasil, desempenha importantes funções ambientais, culturais e socioeconômicas, sendo amplamente cultivada, industrializada e consumida na região Sul (Goulart et al., 2022). A cultura apresenta importância socioeconômica, porque contribui significativamente para que pequenos agricultores permaneçam com suas famílias no campo (Antoniazzi et al., 2018). Além disso, contribui para a conservação de remanescentes florestais, promovendo a conectividade entre fragmentos da floresta (Marques et al., 2019).

A erva-mate é utilizada na América do Sul, principalmente como uma bebida tônica e estimulante desde o período pré-colombiano (Reitz et al., 1983). Historicamente, as folhas da erva-mate já eram colhidas pelos indígenas em florestas densas, com o objetivo de produzir bebidas. Isso sugere que a planta circulava em uma extensa rede interétnica de relações sociais, abrangendo uma vasta extensão territorial na América do Sul. Assim, a erva-mate manteve seu consumo como um elemento de sociabilidade e solidariedade entre as pessoas (Oliveira & Esselin, 2019).

No entanto, para garantir o desenvolvimento adequado da erva-mate, e aumentar a produtividade, seja em sistemas agroflorestais ou em monoculturas, a

atenção deve ser dada desde a produção e plantio das mudas, até a colheita, visando a qualidade das folhas colhidas e a sustentabilidade do cultivo. E problemas relacionados à compactação do solo nos ervais demandam especial atenção. A erva-mate não se desenvolve adequadamente em solos compactados, pedregosos ou encharcados, uma vez que cerca de 80% do seu sistema radicular está localizado na camada superficial do solo, a uma profundidade de até 45 cm (Medrado et al., 2000).

Sabe-se que solos de alta qualidade, destinados a fins agrícolas, devem ser capazes de proporcionar um suporte adequado às plantas, uma estrutura do solo estável que favoreça a fauna do solo e uma melhor disponibilidade de nutrientes (Dörner et al., 2022). A manutenção da estrutura ideal do solo desempenha um papel fundamental, determinando o rendimento das culturas ao mediar o acesso das raízes aos recursos do solo (Rabot et al., 2018), o que pode ser afetado pela compactação. Entretanto, a resposta das plantas à compactação do solo é considerada específica da espécie (Liang et al., 1999). Estudos já demonstraram que a compactação do solo causa prejuízos significativos nas florestas ao longo do tempo, afetando o crescimento e desenvolvimento das árvores (Munns, 1947; Steinbrenner & Gessel, 1955; Reichert et al., 2023). Mudas de espécies comerciais nativas do Norte do Irã, amieiro (*Alnus subcordata* CAM) e bordo (*Acer velutinum* Boiss.), tiveram menor crescimento radicular com compactação do solo (Jamshidi et al., 2018). Em estudo realizado por Jourgholami (2018), o aumento da compactação diminuiu o comprimento da raiz principal e do caule das mudas de bordo da Capadócia (*Acer cappadocicum* Gled.).

A compactação do solo pode resultar em uma redução a longo prazo na regeneração e densidade de plantas herbáceas e lenhosas da floresta nativa (Cambi et al., 2015). Assim, a erva-mate, quando associada à floresta nativa e manejada de maneira tradicional por agricultores familiares, enfrenta desafios decorrentes do processo de modernização da agricultura. Esse processo se caracteriza pela simplificação dos agroecossistemas, envolvendo a abertura ou derrubada de florestas, a implantação de monoculturas e a motomecanização (Marques et al., 2019). Entretanto, mesmo que a maior parte da compactação do solo tenha origem antrópica, os solos de áreas naturais também podem apresentar um grau de compactação natural (Ramos, 2007; Quero et al., 2008; Gómez-Aparicio et al., 2008).

Além disso, é crucial destacar que muitos produtores optam por estabelecer seus ervais com base na viabilidade econômica, em áreas previamente compactadas

que eram originalmente designadas para plantios florestais, mas que foram degradadas devido ao tráfego de máquinas, ou mesmo em regiões sujeitas ao pisoteio animal. Esses dois fatores representam as principais causas da degradação física do solo (Kunz et al., 2013). Contudo, é relevante observar que, mesmo diante dessas condições, o preparo do solo muitas vezes é negligenciado, uma vez que a erva-mate é considerada uma espécie rústica.

As raízes das plantas são fortemente afetadas por fatores físicos no solo. A resistência do solo à penetração (RP) é a principal propriedade do solo que regula o crescimento das raízes e a acessibilidade à água (Colombi et al., 2018). Níveis elevados de RP impedem o desenvolvimento das raízes e afetam o rendimento das culturas. Esses fatores podem levar as raízes a ocupar menos volume no solo, resultando em maior competição por nutrientes, o que aumenta o estresse, e reduz a produtividade das culturas (Ramos et al., 2022).

A organização das raízes ao longo do perfil do solo, e sua relação com o ambiente de produção exercem um impacto significativo em vários aspectos que afetam a produtividade das plantas. A tolerância à seca, a eficiência na germinação e brotação, o crescimento saudável, a absorção de nutrientes e a resistência a pragas e parasitas do solo são todos influenciados pelo sistema radicular (Bengough et al., 2011). Ademais, conforme Bengough et al. (2011), quanto mais volume o sistema radicular ocupar, maior será a capacidade de explorar o solo e aproveitar a disponibilidade de nutrientes, água e oxigênio, o que resulta em maior produtividade das culturas.

O aumento da compactação do solo tem como consequência a redução da quantidade de macroporos, da porosidade de aeração e o aumento da resistência do solo à penetração, o que leva a uma maior retenção de água no solo em tensões mais elevadas (Silva et al., 2014). Nesse contexto, o sistema radicular é o primeiro componente da planta a sofrer os efeitos negativos da compactação do solo, resultando na limitação de seu desenvolvimento e em impactos físicos e fisiológicos no crescimento e produtividade das plantas (Reichert et al., 2007; Otto et al., 2011).

No atual cenário de produção de erva-mate, seja em sistemas agroflorestais ou em áreas a pleno sol, os aspectos relacionados à condição física do solo, ao desenvolvimento das raízes e ao crescimento da cultura, sob diferentes níveis de compactação ainda são escassos. Tal constatação torna-se crucial, especialmente considerando a expansão global da cultura da erva-mate para mercados como o

Oriente Médio, a Europa e os Estados Unidos, onde é apreciada como bebida devido ao seu alto teor de cafeína, alto teor de antioxidantes e aos seus benefícios nutricionais (Heck & De Mejia, 2007).

Neste contexto, a hipótese principal deste estudo é que a compactação do solo prejudica o crescimento inicial da erva-mate. O objetivo foi avaliar o impacto da compactação do solo no crescimento de mudas clonais (BRS BLD Yari) e seminais de erva-mate em diferentes níveis de compactação.

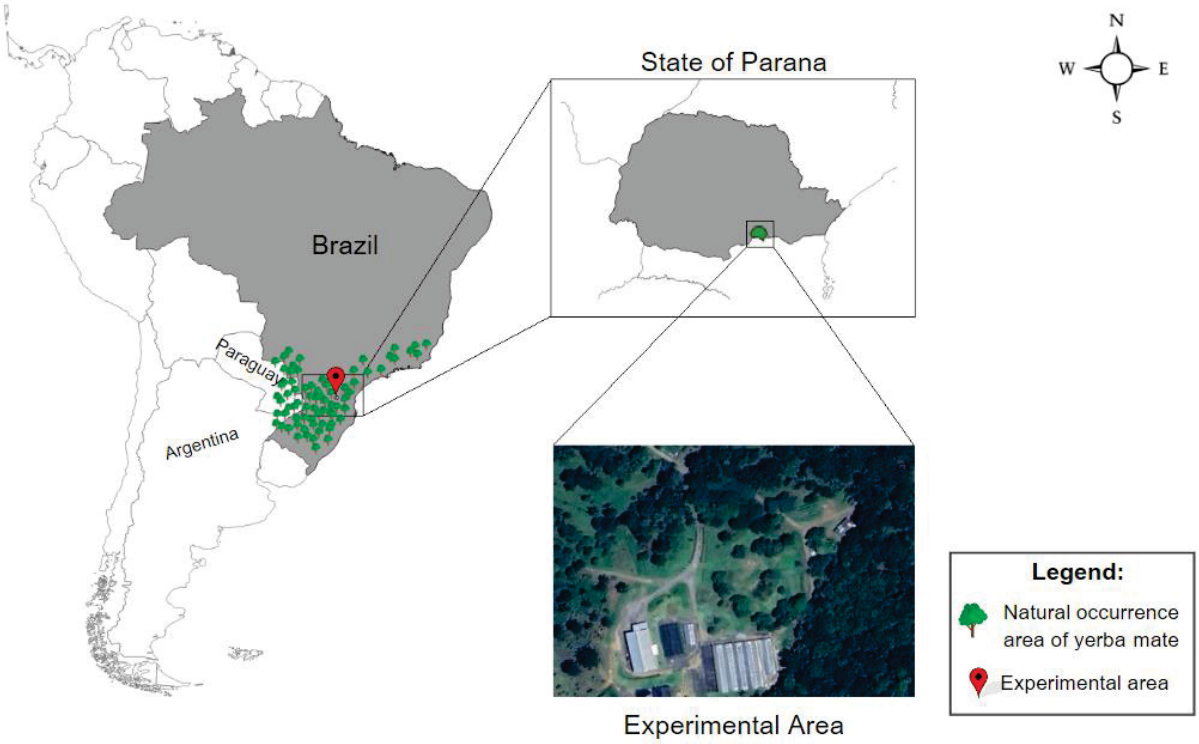
2.4 MATERIAL E MÉTODOS

2.4.1 CARACTERÍSTICAS DO SOLO

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, pertencente à empresa Baldo S/A, Comércio, Indústria e Exportação, localizada no município de São Mateus do Sul, no segundo planalto paranaense. A área geográfica em que os ervais estão localizados e onde o solo foi coletado, abrange a longitude de 50° 26' 30" Oeste e a latitude de 25° 54' 40" Sul, com uma altitude de 790 metros. De acordo com a classificação de Köppen, a região possui um clima temperado do tipo Cfb (Alvares et al., 2013). A precipitação média anual é de aproximadamente 1.552 mm e temperatura média anual de 18 °C.

Para a montagem do experimento, o solo foi coletado na camada superficial (0-0,30 m), e identificado como Cambissolo Háplico (Bhering et al., 2007). Estes solos são geralmente cultivados com erva-mate na região do estudo (Fig. 1). Parte do solo foi destinado às análises de caracterização do mesmo. Foram realizadas análises químicas e físicas, tais como análise química de rotina, densidade de partículas e granulometria.

FIGURA 1 – ÁREA DE OCORRÊNCIA NATURAL DA ERVA-MATE E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL EM SÃO MATEUS DO SUL - PR



FONTE: A autora (2024).

Para determinar a densidade de partículas, utilizou-se o método do balão volumétrico, calculada a partir da massa e volume de solo seco (Blake & Hartge, 1986). A análise textural foi realizada usando o método do densímetro, que se baseia no princípio da Lei de Stokes na sedimentação de partículas (Gee & Or, 2002). A classe textural obtida foi "muito argilosa", enquanto que as características físico-químicas do solo estão apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO SOLO UTILIZADO NO EXPERIMENTO

pH	P	COT	K	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al	H+Al	CTC	V	Argila	Silte	Areia	ρ_p
$CaCl_2$	mg dm^{-3}	g dm^{-3}	----------cmol$_c$ dm^{-3}----------						%	----------g kg^{-1}----------			g cm^{-3}
											-		
4,11	7,1	27,13	0,50	2,99	0,48	3,5	20,6	24,6	16,2	700	213	88	2,44

LEGENDA: P = fósforo disponível – Mehlich 1; COT = carbono orgânico total; K = potássio; Ca^{2+} = cálcio; Mg^{2+} = magnésio; Al = alumínio; H+Al = acidez potencial; CTC = capacidade de troca catiônica; V = saturação por bases e ρ_p = densidade de partículas.

2.4.2 OBTENÇÃO DAS MUDAS

Foram utilizadas mudas seminais, produzidas a partir de sementes obtidas no viveiro da Baldo S/A Comércio, Indústria e Exportação, localizado no município de São Mateus do Sul, PR. Essas mudas são comumente utilizadas na maior parte da região do estudo. As sementes para produção das mudas foram colhidas de matrizes selecionadas, com características de vigor e boa produtividade. Além destas, foram utilizadas também mudas clonais, geneticamente melhoradas, que oferecem maior homogeneidade e regularidade na produção (Santin et al., 2015). As mudas clonais da cultivar BRS BLD Yari foram adquiridas no viveiro Golden Tree Reflorestadora, situado no município de Guarapuava, PR. Estas permaneceram em tubetes de 175 cm^3 até o plantio nos vasos.

As mudas selecionadas para o transplantio estavam com aproximadamente um ano de idade após a repicagem (transferência das mudas da sementeira para tubetes de 100 cm^3). Ambos os tipos de muda apresentaram uniformidade, com diâmetro de colo de 2 mm e parte aérea não excedendo 22 cm. O sistema radicular estava adequadamente desenvolvido, com raízes de tonalidade clara, ocupando todo o espaço dentro do tubete, sem estarem enroladas e/ou fora do recipiente.

2.4.3 MONTAGEM DO EXPERIMENTO

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado em casa de vegetação, que combinou 3 níveis de compactação e 2 tipos de mudas (clonal e seminal), com 12 repetições, totalizando 72 unidades experimentais. Foram utilizados como vasos, colunas de PVC com 20 cm de diâmetro e 30 cm de altura, que foram cortados verticalmente ao meio e unidos usando fita adesiva silver tape, para facilitar a abertura posterior. As colunas de PVC foram lixadas e revestidas com uma camada de parafina na parte interna, para evitar fluxos preferenciais entre o solo e a parede da coluna. Além disso, a parte inferior das colunas foi revestida com plástico resistente perfurado, para permitir a livre drenagem do excesso de água.

O solo utilizado no experimento foi coletado como descrito anteriormente, na camada de 0 a 0,30 m de profundidade, e não recebeu adubação, somente foi peneirado através de uma malha com abertura de 8 mm, para homogeneização. Primeiramente, as colunas de PVC foram preenchidas com solo, compreendendo três

camadas de 4,66 cm de altura, totalizando 14 cm. Cada camada foi compactada e separada por escarificação, ou seja, a quebra da camada superficial, para facilitar o contato entre uma camada e outra de solo, conforme é feito no ensaio de Proctor. Para obter os níveis de compactação, utilizou-se um soquete com uma massa de 5 kg, que foi solto de uma altura de aproximadamente 25 cm da superfície da primeira camada compactada, 20 cm da superfície da segunda camada compactada e 13 cm da superfície da terceira camada compactada. Após a compactação, o restante do solo foi uniformemente acomodado no restante do vaso, sem compactação.

A equação 1 foi utilizada para calcular a energia de compactação nas unidades experimentais:

$$E = m.g.h.N.C \quad (1)$$

Em que:

E: energia potencial gravitacional de compactação (J);

m: massa do soquete (g);

g: aceleração da gravidade (cm s²);

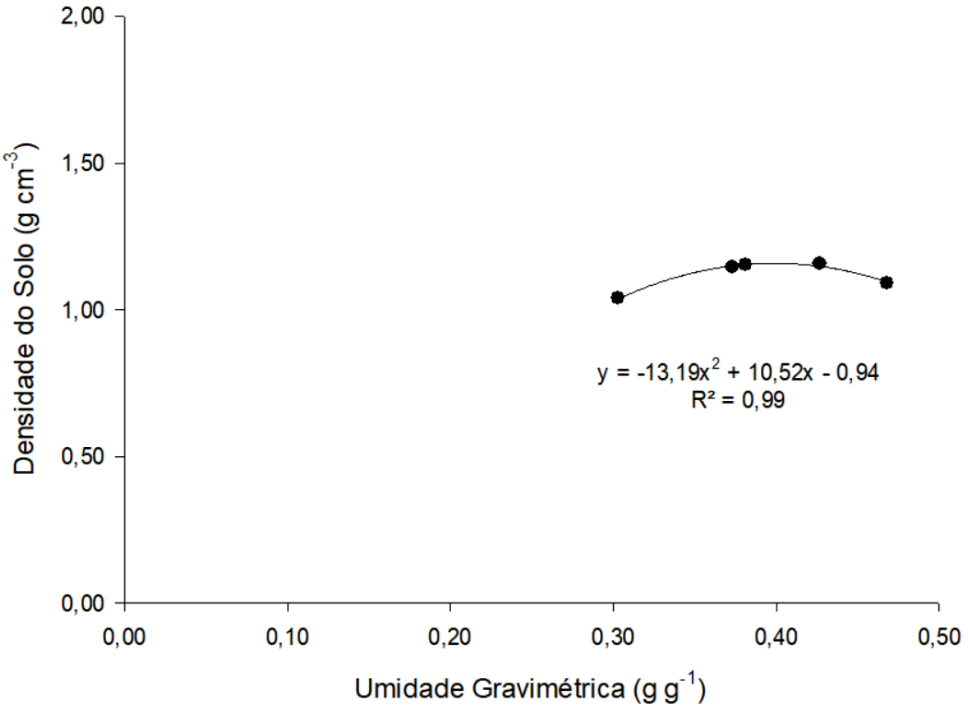
h: altura de queda livre do soquete (cm);

N: número de golpes aplicados, adimensional;

C: número de camadas, adimensional.

Para determinar os níveis de compactação do solo utilizado nos vasos, realizou-se o ensaio de Proctor normal (ABNT NBR-7182/2016; DNER-M162/94). Assim, obteve-se a densidade máxima de 1,16 g cm^{-3} e a umidade ótima para compactação de 0,39 g g^{-1} (conforme ilustrado na Fig. 2). Os níveis de compactação foram definidos como compactação alta, no qual estimou-se 92% da densidade de referência obtida no ensaio de Proctor normal. Para atingir esse valor, referente à camada compactada (14 cm), foram necessários 30 golpes, aplicados por três vezes em camadas menores, de 4,7 cm, em cada vaso. Compactação média, cujo critério foi reduzir o número de golpes para 20 em cada uma das três camadas menores. E sem compactação, onde o solo foi simplesmente acomodado de forma uniforme nos vasos.

FIGURA 2 – CURVA DE COMPACTAÇÃO DO SOLO UTILIZADO NO EXPERIMENTO



FONTE: A autora (2024).

Após a compactação das unidades experimentais, procedeu-se ao plantio das mudas de erva-mate. Cada vaso foi cuidadosamente coberto por uma camada de palha, destinada tanto à supressão de plantas daninhas quanto à conservação da umidade do solo. A manutenção do teor de água foi uniforme em todos os vasos ao longo do experimento, e aplicados tal qual é comumente feito em casa de vegetação, com irrigação por aspersão diariamente.

Após 165 dias da instalação do experimento, a frequência de irrigação foi gradualmente ajustada. Inicialmente, ocorria a cada três dias durante cerca de duas semanas. Posteriormente, o intervalo foi estendido para cada 4 dias, seguido por intervalos de 5 dias, com aproximadamente duas semanas entre cada alteração. Subsequentemente, a irrigação foi reduzida para uma vez por semana, permanecendo nesse intervalo até o término do experimento aos 236 dias. Assim, no último mês do experimento, as plantas passaram mais tempo sem receber irrigação.

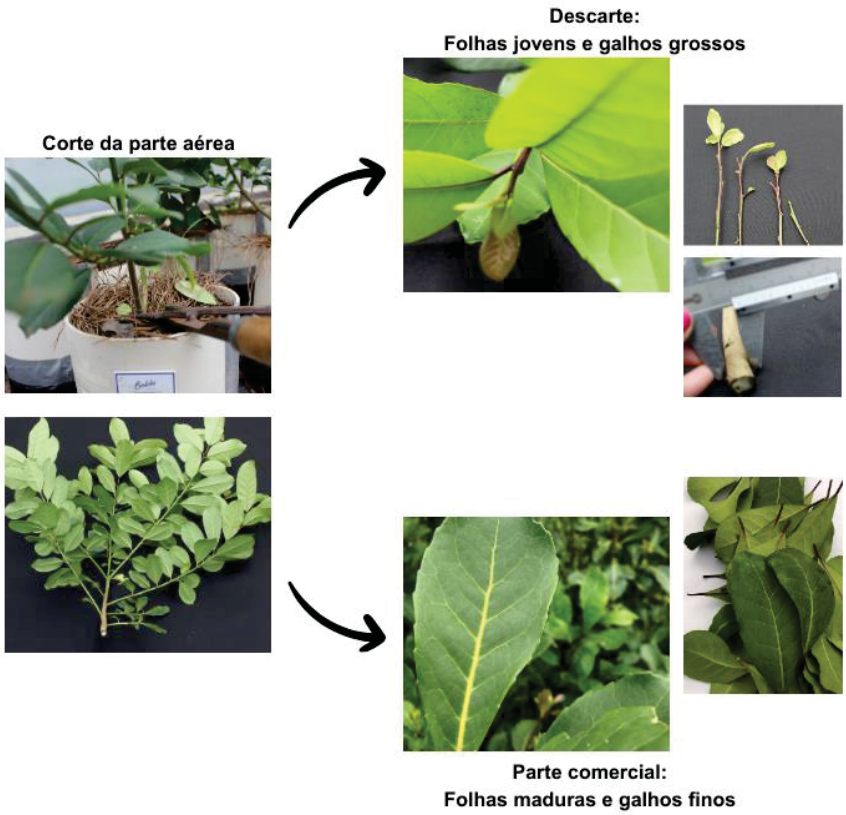
2.4.4 DETERMINAÇÃO DOS ATRIBUTOS DE PLANTAS (PARTE AÉREA)

Mensalmente, foram conduzidas medições de altura e diâmetro, a 5 cm de altura da base, em todas as mudas, com o propósito de monitorar seu crescimento. A mensuração da altura foi realizada utilizando uma fita métrica, enquanto o diâmetro foi registrado por meio de um paquímetro.

Ao final do experimento (236 dias) a parte aérea das plantas foi colhida, cortando a 5 cm de altura a partir da base (Fig. 3). Na sequência foi avaliado o número de ramos de cada muda, e a quantidade de folhas.

As mudas foram coletadas inteiras e, a partir dos ramos colhidos, foram selecionadas conforme interesse da indústria, aonde folhas jovens e galhos grossos são descartados, e folhas maduras e galhos finos são usados comercialmente. Galhos grossos são aqueles acima de 7 mm, e as folhas jovens são aquelas com textura membranácea, e coloração verde clara ou avermelhada; enquanto as mais espessas, e de coloração verde escura são classificadas como maduras.

FIGURA 3 – COLETA DA PARTE AÉREA DE MUDAS CLONAIS (BRS BLD YARI) E SEMINAIS DE ERVA-MATE AOS 236 DIAS APÓS O TRANSPLANTIO NOS VASOS



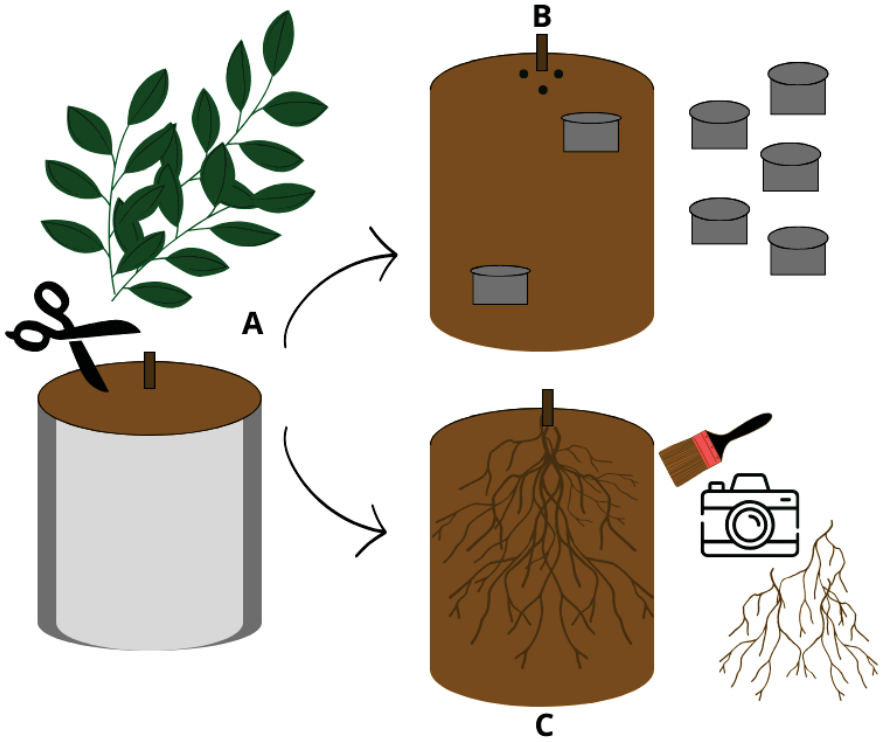
FONTE: A autora (2024).

Em seguida cada amostra foi pesada, para obtenção da massa fresca da parte aérea, e colocada em sacos de papel kraft para secar em estufa de circulação forçada de ar, a 65 ºC, até atingir peso constante em balança de precisão. Após atingir peso constante, foi determinada a matéria seca da parte aérea.

2.4.5 DETERMINAÇÃO DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

Após a retirada da parte aérea da planta (Fig. 4a), metade de cada vaso foi separada para realizar a inserção de anéis volumétricos, conforme ilustrado (Fig. 4b). Enquanto a outra metade foi destinada a expor o sistema radicular, e à retirada de amostras de solo para a obtenção da umidade (Fig. 4c). A separação dos vasos em duas partes foi realizada com um estilete, cortando o local aonde os vasos estavam unidos por fita adesiva.

FIGURA 4 – ESQUEMA DE AMOSTRAGEM DE PARTE AÉREA E SOLO NOS VASOS AOS 236 DIAS APÓS A IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO



FONTE: A autora (2024).

LEGENDA: corte da parte aérea (A), metade do vaso para coleta de amostras indeformadas (B) e a metade utilizada para expor, fotografar e coletar as raízes (C).

Antes de coletar as amostras, uma camada superficial de solo, com aproximadamente 4 cm de espessura, foi removida da parte superior da coluna, com o intuito de excluir a camada de solo mais suscetível às condições externas.

A coleta das amostras indeformadas, usadas para análises de densidade do solo, umidade volumétrica, porosidade total, macroporosidade e microporosidade, foi realizada utilizando anéis volumétricos (altura de 3,5 cm e diâmetro de 4,7 cm). Esses anéis foram coletados em duas camadas dentro da coluna: o primeiro na camada superior, entre 5 e 15 cm de profundidade, e o segundo na camada inferior, entre 20 e 30 cm de profundidade.

Posteriormente, as amostras foram devidamente embaladas e transportadas para o Laboratório de Física do Solo da UFPR, para serem processadas.

2.4.6 ANÁLISES FÍSICAS

Após a realização do toalete, as amostras indeformadas de solo passaram pelo processo de saturação, no qual uma lâmina d'água foi elevada até 2/3 da altura do anel, permanecendo por 48 horas. Após esse período, as amostras foram submetidas ao potencial de -60 hPa em uma mesa de tensão, sendo pesadas ao atingir o equilíbrio nesse potencial. Em seguida, as amostras foram transferidas para o potencial de -100 hPa em uma Câmara de Richards, e novamente pesadas após atingirem o equilíbrio.

A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada em laboratório, nos anéis volumétricos, por meio de um penetrômetro de bancada, montado e desenvolvido por Figueiredo *et al*. (2011). O ensaio foi realizado quando as amostras se estabilizaram no potencial de -100 hPa.

Finalmente, as amostras foram submetidas à secagem a 105 °C por 48 horas. A densidade do solo foi determinada utilizando o método do anel volumétrico, e a microporosidade foi considerada equivalente à umidade volumétrica do solo relacionada ao potencial de -60 hPa, conforme estabelecido pela equação 2:

$$\frac{Mic = (Ms60 - Tara) - (Mss - Tara)}{Va} \quad (2)$$

Em que:

Mic: microporosidade ($cm^3\ cm^{-3}$)

$Ms60$: massa da amostra equilibrada à -60 hPa (g);

Tara = somatório da massa do anel, do tecido, e do elástico (g);

Mss: massa de solo seco (g);

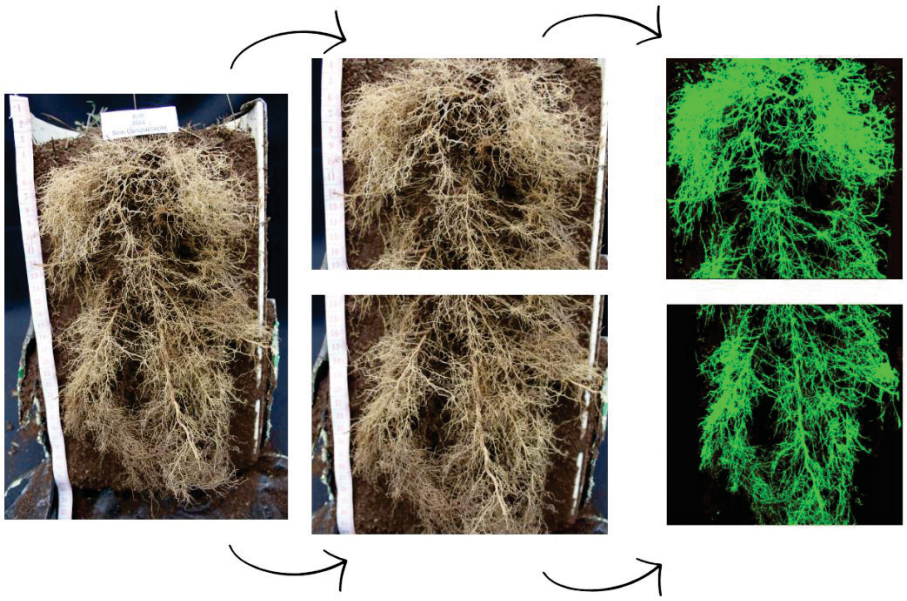
Va: volume do anel (cm^3).

A densidade do solo foi obtida pela massa de solo seco, dividido pelo volume do anel volumétrico. A porosidade total do solo (PT) foi obtida pela diferença da massa de solo saturado pela massa de solo seco, dividido pelo volume do anel volumétrico. A macroporosidade foi determinada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

2.4.7 PROCESSAMENTO DE AMOSTRAS DE RAÍZES

As raízes foram coletadas expostas dentro do vaso, com a ajuda de uma faca e pincel para retirada do solo. Após serem fotografadas, as imagens foram tratadas e na sequência analisadas no software RootSnap, versão 1.3.2.25 (CID Bio-Science, Camas, WA, EUA), para determinar a porcentagem de raízes no volume correspondente a metade de cada vaso (Fig. 5).

FIGURA 5 – ASPECTO VISUAL DAS RAÍZES DE MUDAS DE ERVA-MATE AOS 236 DIAS APÓS O TRANSPLANTIO NA METADE DOS VASOS EM QUE FORAM CULTIVADAS E ANÁLISE NO SOFTWARE ROOTSNAP



Fonte: A autora (2024).

Após fotografadas, as amostras de raízes mais solo, coletadas na metade do vaso, foram separadas entre camada compactada e não compactada. Na sequência foram lavadas com água sem dispersante, desagregadas manualmente, sobre um conjunto de peneiras de 2 e 1 mm de diâmetro. O processo foi repetido até conseguir retirar a maior parte do solo.

Na sequência, as raízes que ficaram retidas na peneira de 2 mm foram retiradas com pinças e distribuídas em papel absorvente, que posteriormente foram pesadas, para obtenção da massa fresca de raízes, e levadas à secagem em estufa à 45 °C por 24 horas. As raízes secas foram retiradas do papel e pesadas em balança de precisão, obtendo o valor de massa seca total de raízes (*Msr*). Na sequência foi calculada a densidade de raízes (*Der*), segundo a equação 3:

$$Der = \left(\frac{Msr}{Vs}\right) \quad (3)$$

Em que:

Der: densidade de raízes (g m^{-3});

Msr: massa seca de raízes (g);

Vs: volume de solo (m^3).

2.4.8 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados passaram pelo teste de homogeneidade de variância (Bartlett) e normalidade (Shapiro-Wilk). Aqueles que não se enquadraram nos pressupostos de normalidade foram submetidos à transformação Boxcox, que ajusta os dados por meio da função logarítmica. Em seguida, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, com um nível de 5% de probabilidade. A curva de compactação do solo foi obtida por regressão polinomial de segundo grau, e plotada no software SigmaPlot. Também foram conduzidas análises de regressão do tipo potência. Todas as análises estatísticas foram realizadas com o suporte do software estatístico R 4.3.1.

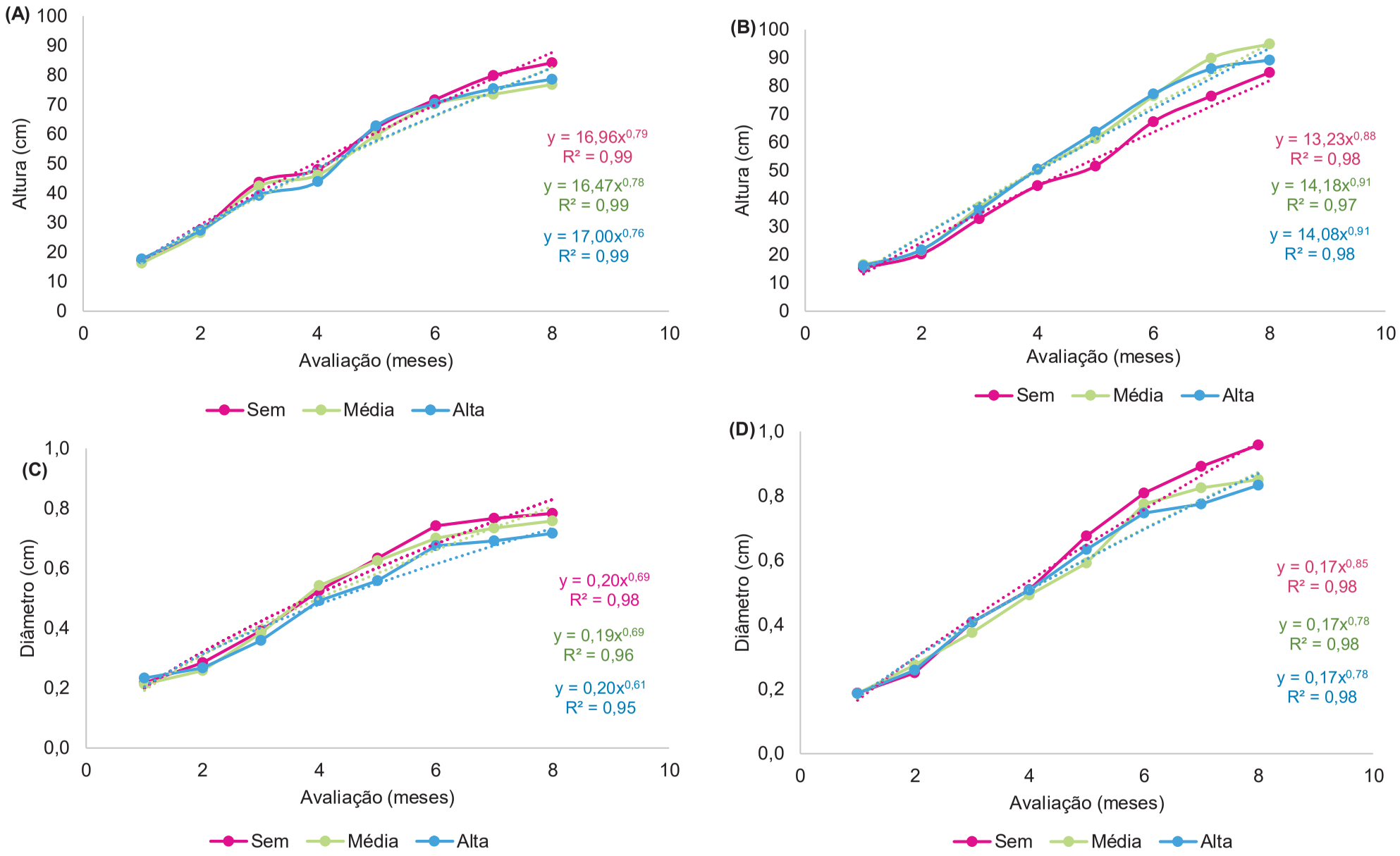
2.5 RESULTADOS

2.5.1 PARTE AÉREA

A altura e o diâmetro das mudas aumentaram ao longo dos meses, tanto nas mudas clonais quanto nas seminais. Inicialmente, a altura e diâmetro partiram de um mesmo ponto no plantio das mudas nos vasos. Um mês após o transplante, o incremento de altura nas mudas clonais foi de 60%, 63% e 55%, enquanto nas mudas seminais o incremento foi de 32%, 31% e 20%, no tratamento sem compactação, compactação média e compactação alta, respectivamente. No oitavo mês o incremento nas mudas clonais foi de 6%, 5% e 4%, e nas mudas seminais foi de 11%, 6% e 4%, para os mesmos tratamentos de compactação, respectivamente. Para o diâmetro das mudas clonais, o incremento no primeiro mês foi de 27%, 24% e 17%, enquanto nas mudas seminais foi de 32%, 47% e 37%, respectivamente. No oitavo mês, o incremento no diâmetro nas mudas clonais foi de 1%, 4% e 4%, e nas mudas seminais foi de 8%, 2% e 6%, no tratamento sem compactação, compactação média e alta respectivamente, respectivamente.

Na última medição, no oitavo mês, as mudas clonais do tratamento sem compactação apresentaram altura média de 84,25 cm, resultado acima dos demais níveis de compactação. Já nas mudas seminais o tratamento de compactação média obteve altura de 94,92 cm, ficando acima do sem compactação e do compactação alta. O diâmetro, medido a 5 cm de altura da base, foi maior no tratamento sem compactação, para clonais e seminais. A clonal apresentou diâmetro de 0,78 cm e a seminal 0,96 cm (Fig. 6). Analisando o crescimento das mudas no período, através das análises de regressão, tem-se que nas clonais a altura foi maior no tratamento sem compactação, em relação aos outros tratamentos nos últimos dois meses, enquanto nas seminais, nos últimos dois meses, a altura aumentou de forma similar entre os níveis de compactação médio e alto, e menor no sem compactação. O diâmetro no último mês de experimento foi maior no tratamento sem compactação, para mudas clonais e seminais

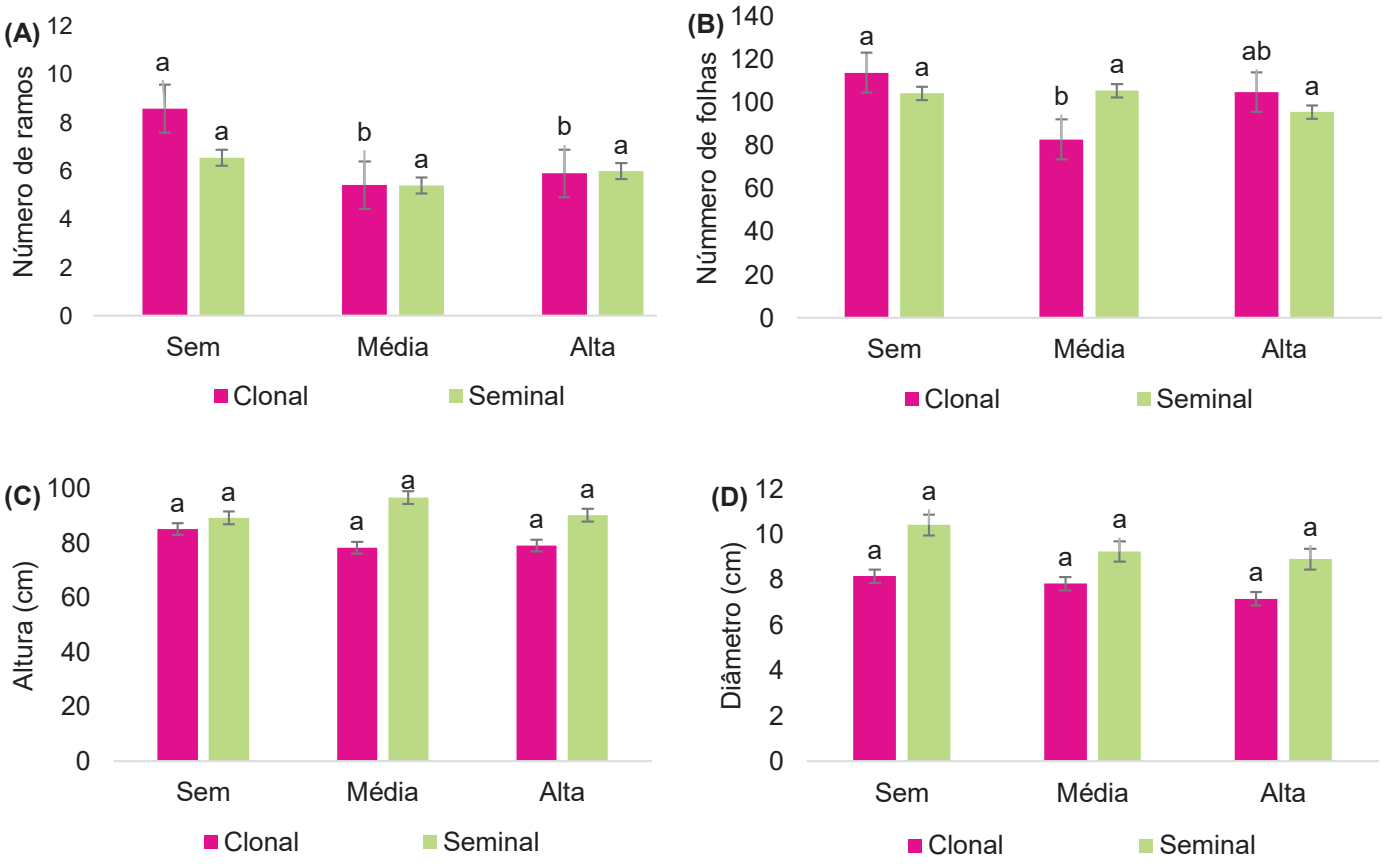
FIGURA 6 - EVOLUÇÃO DO CRESCIMENTO EM ALTURA E DIÂMETRO DA PARTE AÉREA DE MUDAS CLONAIS (BRS BLD YARI) E SEMINAIS DE ERVA-MATE DO PRIMEIRO AO OITAVO MÊS APÓS O TRANSPLANTIO DAS MUDAS PARA OS VASOS



Fonte: A autora (2024).

Para o número de ramos, foi observada diferença significativa (p<0,05) entre os tratamentos aplicados às mudas clonais (Fig. 7). Notavelmente, no tratamento sem compactação do solo, a média foi de 8,6 ramos por planta, seguida por 5,9 na compactação alta e 5,4 na compactação média. No entanto, nas mudas seminais, não foram encontradas diferenças significativas. Quanto ao número de folhas, também foi observada diferença significativa (p<0,05) entre os tratamentos aplicados às mudas clonais. Especificamente, no tratamento sem compactação do solo, a média foi de 114 folhas, seguida por 105 na compactação alta e 83 na compactação média.

FIGURA 7 – PARÂMETROS DE PARTE AÉREA DE MUDAS CLONAIS (BRS BLD YARI) E SEMINAIS DE ERVA-MATE SUBMETIDAS A DIFERENTES NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO APÓS 236 DIAS DE CULTIVO



FONTE: A autora (2024).

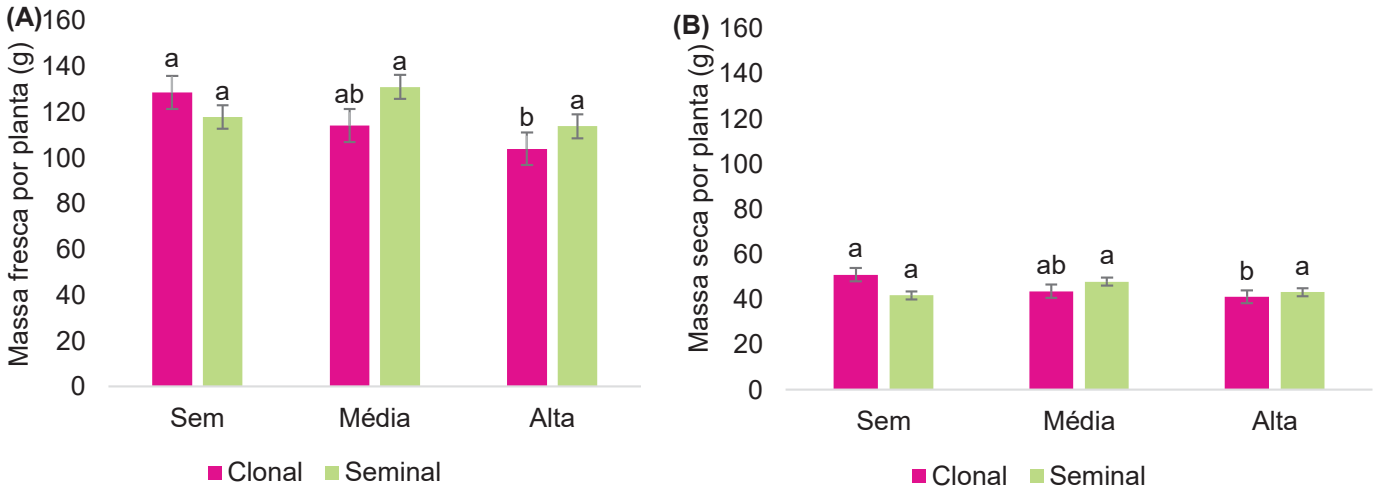
LEGENDA: médias do número de ramos **(A)**, número de folhas **(B)**, altura **(C)** e diâmetro **(D)** das mudas de erva-mate em relação aos três níveis de compactação. As barras verticais indicam o erro padrão. Médias com letras idênticas indicam que não há diferenças significativas entre os níveis, para a mesma origem de muda, pelo teste de Tukey com um nível de significância de 5%.

No entanto, a diferença foi significativa apenas entre os tratamentos sem compactação e com compactação média. Nas mudas seminais, não foram observadas diferenças significativas (Figura 7b). Quanto às variáveis altura (Fig. 7c) e diâmetro do caule (Fig. 7d), não foram encontradas diferenças significativas entre os tratamentos, tanto para as mudas clonais quanto para as mudas seminais.

A massa fresca total por planta variou entre os tratamentos aplicados às mudas clonais (Fig. 8a). Notadamente, o tratamento sem compactação exibiu a maior média, com um aumento de 26% em comparação ao tratamento de compactação alta. No entanto, para as mudas seminais, não foram observadas diferenças entre os níveis de compactação.

Da mesma forma, a análise da massa seca total por planta variou entre os tratamentos aplicados às mudas clonais ($p<0,05$). Mais uma vez, o tratamento sem compactação se destacou, apresentando a maior média e um incremento de 24% em relação ao tratamento de compactação alta. No entanto, assim como observado anteriormente, não foram encontradas diferenças estatísticas entre os tratamentos para as mudas seminais (Fig. 8b).

FIGURA 8 – RESULTADOS DE MASSA FRESCA E SECA DE MUDAS CLONAIS (BRS BLD YARI) E SEMINAIS DE ERVA-MATE SUBMETIDAS A DIFERENTES NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO AOS 236 DIAS APÓS O TRANSPLANTIO NOS VASOS

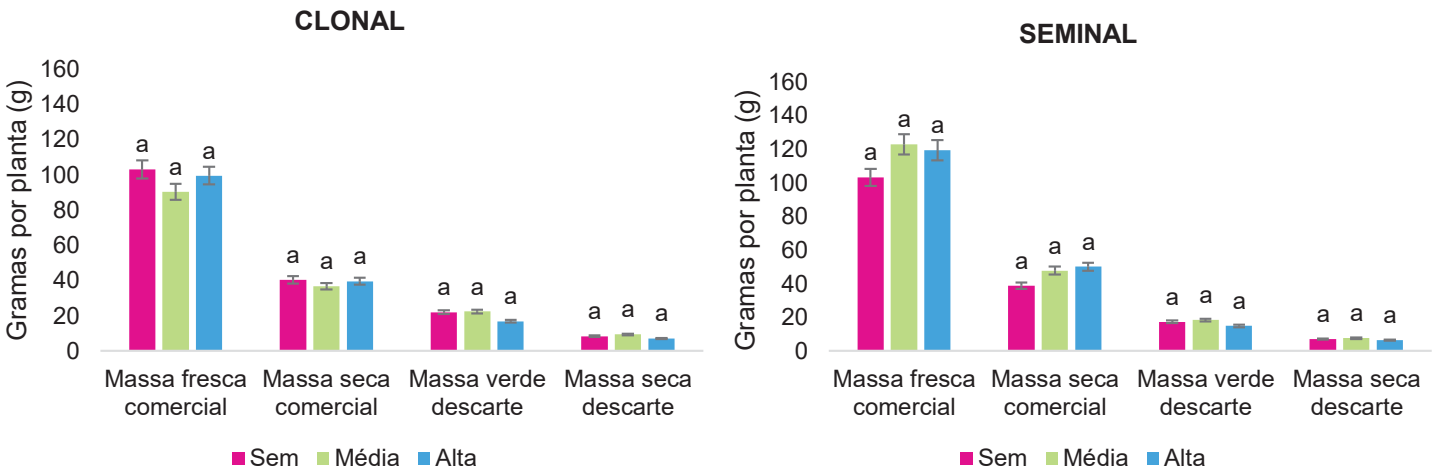


FONTE: A autora (2024).

LEGENDA: massa fresca **(A)** e seca **(B)** da parte aérea de mudas clonais e seminais de erva-mate. As barras verticais indicam o erro padrão. Médias com letras idênticas indicam que não há diferenças significativas entre os níveis, pelo teste de Tukey com um nível de significância de 5%.

Contudo, ao separar as partes comerciais (ramos finos e folhas maduras) do material de descarte (ramos grossos > 8 mm e folhas jovens) das mudas, não foram observadas diferenças nas mudas clonais e nas seminais, quanto aos níveis de compactação (Fig. 9).

FIGURA 9 – RESULTADOS DE MASSA COMERCIAL E DESCARTADA DE MUDAS CLONAIS (BRS BLD YARI) E SEMINAIS DE ERVA-MATE SUBMETIDAS A DIFERENTES NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO AOS 236 DIAS APÓS O TRANSPLANTIO NOS VASOS



FONTE: A autora (2024).

LEGENDA: massa fresca e seca da parte comercial (ramos finos e folhas maduras) e descarte (ramos grossos > 8 mm e folhas jovens) de mudas clonais e seminais de erva-mate. As barras verticais indicam o erro padrão. Médias com letras idênticas indicam que não há diferenças significativas entre os níveis, pelo teste de Tukey com um nível de significância de 5%.

2.5.2 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

A densidade do solo não mudou entre os tratamentos na camada superior do vaso, tanto para mudas clonais quanto para seminais (Tab. 2). No entanto, na camada inferior, em que foram aplicados os diferentes níveis de compactação, observou-se uma distinção significativa ($p<0,05$).

No solo cultivado com mudas clonais, a maior densidade do solo foi registrada no tratamento de compactação alta, atingindo o valor médio de 0,83 g cm^{-3}, seguida pela compactação média, que alcançou 0,79 g cm^{-3}, enquanto o tratamento sem compactação apresentou uma densidade de 0,67 g cm^{-3}. No solo cultivado com mudas seminais, os maiores valores de densidade foram registrados nos tratamentos de

compactação alta e média, com 0,83 g cm^{-3} e 0,84 g cm^{-3}, respectivamente, enquanto o tratamento sem compactação manteve uma densidade de 0,67 g cm^{-3}.

Na camada superior do solo, a porosidade total não variou entre os diferentes tratamentos. No entanto, para os vasos com mudas seminais, no tratamento sem compactação ocorreu porosidade total de 0,76 cm^3 cm^{-3}, diferindo estatisticamente ($p<0,05$) da compactação média, que registrou 0,72 cm^3 cm^{-3}, enquanto o tratamento de compactação alta não diferiu dos demais, com uma média de 0,74 cm^3 cm^{-3}. Na camada inferior dos vasos contendo mudas clonais, o tratamento sem compactação exibiu uma porosidade total de 0,75 cm^3 cm^{-3}, diferindo estatisticamente ($p<0,05$) do tratamento de compactação média, que registrou 0,72 cm^3 cm^{-3}. Nos vasos com as mudas seminais, não foram observadas diferenças significativas na porosidade total da camada inferior.

Na camada superior, a macroporosidade não variou entre os tratamentos aplicados nos solos com mudas clonais. No entanto, para os solos com mudas seminais, o tratamento sem compactação registrou uma média de 0,33 cm^3 cm^{-3}, diferindo do tratamento de compactação alta, que proporcionou uma média de 0,29 cm^3 cm^{-3}. Na camada inferior, a macroporosidade foi significativamente maior no tratamento sem compactação, nos solos cultivados com mudas clonais e com mudas seminais, diferindo estatisticamente ($p<0,05$) dos tratamentos de compactação média e alta. Estes dois últimos não diferiram entre si. Para o solo com as mudas clonais, os valores foram de 0,30 cm^3 cm^{-3}, 0,20 cm^3 cm^{-3} e 0,16 cm^3 cm^{-3} para os tratamentos sem compactação, compactação média e compactação alta, respectivamente. Para o solo com as mudas seminais, os valores foram de 0,31 cm^3 cm^{-3}, 0,19 cm^3 cm^{-3} e 0,17 cm^3 cm^{-3} para os mesmos tratamentos, respectivamente.

Na camada superior, a microporosidade do solo cultivado com mudas clonais diferiu apenas entre os tratamentos de compactação média e alta, registrando valores de 0,44 cm^3 cm^{-3} e 0,40 cm^3 cm^{-3}, respectivamente. Por outro lado, no solo cultivado com mudas seminais, não foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos nesta camada. Na camada inferior, a microporosidade do solo foi menor no tratamento sem compactação, tanto com o cultivo de mudas clonais quanto seminais, diferindo ($p<0,05$) dos tratamentos de compactação média e alta, os quais não apresentaram diferenças entre si. Para o solo com mudas clonais, os valores foram de 0,44 cm^3 cm^{-3}, 0,52 cm^3 cm^{-3} e 0,57 cm^3 cm^{-3} para os tratamentos sem compactação, compactação média e compactação alta, respectivamente. Para o solo

com as mudas seminais, os valores correspondentes foram de 0,42 $cm^3\ cm^{-3}$, 0,53 $cm^3\ cm^{-3}$ e 0,53 $cm^3\ cm^{-3}$, respectivamente.

Na camada superior dos vasos, tanto para o solo cultivado com mudas clonais quanto para as seminais, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos na resistência do solo à penetração (RP). No entanto, na camada inferior, foi constatada uma diferença. Para o solo com mudas clonais, o tratamento sem compactação proporcionou uma RP menor em comparação com os demais, registrando um valor de 0,42 MPa. Além disso, o tratamento de compactação média (1,17 MPa) não diferiu do tratamento com compactação alta (1,28 MPa). Da mesma forma, na camada inferior do solo com mudas seminais, também foi observada diferença entre o tratamento sem compactação, com 0,46 MPa, e os demais tratamentos. Além disso, o tratamento de compactação média (1,31 MPa) não diferiu estatisticamente do tratamento de compactação alta (1,37 MPa).

É importante ressaltar que no momento da medição da RP nos anéis volumétricos, a umidade volumétrica estava equilibrada no potencial de -10 kPa. Para a primeira camada dos vasos, tanto nos vasos com mudas clonais quanto nas seminais, não foram observadas diferenças entre os tratamentos para a umidade volumétrica. No entanto, na camada inferior, para ambas as mudas, houve diferença entre o tratamento sem compactação e os demais, sendo que o tratamento de compactação média não diferiu estatisticamente do tratamento de compactação alta. No solo com as mudas clonais, o incremento na umidade volumétrica foi de 20% no tratamento de compactação média e 30% na compactação alta em relação ao tratamento sem compactação. Já no solo com as mudas seminais, o incremento foi de 25% para a compactação média e alta em relação ao tratamento sem compactação.

TABELA 2 - VALORES MÉDIOS DE DENSIDADE DO SOLO, POROSIDADE TOTAL, MICROPOROSIDADE, MACROPOROSIDADE, E RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO NA CAMADA SUPERIOR E INFERIOR DO SOLO CULTIVADO COM MUDAS CLONAIS (BRS BLD YARI) E SEMINAIS DE ERVA-MATE

Mudas Clonais	Camada Superior (0 -15 cm)			
	Sem	Média	Alta	CV %
Densidade do Solo (g cm^{-3})	0,64 a	0,66 a	0,65 a	7,8
Porosidade Total (cm^3 cm^{-3})	0,74 a	0,72 a	0,72 a	6,4
Microporosidade (cm^3 cm^{-3})	0,41 ab	0,44 a	0,40 b	8,1
Macroporosidade (cm^3 cm^{-3})	0,33 a	0,30 a	0,32 a	10,3
Resistência do Solo à Penetração (MPa)	0,37 a	0,45 a	0,38 a	40,4
	Camada Inferior (15 – 30 cm)			
	Sem	Média	Alta	CV %
Densidade do Solo (g cm^{-3})	0,67 c	0,79 b	0,83 a	5,8
Porosidade Total (cm^3 cm^{-3})	0,75 a	0,72 b	0,73 ab	4,2
Microporosidade (cm^3 cm^{-3})	0,44 b	0,52 a	0,57 a	10,6
Macroporosidade (cm^3 cm^{-3})	0,30 a	0,20 b	0,16 b	20,5
Resistência do Solo à Penetração (MPa)	0,42 b	1,17 a	1,28 a	38,2
Mudas Seminais	Camada Superior (0 -15 cm)			
	Sem	Média	Alta	CV %
Densidade do Solo (g cm^{-3})	0,65 a	0,65 a	0,66 a	6,5
Porosidade Total (cm^3 cm^{-3})	0,76 a	0,72 b	0,74 ab	5,3
Microporosidade (cm^3 cm^{-3})	0,42 a	0,42 a	0,42 a	8,9
Macroporosidade (cm^3 cm^{-3})	0,33 a	0,32 ab	0,29 b	10,8
Resistência do Solo à Penetração (MPa)	0,35 a	0,41 a	0,42 a	26,1
	Camada Inferior (15 – 30 cm)			
	Sem	Média	Alta	CV%
Densidade do Solo (g cm^{-3})	0,67 b	0,84 a	0,83 a	6,8
Porosidade Total (cm^3 cm^{-3})	0,73 a	0,72 a	0,71 a	4,1
Microporosidade (cm^3 cm^{-3})	0,42 b	0,53 a	0,53 a	5,7
Macroporosidade (cm^3 cm^{-3})	0,31 a	0,19 b	0,17 b	14,5
Resistência do Solo à Penetração (MPa)	0,46 b	1,31 a	1,37 a	41,2

FONTE: A autora (2024).

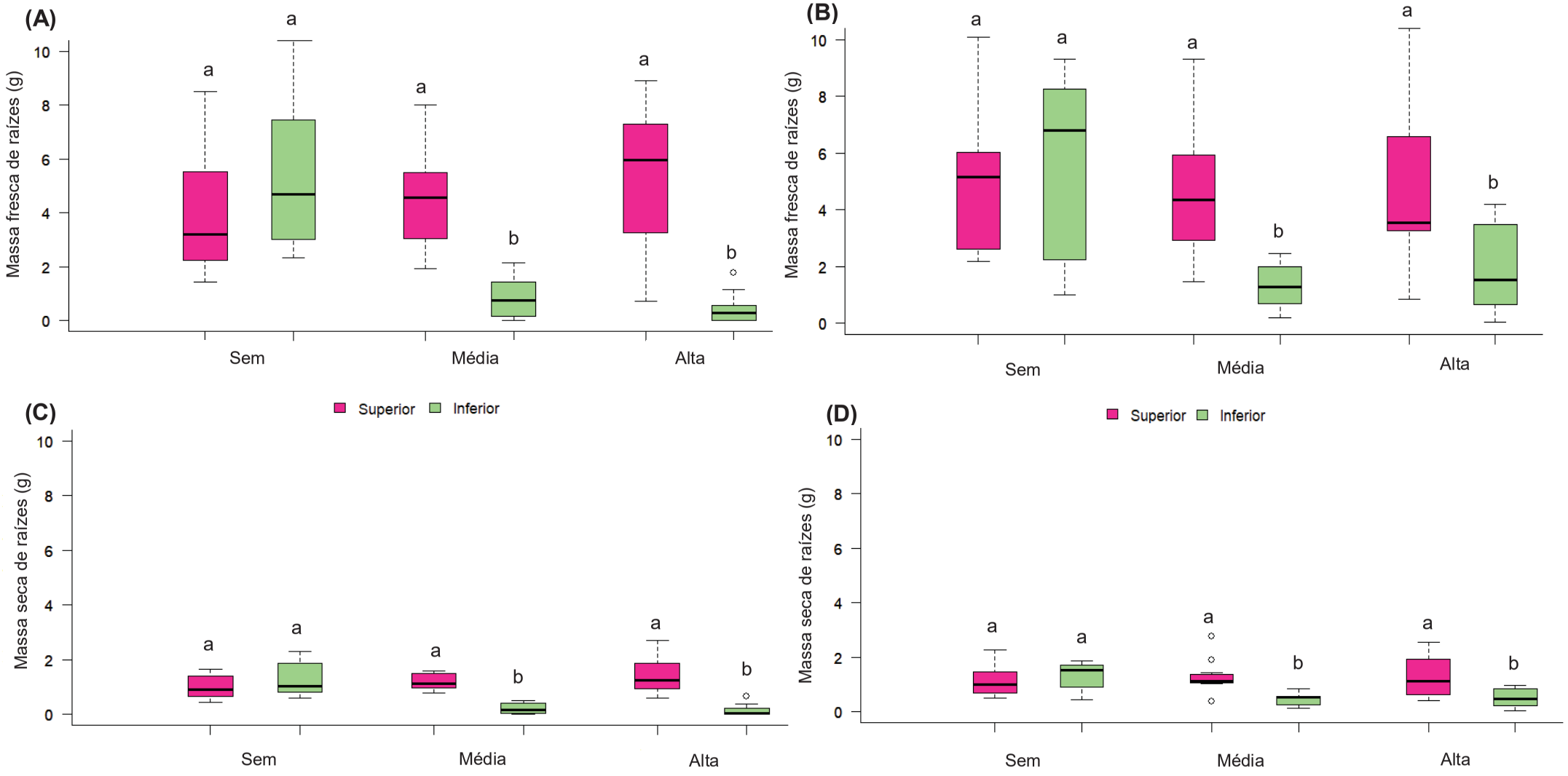
LEGENDA: CV%= coeficiente de variação. Médias com letras idênticas na mesma linha indicam que não há diferenças significativas entre os níveis de compactação, pelo teste de Tukey com um nível de significância de 5%.

2.5.3 SISTEMA RADICULAR

Os parâmetros radiculares apresentaram resultados semelhantes. Na camada superior, isenta de qualquer compactação do solo, os tratamentos exibiram resultados estatisticamente iguais, tanto para as mudas clonais quanto para as mudas seminais. No entanto, as mudas seminais tiveram uma massa de raízes maior em comparação com as clonais (Fig. 10). Analisando a densidade de raizes e a porcentagem de raízes (Fig. 11), através de imagens, onde os sistemas radiculares foram expostos na metade superior do vaso, observa-se que a ausência de compactação nessa região não influenciou as duas categorias de mudas. Entretanto, na camada inferior, sujeita a distintos níveis de compactação do solo, observou-se uma dinâmica mais complexa.

Na camada inferior nas mudas clonais, a compactação reduziu cerca de 85 e 89% da densidade radicular, respectivamente para média e alta compactação, quando comparado ao tratamento sem compactação (Fig. 11a). Da mesma forma, na camada inferior nas mudas seminais, o tratamento sem compactação foi estatisticamente superior, havendo reduções de 65% e 62% da densidade radicular, respectivamente para a compactação média e alta (Fig. 11b). Essas observações são corroboradas pelos dados de porcentagem de raízes, obtida pelas imagens processadas no software RootSnap (Fig. 11c e 11d). Verifica-se que o aumento da compactação do solo reduziu a quantidade de raízes.

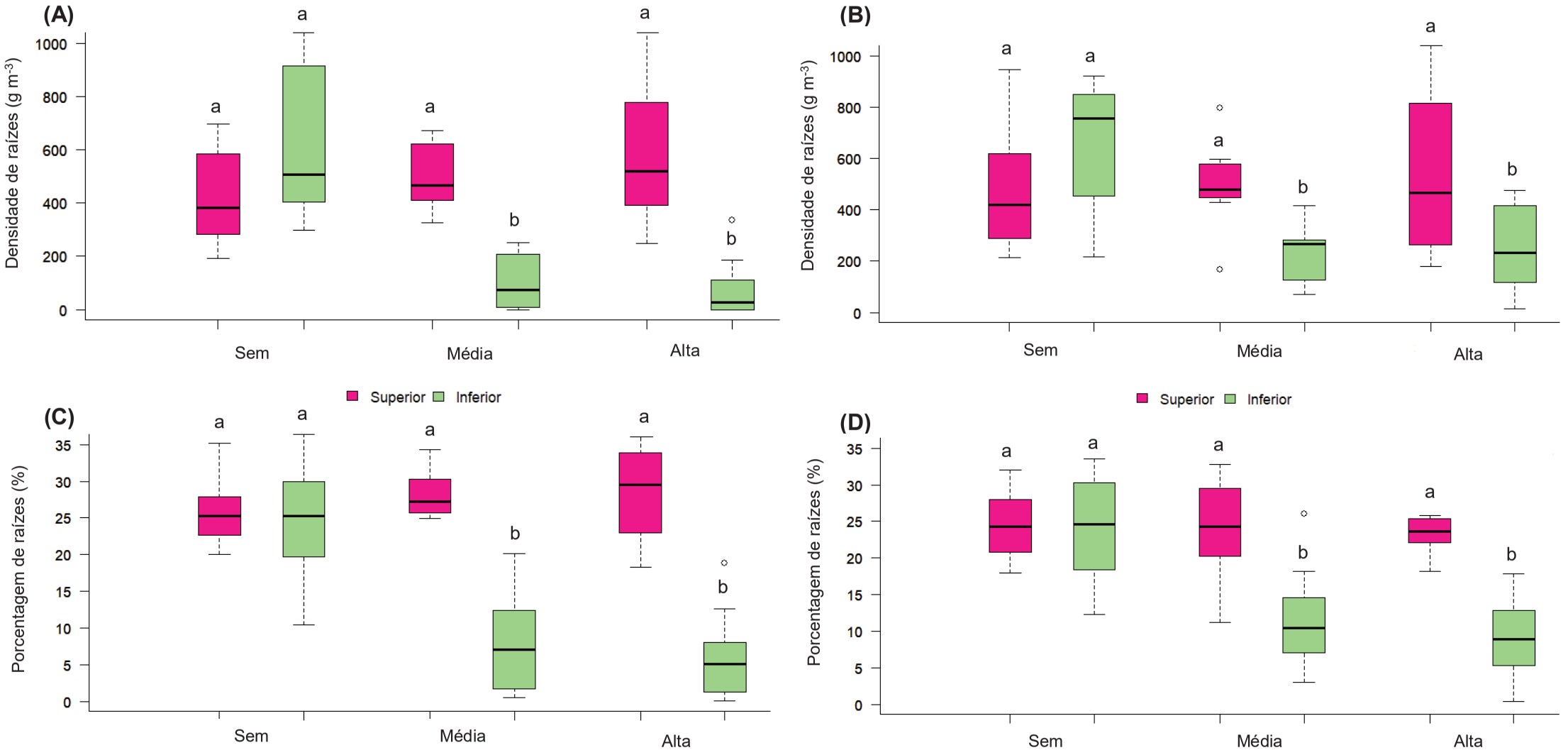
FIGURA 10 – MASSA FRESCA E SECA DE RAÍZES DE MUDAS CLONAIS (BRS BLD YARI) E SEMINAIS DE ERVA-MATE SUBMETIDAS A DIFERENTES NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO AOS 236 DIAS APÓS O TRANSPLANTIO NOS VASOS



FONTE: A autora (2024).

LEGENDA: valores médios de massa fresca de raízes de mudas clonais **(A)** e seminais (**B**); valores médios de massa seca de raízes de mudas clonais **(C)** e seminais **(D).** Médias seguidas pela mesma letra entre os níveis de compactação indicam que não há diferenças significativas, pelo teste de Tukey ($p<0,05$).

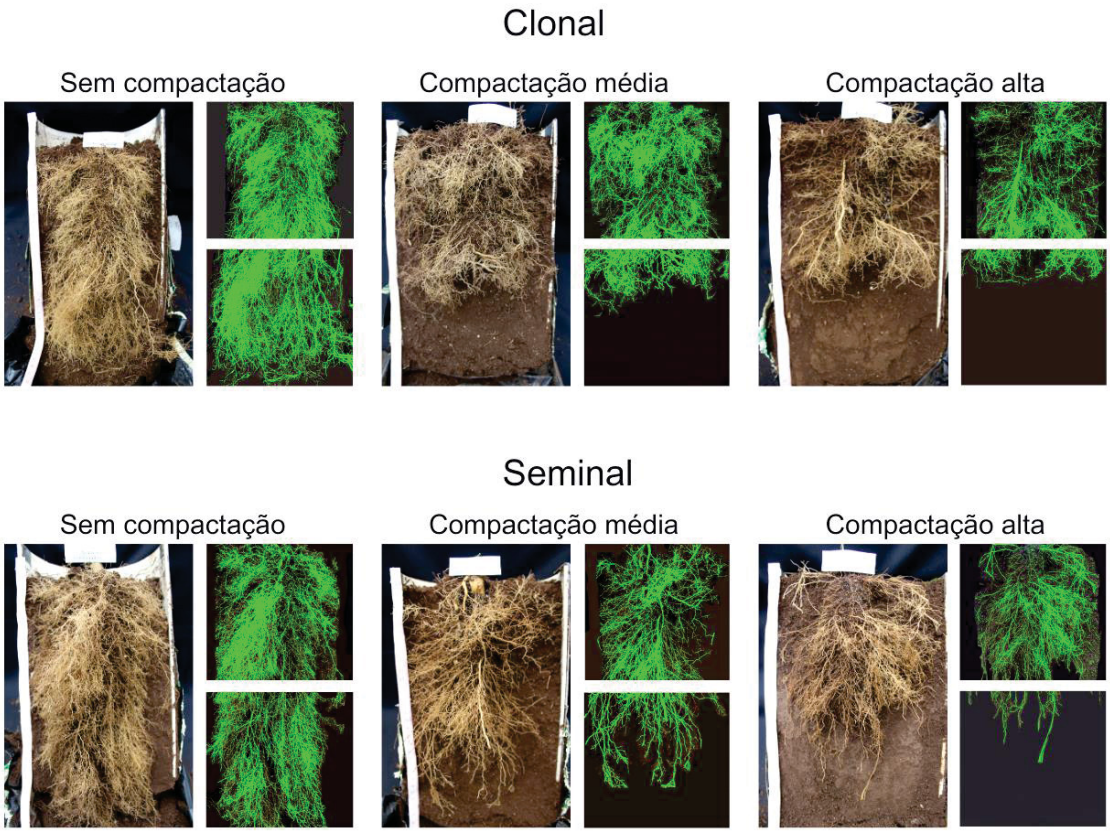
FIGURA 11 – DENSIDADE E PORCENTAGEM DE RAÍZES DE MUDAS CLONAIS (BRS BLD YARI) E SEMINAIS DE ERVA-MATE SUBMETIDAS A DIFERENTES NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO AOS 236 DIAS APÓS O TRANSPLANTIO NOS VASOS



FONTE: A autora (2024).

LEGENDA: valores médios de densidade de raízes para mudas clonais **(A)** e seminais (**B**); valores médios de porcentagem de raízes para mudas clonais **(C)** e seminais **(D).** Médias seguidas pela mesma letra entre os níveis de compactação indicam que não há diferenças significativas, conforme o teste de Tukey ($p<0,05$).

FIGURA 12 – CRESCIMENTO RADICULAR DE MUDAS CLONAIS (BRS BLD YARI) E SEMINAIS DE ERVA-MATE NOS DIFERENTES NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO DO SOLO AOS 236 DIAS



FONTE: A autora (2024).

2.6 DISCUSSÃO

2.6.1 PARTE AÉREA

O crescimento inicial da erva-mate, quanto à altura e ao diâmetro da parte aérea, diferiu com o passar dos meses, durante o período estudado, apresentando um potencial de maior crescimento nas mudas seminais (Fig. 6). Entretanto, quanto à altura, as mudas clonais foram mais prejudicadas com o aumento da compactação. Enquanto que o pior desempenho no crescimento das mudas seminais foi com a ausência de compactação. No caso das mudas clonais, o comportamento pode ser explicado pela ausência de uma raiz pivotante em seu sistema radicular. Essa característica limita a capacidade de penetração no solo em comparação com as mudas seminais, que possuem essa raiz principal (Krejci et al., 1986). A dificuldade

de explorar o solo compactado impactou diretamente no crescimento da parte aérea das mudas clonais.

A compactação do solo também causou redução do número de ramos e folhas das mudas clonais (cultivar BRS BLD Yari) quando submetidas a compactação média e alta (Fig. 7). Essa redução compromete os ganhos proporcionados pela seleção de cultivares, que se concentra principalmente na produtividade foliar, principal produto obtido nas plantações de erva-mate (Wendling et al. 2016; Sturion et.al. 2017). Além disso, o sucesso do plantio depende de estacas enraizadas que possam resistir às adversidades climáticas, apresentar altas taxas de sobrevivência e apresentar bom vigor de parte aérea e produção de biomassa foliar (Wendling et al., 2020), fatores que foram prejudicados pela compactação do solo. As mudas clonais apresentaram redução significativa na massa fresca e seca da parte aérea, em condições de compactação média e alta (Fig. 8). Já as mudas seminais não foram afetadas pela compactação do solo. Isto pode ser devido à resposta das plantas à compactação do solo ser distinta entre espécies e cultivares para uma mesma cultura (Iijima & Kono, 1991; Dannowski, 1992; Iijima & Kono, 1993; Iijima et al., 1993).

É importante destacar que a produção de mudas de erva-mate é comumente realizada por sementes, devido a maior facilidade de produção, ao maior domínio da tecnologia pelos produtores, e ao menor custo de produção em relação à propagação vegetativa (Wendling & Santin, 2015). No entanto, a propagação sexuada apresenta problemas, tais como: a produção de mudas com características diferentes da planta matriz, dificuldades para a quebra de dormência e germinação, e longo período de produção das mudas (Wendling 2004; Wendling & Santin, 2015). Esses problemas podem ser minimizados ou até solucionados através da obtenção de mudas por propagação vegetativa de indivíduos geneticamente superiores (Wendling, 2004). Assim, em condições adequadas de solo as plantas provenientes de mudas propagadas de forma vegetativa podem ser mais produtivas em relação às propagadas por sementes, com aumento de 24% na produção (Santin et al. 2015). Em um estudo avaliando condições adversas de temperatura e disponibilidade de água, o genótipo BRS BLD Yari apresentou tolerância a baixas temperaturas e pouca disponibilidade de água (Aguiar et al. 2023). No entanto, nosso estudo mostrou que a compactação do solo merece atenção no momento do plantio das mudas, para que as plantas possam manifestar todo o seu potencial produtivo.

A ausência de efeito dos níveis de compactação na altura da planta e diâmetro do ramo, tanto nas mudas clonais quanto nas mudas seminais, pode ser atribuída ao crescimento gradual característico da erva-mate. Para Borges et al. (2019), estudando cobertura do dossel em sistemas agroflorestais, a altura das plantas de erva-mate também não diferiu entre as classes até o segundo ano após o plantio. Contudo, o desempenho da planta avaliado através da altura das mudas, ficou mais distinto entre os tratamentos a partir do terceiro mês para as mudas seminais, e a partir do 6° mês nas mudas clonais, período esse onde houve redução da irrigação realizada.

Observando o crescimento das mudas durante o período estudado (Fig. 6), infere-se que as condições adversas impostas pela compactação do solo podem ser minimizadas por condições meteorológicas mais adequadas, especialmente em relação às precipitações pluviométricas (Drescher et al., 2023). Neste sentido, a distribuição adequada de água nos primeiros meses do experimento, pode ter mascarado os efeitos adversos que a compactação pode trazer. Além disso, o estado hídrico da planta imediatamente após o plantio é crucial para o seu estabelecimento no campo, especialmente para garantir o crescimento das raízes (Burdett, 1990). Isto explica porque as mudas tiveram crescimento adequado no início deste estudo, independentemente do nível de compactação do solo, uma vez que a irrigação foi diária até os 165 dias após o plantio. Entre os 165 e 236 dias, observou-se uma maior diferenciação na altura e no diâmetro das mudas, com valores maiores no tratamento sem compactação. Esse padrão foi particularmente percebido nas mudas clonais, possivelmente devido à redução no fornecimento de água, e à arquitetura radicular distribuída no volume de solo.

Em um estudo realizado Bejarano et al. (2010), com *Quercus pyrenaica* Willd, os autores também constataram que o aumento da compactação do solo não teve efeito negativo no crescimento da parte aérea, nos sete meses de estudo. Provavelmente, porque as necessidades de água e nutrientes para o crescimento adequado das estruturas aéreas foram atendidas. Além disso, Correa et al. (2022) descreve que o fato de a planta manter o crescimento da parte aérea relativamente estável enquanto a raiz modifica sua estrutura, em função de um impedimento físico, pode ser um importante mecanismo de adaptação à compactação do solo.

2.6.2 ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

O solo utilizado no experimento é caracterizado por densidade máxima relativamente baixa (Fig. 2), provavelmente devido à presença de argila e carbono orgânico (Tab. 1). A densidade do solo (ρs) é uma propriedade intimamente vinculada às alterações no volume do solo, e desempenha papel crucial no processo de compactação (Reichert et al., 2007). A densidade do solo compactado, nos níveis médio e alto, superou aquela do solo não compactado, tanto para o solo com as mudas clonais quanto para as seminais, indicando pouco efeito das raízes neste atributo do solo durante o período avaliado. Na Tab. 2, também é possível observar que não houve diferença estatística para densidade entre os tratamentos de compactação média e alta no solo dos vasos com as mudas seminais. Essa similaridade pode ser um fator que explica a ausência de diferenças estatísticas nos atributos da parte aérea dessas mudas. Geist (1989), corroborado por Seixas & Souza (2007), define que valores de ρs acima de 15% e 20% em relação a densidade média inicial do solo, podem ser prejudiciais ao crescimento das plantas. No presente estudo, as variações na compactação média (18% a 25%) e alta (24%) se aproximam ou ultrapassam essa faixa crítica.

O presente estudo demonstrou que a compactação média e alta provocou diferenças significativas na macroporosidade e microporosidade, em comparação com o tratamento sem compactação (Tab. 2). Estes resultados corroboram com a literatura (Silva et al.,1986; Reichert et al., 2007), confirmando que a compactação nos vasos modifica a estrutura do solo, reduzindo o volume de macroporos e aumentando a microporosidade. Todavia, alguns autores afirmam que as raizes tem um efeito mecânico complexo que afetam a estrutura do solo do solo circundante (Lucas et al., 2019; Lucas et al., 2022 & Phalempin et al., 2022; Mueller et al., 2024). Assim, o menor valor encontrado para macroporosidade foi de 0,16 cm^3 cm^{-3} (Tab. 2), possivelmente influenciado pelo crescimento de raízes, mesmo que em pouca quantidade nas camadas compactadas. Phalempin at al. (2021) mostraram que o crescimento de raízes pode resultar no aumento ou diminuição da porosidade do solo nas proximidades, enquanto Kobernick et al. (2017) demostraram que os pelos radiculares neutralizam o feito da compactação do solo, aumentando significativamente a fração do volume de poros na interface raiz-solo.

O volume de macroporos acima de 0,10 cm^3 cm^{-3}, encontrado em nossos resultados, é considerado suficiente para não comprometer o crescimento das raízes por deficiência de oxigênio (Grable & Siemer, 1968; Drewry et al., 2008). Além disso, considerando que as raízes podem ter influenciado a criação de poros, isso contribui na geração de caminhos contínuos para o fluxo de água e ar (Carminati et al., 2009). Neste sentido, pode-se inferir que as raízes não foram submetidas a limitações quanto à aeração do solo. No entanto, é importante ressaltar que, entre os processos que ocorrem nos macroporos, além da infiltração de água e fluxo de ar, o crescimento radicular pode ser afetado (Tormena et al., 1998; Cavenage et al., 1999). Conforme Dexter (1986), a proporção de raízes que penetram nos poros diminui com a redução do diâmetro dos poros. As raízes das culturas tendem a crescer nos macroporos em solos compactados, e o comprimento e o volume das raízes podem aumentar devido à presença de macroporos (Atkinson et al., 2020; Haling et al., 2011; Pfeifer et al., 2014; Xiong at al., 2022). Neste sentido, mesmo com aeração adequada, a compactação pode ter afetado o crescimento radicular ao reduzir o diâmetro dos macroporos e dificultar a penetração das raízes.

A resistência do solo à penetração (RP), foi maior nos níveis de compactação médio e alto (Tab. 2), o que confirmou a presença de camadas compactadas no perfil do solo (Abreu et al., 2004), induzidas na montagem do experimento. A RP é usada como estimativa direta da resistência que o solo oferece ao crescimento das raízes (Letey, 1985). Neste estudo, o valor médio máximo encontrado foi de 1,37 MPa para mudas seminais, e 1,28 MPa nas clonais, ambos na compactação alta, sob condições de capacidade de container (Ψ=-100 hPa). O aumento da RP causou a diminuição do número de raízes da erva-mate, nas mudas clonais e seminais (Fig. 11). Neste sentido, as raízes que cresceram nas camadas compactadas tiveram pouca influência nos valores de RP, já que o número foi reduzido em relação às camadas sem compactação (Fig. 12). Na literatura, valores de RP > 2 MPa são comumente usados como o limite crítico ao crescimento radicular (Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998; Cecagno et al., 2016; Peixoto et al., 2019). Todavia, Bengough & Mullins (1990) afirmam que valores críticos de resistência à penetração dependem da espécie de planta. Enquanto Passioura (2002) afirma que solos com RP superior a 1 MPa inibem o alongamento das raízes de plantas jovens de trigo.

É importante considerar que a umidade do solo no momento da medida de RP estava em uma condição de máxima disponibilidade de água, podendo se elevar

à medida que o solo seca. No solo sob condições mais úmidas, os valores de resistência à penetração tendem a ser mais baixos (Tormena & Roloff, 1996). Segundo Tormena et al. (2002) com a secagem do solo, os valores de resistência podem atingir níveis altamente impeditivos e influenciar diretamente o crescimento radicular. Portanto, em condições de déficit hídrico intenso, a RP pode ser um fator limitante para o crescimento radicular das plantas.

A diminuição da água no solo pode aumentar os efeitos físicos nas raízes, tais como, o impedimento ou a limitação ao crescimento radicular, devido à alta resistência à penetração de raízes, e consequentemente, a redução do volume de solo explorado (Hamza & Anderson, 2005). Provavelmente, a diminuição da irrigação nos últimos meses do experimento pode ter sido o fator de maior impacto na redução do crescimento radicular das mudas seminais e clonais de erva-mate, evidenciado pelo menor número de raízes nas camadas de maior resistência. De forma semelhante, Collares et al. (2006), observaram que as raízes do feijoeiro apresentaram crescimento restringido nas camadas mais compactadas, e a resistência à penetração do solo foi o fator que mais impactou o crescimento radicular, principalmente nas camadas mais densas e nos períodos mais secos.

2.6.3 SISTEMA RADICULAR

Neste estudo, conforme aumentou a resistência do solo à penetração (nível médio e alto), houve diminuição da massa fresca e seca de raízes nas camadas de compactação média e alta (Fig. 10). Este efeito causado pela compactação do solo no crescimento das raízes ocorre em função do aumento da impedância mecânica, relacionada à redução do espaço poroso do solo, e isso restringe o alongamento das raízes (Czarnes et al., 1999; Dexter & Hewitt, 1978; Whiteley et al., 1982). Conforme apresentado neste estudo, o aumento da resistência do solo torna mais difícil para as raízes penetrarem e acessarem os recursos do solo em camadas mais profundas (Yu et al., 2023). Passioura (2002) descreve que as taxas de crescimento radicular são severamente reduzidas pela resistência do solo, com uma diminuição gradual no crescimento radicular a partir de 1 MPa, até uma eliminação quase completa do crescimento radicular ocorrendo em resistências do solo superiores a 5 MPa. No entanto, o impacto da compactação varia dentro e entre espécies devido a diferenças

na capacidade de penetração das raízes (Bur-Hersey et al., 2017; Colombi & Walter, 2017; Helliwell et al., 2019; Orzech et al., 2021).

A compactação do solo nos níveis médio e alto diminuiu a densidade e porcentagem de raízes (Fig 11). Estudos já comprovaram que os níveis de alongamento das raízes são reduzidos de forma significativa, mesmo que a resistência à penetração do solo seja apenas aumentada de forma moderada (Bengough et al., 2011; Lipiec et al., 2012; Valentine et al., 2012; Colombi et al., 2017). A redução das taxas de alongamento das raízes, o crescimento radicular mais raso, raízes mais espessas e a diminuição do número de raízes reduzem o volume de solo que pode ser explorado pelas plantas. Em ambientes com umidade limitada, o alongamento vertical da raiz e o subsequente acesso à umidade do subsolo podem ser críticos para a sobrevivência das plantas (Manschadi et al. 2006; Botwright Acuña et al. 2007; Blum 2009). Assim, o crescimento e o desempenho das culturas podem diminuir drasticamente, como resultado desta limitação das plantas em explorar os recursos derivados do solo (Colombi et al., 2018).

Conforme observado na Fig. 12, nos vasos de compactação média e alta proliferaram-se as raízes laterais, formando um sistema radicular denso e raso na camada superior dos vasos. Quando a compactação diminui o tamanho dos poros e impede a passagem da raiz principal, a planta promove a expansão de raízes laterais com diâmetros adequados para passar pelos poros (Drescher et al., 2023). Ademais, quando o impedimento mecânico é imposto para a raiz principal e para as raízes laterais, todo o sistema radicular pode se tornar menor. Além disso, o custo energético necessário para o alongamento da raiz aumenta com o aumento da resistência à penetração (Colombi & Keller, 2019), além da redução da taxa de divisão e elongação celular (Bengough & Mullins, 1990; Bengough et al. 2006).

Como pode ser observado nas imagens (Fig. 12), as mudas clonais apresentaram maior restrição ao entrar em contato com o obstáculo (camada compactada) quando comparado com as mudas seminais. Semelhante ao encontrado por Colombi et al. (2023), nosso estudo sugere que as estratégias para lidar com os obstáculos no solo diferem entre genótipos da mesma espécie. De acordo com Wendling (2004), o sistema radicular das mudas de erva-mate propagadas vegetativamente é diferente das mudas propagadas por sementes, sendo na maioria das vezes mais frágil, superficial e com ausência de raiz pivotante. Após tomar a forma de pivotante, mais de 80% das raízes de erva-mate ficam na camada de 0 a 20 cm e,

por isso, não se desenvolvem adequadamente em solos compactados, pedregosos ou encharcados (Medrado et al., 2000).

Nessas condições, a redução do crescimento radicular limita a capacidade de adquirir água e nutrientes essenciais para o desenvolvimento adequado das plantas (Atwell, 1990; Yu et al., 2023), o que pode afetar diretamente sua produtividade. Isto ocorre, pois, a tolerância à seca, eficiência na germinação e/ou brotação, crescimento adequado, movimentação de maquinário na área, absorção de nutrientes, resistência ao ataque de pragas e parasitas no solo, são fatores afetados pelo sistema radicular. Quanto mais espaço o sistema radicular ocupar, maior será a capacidade de explorar o solo e aproveitar a disponibilidade de nutrientes, água e oxigênio, resultando em maior produtividade para as culturas (De Conti et al., 2002; Bengough et al., 2011). Portanto, este efeito mais expressivo da compactação do solo, observado no sistema radicular das mudas clonais, explica o efeito observado de menor crescimento da parte aérea em comparação com as mudas seminais.

Embora não tenha sido constatada diferença estatística, a média de densidade e porcentagem de raízes foi maior na camada superior dos vasos no tratamento de compactação alta (Fig. 11). Neste estudo, as raízes que encontraram impedimentos, tiveram, como consequência, aumento do enraizamento superficial e redução do enraizamento nas camadas compactadas. A erva-mate é uma planta perene, e as plantas perenes dependem, para a sua sobrevivência, do estabelecimento de um sistema radicular profundo, para acessar a água e nutrientes do subsolo (Haling et al., 2010). Nesse contexto, a limitação do crescimento radicular em camadas mais profundas pode comprometer o estabelecimento da erva-mate no campo, sobretudo em condições adversas, como períodos de seca.

O teor de água do solo é frequentemente utilizado como indicador de disponibilidade hídrica para as plantas, principalmente em áreas irrigadas (Nolz et al., 2016). No entanto, a maioria dos estudos não considera que, dependendo do tipo de planta e seu estágio de crescimento, uma limitação física possa ser alcançada pelas raízes antes que ocorra o estresse hídrico (Souza et al., 2021). Nos 70 últimos dias do experimento a irrigação das mudas foi diminuída gradativamente, o que pode ter influenciado nos resultados das plantas submetidas à compactação média e à alta, que tiveram redução da densidade radicular. Apesar de não ficarem expostas a déficit hídrico, que pode limitar o crescimento das raízes devido às baixas taxas fotossintéticas (Burdett, 1990), a redução da umidade do solo maximiza a RP,

afetando diretamente o crescimento e desenvolvimento radicular nas camadas compactadas.

Na América do Sul, simulações de mudanças climáticas para as próximas décadas indicam aumento de temperatura e mudanças significativas na distribuição e intensidade da precipitação em diferentes cenários, moldando eventos futuros de enchentes e secas (Chou et al., 2014). Assim, um sistema radicular mal desenvolvido, devido à compactação, na erva-mate pode acarretar em grandes prejuízos. A criação de uma estrutura de solo ideal para o crescimento das culturas é, portanto, um objetivo importante do manejo dos solos (Tian et al., 2022), a fim de manter a qualidade física do solo adequada para o estabelecimento e sustentabilidade do erval.

2.7 CONCLUSÕES

A confirmação da hipótese inicial sobre os efeitos prejudiciais da compactação do solo no crescimento inicial da erva-mate destaca-se como resultado central deste estudo.

O sistema radicular das mudas, tanto clonais quanto seminais, foi afetado nos níveis de compactação média e alta, com redução da densidade de raízes, porcentagem de raízes, massa fresca e seca de raízes, em comparação com o nível sem compactação. A parte aérea, especialmente nas mudas clonais da cultivar BRS BLD Yari, foi mais influenciada pela compactação do solo, com redução no número de ramos, massa fresca e massa seca da parte aérea. As mudas seminais mantiveram atributos mais estáveis ao longo do período estudado.

2.8 REFERÊNCIAS

Abreu, S. L., Reichert, J. M., & Reinert, D. J. (2004). Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *28*, 519-531.

Aguiar, N. S. D., Gabira, M. M., Santin, D., Deschamps, C., Helm, C. V., & Wendling, I. (2023). Planting seasons and environments in initial field establishment of yerba mate clonal cultivars in Southern Brazil. *Revista Ceres*, *70*, e70606.

Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. D. M., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische zeitschrift*, *22*(6), 711-728.

Antoniazzi, M. S., Rocha, L. D., Souza, E. L., Guerra, D., Da Silva, D. M., & Redin, M. (2018). Análise da cultura da erva-mate como alternativa social, econômica e ambiental para comunidades rurais. *Extensão em Foco*, *1*(15).

Atkinson, B. S., Sparkes, D. L., & Mooney, S. J. (2009). The impact of soil structure on the establishment of winter wheat (Triticum aestivum). *European Journal of Agronomy*, *30*(4), 243-257.

Atwell, B. J. (1990). The effect of soil compaction on wheat during early tillering: I. Growth, development and root structure. *New Phytologist*, *115*(1), 29-35.

Bejarano, M. D., Villar, R., Murillo, A. M., & Quero, J. L. (2010). Effects of soil compaction and light on growth of Quercus pyrenaica Willd. (Fagaceae) seedlings. *Soil and Tillage Research*, *110*(1), 108-114.

Bengough, A. G., McKenzie, B. M., Hallett, P. D., & Valentine, T. A. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of experimental botany*, *62*(1), 59-68.

Bengough, A. G., & Mullins, C. E. (1990). Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *Journal of soil science*, *41*(3), 341-358.

Bhering, S. B., Dos Santos, H. G., Manzatto, C. V., Bognola, I. A., Fasolo, P. J., de Carvalho, A. P., ... & Curcio, G. R. (2007). Mapa de solos do estado do Paraná.

Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Particle density. *Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods*, *5*, 377-382.

Blum, A. (2009). Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field crops research*, *112*(2-3), 119-123.

Borges, R., Boff, M. I. C., Mantovani, A., & Radomski, M. I. (2019). Effect of cover on the development and production of secondary compounds of Maytenus ilicifolia and Ilex paraguariensis in agroforestry systems. *Ciência Florestal*, *29*, 1630-1643.

Botwright Acuña, T. L., Pasuquin, E., & Wade, L. J. (2007). Genotypic differences in root penetration ability of wheat through thin wax layers in contrasting water regimes and in the field. *Plant and Soil*, *301*, 135-149.

Burdett, A. N. (1990). Physiological processes in plantation establishment and the development of specifications for forest planting stock. *Canadian Journal of Forest Research*, *20*(4), 415-427.

Burr-Hersey, J. E., Mooney, S. J., Bengough, A. G., Mairhofer, S., & Ritz, K. (2017). Developmental morphology of cover crop species exhibit contrasting behaviour to changes in soil bulk density, revealed by X-ray computed tomography. *PLoS One*, *12*(7), e0181872.

Cambi, M., Certini, G., Neri, F., & Marchi, E. (2015). The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest ecology and management*, *338*, 124-138.

Carminati, A., Vetterlein, D., Weller, U., Vogel, H. J., & Oswald, S. E. (2009). When roots lose contact. *Vadose Zone Journal*, *8*(3), 805-809.

Cecagno, D., de Andrade, S. E. V. G., Anghinoni, I., Kunrath, T. R., Martins, A. P., Reichert, J. M., ... & de Faccio Carvalho, P. C. (2016). Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. *Soil and Tillage Research*, *156*, 54-62.

Chou, S. C., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Gomes, J., ... & Marengo, J. (2014). Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. *American Journal of Climate Change*, *3*(05), 512.

Collares, G. L., Reinert, D. J., Reichert, J. M., & Kaiser, D. R. (2006). Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, *41*, 1663-1674.

Colombi, T., & Keller, T. (2019). Developing strategies to recover crop productivity after soil compaction—A plant eco-physiological perspective. *Soil and Tillage Research*, *191*, 156-161.

Colombi, T., Kirchgessner, N., Walter, A., & Keller, T. (2017). Root tip shape governs root elongation rate under increased soil strength. *Plant Physiology*, *174*(4), 2289-2301.

Colombi, T., Torres, L. C., Walter, A., & Keller, T. (2018). Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth–A vicious circle. *Science of the Total Environment*, *626*, 1026-1035.

Colombi, T., & Walter, A. (2017). Genetic diversity under soil compaction in wheat: root number as a promising trait for early plant vigor. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 420.

Correa, J., Postma, J. A., & Wojciechowski, T. (2022). Phenotypic response to soil compaction varies among genotypes and correlates with plant size in sorghum. *Plant and Soil*, 1-18.

Czarnes, S., Hiller, S., Dexter, A. R., Hallett, P. D., & Bartoli, F. (1999). Root: soil adhesion in the maize rhizosphere: the rheological approach. *Plant and Soil*, *211*, 69-86.

Dannowski, M. (1992). Das Penetrationsvermögen von Wurzeln unterschiedlicher Roggen-und Triticalegenotypen in Abhangigkeit von der Bodenlagerungsdichte. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *168*(3), 169-180.

De Conti Medina, C., Neves, C. S. V. J., de Batista Fonseca, I. C., & Torreti, A. F. (2002). Crescimento radicular e produtividade de cana-de-açúcar em função de doses de vinhaça em fertirrigação. *Semina: Ciências Agrárias*, *23*(2), 179-184.

Dexter, A. R., & Hewitt, J. S. (1978). The deflection of plant roots. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *23*(1), 17-22.

Dexter, A. R. (1986). Model experiments on the behaviour of roots at the interface between a tilled seed-bed and a compacted sub-soil: I. Effects of seed-bed aggregate size and sub-soil strength on wheat roots. *Plant and soil*, *95*, 123-133.

Dörner, J., Bravo, S., Stoorvogel, M., Dec, D., Valle, S., Clunes, J., ... & Zúñiga, F. (2022). Short-term effects of compaction on soil mechanical properties and pore functions of an Andisol. *Soil and Tillage Research*, *221*, 105396.

Drescher, M. S., Kaiser, D. R., Lima, C. L. R., Braida, J. A. (2023). Compactação do solo. In J. A. Albuquerque & P. I. Gubiani (Ed.), Física do Solo (344 p.). Santa Maria, RS: Pallotti.

Drewry, J. J., Cameron, K. C., & Buchan, G. D. (2008). Pasture yield and soil physical property responses to soil compaction from treading and grazing—a review. *Soil Research*, *46*(3), 237-256.

Figueiredo, G. C., Silva, A. P. D., Tormena, C. A., Giarola, N. F. B., Moraes, S. O., & Almeida, B. G. D. (2011). Desenvolvimento de um consolidômetro pneumático: modelagem da compactação, penetrometria e resistência tênsil de agregados de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *35*, 389-402.

Gee, G. W., & Or, D. (2002). 2.4 Particle-size analysis. *Methods of soil analysis: Part 4 physical methods*, *5*, 255-293.

Geist, J. M., Hazard, J. W., & Seidel, K. W. (1989). Assessing physical conditions of some Pacific Northwest volcanic ash soils after forest harvest. *Soil Science Society of America Journal*, *53*(3), 946-950.

Gómez-Aparicio, L., Pérez-Ramos, I. M., Mendoza, I., Matias, L., Quero, J. L., Castro, J., ... & Maranon, T. (2008). Oak seedling survival and growth along resource gradients

in Mediterranean forests: implications for regeneration in current and future environmental scenarios. *Oikos*, *117*(11), 1683-1699.

Goulart, I. C. G. D. R., Santin, D., & Brasileiro, B. P. (2022). Fatores que afetam a produtividade na cultura da erva-mate. *Ciência Florestal*, *32*, 1345-1367.

Haling, R. E., Simpson, R. J., Culvenor, R. A., Lambers, H., & Richardson, A. E. (2011). Effect of soil acidity, soil strength and macropores on root growth and morphology of perennial grass species differing in acid-soil resistance. *Plant, Cell & Environment*, *34*(3), 444-456.

Hamza, M. A., & Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and tillage research*, *82*(2), 121-145.

Heck, C. I., & De Mejia, E. G. (2007). Yerba Mate Tea (Ilex paraguariensis): a comprehensive review on chemistry, health implications, and technological considerations. *Journal of food science*, *72*(9), R138-R151.

Helliwell, J. R., Sturrock, C. J., Miller, A. J., Whalley, W. R., & Mooney, S. J. (2019). The role of plant species and soil condition in the structural development of the rhizosphere. *Plant, cell & environment*, *42*(6), 1974-1986.

Horn, R., Vossbrink, J., Peth, S., & Becker, S. (2007). Impact of modern forest vehicles on soil physical properties. *Forest ecology and management*, *248*(1-2), 56-63.

Iijima, M. (1993). Effects of soil compaction on the yield response of four cereal species. *Crop Production and Improvement Technology in Asia*.

Iijima, M., & Kono, Y. (1991). Interspecific differences of the root system structures of four cereal species as affected by soil compaction. *Japanese Journal of Crop Science*, *60*(1), 130-145.

Iijima, M., Kono, Y., Yamauchi, A., & Pardales Jr, J. R. (1991). Effects of soil compaction on the development of rice and maize root systems. *Environmental and Experimental Botany*, *31*(3), 333-342.

Jamshidi, R., Jaeger, D., & Dragovich, D. (2018). Establishment of pioneer seedling species on compacted skid tracks in a temperate Hyrcanian forest, northern Iran. *Environmental earth sciences*, *77*, 1-13.

Jourgholami, M. (2018). Effects of soil compaction on growth variables in Cappadocian maple (Acer cappadocicum) seedlings. *Journal of forestry research*, *29*, 601-610.

Koebernick, N., Daly, K. R., Keyes, S. D., George, T. S., Brown, L. K., Raffan, A., ... & Roose, T. (2017). High-resolution synchrotron imaging shows that root hairs influence rhizosphere soil structure formation. *New Phytologist*, *216*(1), 124-135.

Krejci, L. C., Martins, L. G. C., & Lourenço, P. Y. (1986). Desenvolvimento do sistema radicular de Eucalyptus sp sob diferentes condições de solo. *Salvador: COPENER*.

Kunz, M., Gonçalves, A. D. M. D. A., Reichert, J. M., Guimarães, R. M. L., Reinert, D. J., & Rodrigues, M. F. (2013). Compactação do solo na integração soja-pecuária de leite em Latossolo argiloso com semeadura direta e escarificação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *37*, 1699-1708.

Letey, J. O. H. N. (1985). Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci*, *1*, 277-294.

Liang, J., Zhang, J., Chan, G., & Wong, M. H. (1999). Can differences in root responses to soil drying and compaction explain differences in performance of trees growing on landfill sites?. *Tree physiology*, *19*(9), 619-624.

Lipiec, J., Horn, R., Pietrusiewicz, J., & Siczek, A. (2012). Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. *Soil and Tillage Research*, *121*, 74-81.

Lucas, M. (2022). Perspectives from the Fritz-Scheffer Awardee 2020—The mutual interactions between roots and soil structure and how these affect rhizosphere processes#. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *185*(1), 8-18.

Lucas, M., Schlüter, S., Vogel, H. J., & Vetterlein, D. (2019). Roots compact the surrounding soil depending on the structures they encounter. *Scientific reports*, *9*(1), 16236.

Manschadi, A. M., Christopher, J., deVoil, P., & Hammer, G. L. (2006). The role of root architectural traits in adaptation of wheat to water-limited environments. *Functional plant biology*, *33*(9), 823-837.

Marques, A. D. C., Reis, M. S. D., & Denardin, V. F. (2019). As paisagens da erva-mate: uso das florestas e conservação socioambiental. *Ambiente & Sociedade*, *22*.

Medrado, M. J. S., Lourenço, R. S., Rodigheri, H. R., Dedecek, R. A., Philipovsky, J. F., & Correa, G. (2000). Implantação de ervais.

Mueller, C. W., Baumert, V., Carminati, A., Germon, A., Holz, M., Kögel-Knabner, I., ... & Vidal, A. (2024). From rhizosphere to detritusphere–Soil structure formation driven by plant roots and the interactions with soil biota. *Soil Biology and Biochemistry*, 109396.

Munns, E. N. (1947). Forest Management on Municipal Water Source Areas. *Journal of Forestry*, *45*(5), 315-322.

Nolz, R., Cepuder, P., Balas, J., & Loiskandl, W. (2016). Soil water monitoring in a vineyard and assessment of unsaturated hydraulic parameters as thresholds for irrigation management. *Agricultural Water Management*, *164*, 235-242.

Oliveira, J. E. D., & Esselin, P. M. (2019). Uma etno-história da erva-mate e dos povos indígenas de língua guarani na região Platina: da Província do Guairá ao Antigo Sul de Mato Grosso. *Fronteiras e interculturalidade. 1º edição. Tubarão, SC: Copiart*.

Orzech, K., Wanic, M., & Załuski, D. (2021). The effects of soil compaction and different tillage systems on the bulk density and moisture content of soil and the yields of winter oilseed rape and cereals. *Agriculture*, *11*(7), 666.

Otto, R., Silva, A. D., Franco, H. C. J., Oliveira, E. D., & Trivelin, P. C. O. (2011). High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. *Soil and tillage research*, *117*, 201-210. Reitz, R., Klein, R. M., & Reis, A. (1983). Projeto madeira do rio grande do sul. *Sellowia.*

Page-Dumroese, D. S., Jurgensen, M., & Terry, T. (2010). Maintaining soil productivity during forest or biomass-to-energy thinning harvests in the western United States. *Western Journal of Applied Forestry*, *25*(1), 5-11.

Passioura, J. B. (2002). Soil conditions and plant growth. *Plant, Cell & Environment*, *25*(2), 311-318.

Peixoto, D. S., Silva, B. M., de Oliveira, G. C., Moreira, S. G., da Silva, F., & Curi, N. (2019). A soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under continuous no tillage system in Brazil. *Soil and Tillage Research*, *194*, 104307.

Pfeifer, J., Kirchgessner, N., & Walter, A. (2014). Artificial pores attract barley roots and can reduce artifacts of pot experiments. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *177*(6), 903-913.

Phalempin, M., Landl, M., Wu, G. M., Schnepf, A., Vetterlein, D., & Schlüter, S. (2022). Maize root-induced biopores do not influence root growth of subsequently grown maize plants in well aerated, fertilized and repacked soil columns. *Soil and Tillage Research*, *221*, 105398.

Phalempin, M., Lippold, E., Vetterlein, D., & Schlüter, S. (2021). Soil texture and structure heterogeneity predominantly governs bulk density gradients around roots. *Vadose Zone Journal*, *20*(5), e20147.

Quero, J. L., Gómez-Aparicio, L., Zamora, R., & Maestre, F. T. (2008). Shifts in the regeneration niche of an endangered tree (Acer opalus ssp. granatense) during ontogeny: using an ecological concept for application. *Basic and Applied Ecology*, *9*(6), 635-644.

Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., & Vogel, H. J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, *314*, 122-137.

Ramos, I. P. (2007). Factores que condicionan la regeneración natural de especies leñosas en un bosque mediterráneo del sur de la Península Ibérica. *Ecosistemas*, *16*(2).

Ramos, M. F., da Silva Almeida, W. R., do Amaral, R. D. L., & Suzuki, L. E. A. S. (2022). Degree of compactness and soil quality of peach orchards with different production ages. *Soil and Tillage Research*, *219*, 105324.

Reichert, J. M., Morales, B., Lima, E. M., de Bastos, F., Morales, C. A. S., & de Araújo, E. F. (2023). Soil morphological, physical and chemical properties affecting Eucalyptus spp. productivity on Entisols and Ultisols. *Soil and Tillage Research*, *226*, 105563.

Reichert, J. M., Suzuki, L. E. A. S., & Reinert, D. J. (2007). Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. *Tópicos em ciência do solo*, *5*, 49-134.

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*, 571-579.

Santos, R. D., Santos, H. G., Ker, J. C., Anjos, L. H. C., & Shimizu, S. H. (2015). Field Description and Soil Collect Manual. Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo.

Seixas, F., & Souza, C. R. D. (2007). Avaliação e efeito da compactação do solo, devido à freqüência de tráfego, na produção de madeira de eucalipto. *Revista Árvore*, *31*, 1047-1052.

Silva, A. P., Kay, B. D., & Perfect, E. (1994). Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Science Society of America Journal*, *58*, 1775-81.

Silva, A. P., Libardi, P. L., & Camargo, O. A. (1986). Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *10*(2), 91-5.

Silva, F. R. D., Albuquerque, J. A., & Costa, A. D. (2014). Crescimento inicial da cultura da soja em Latossolo Bruno com diferentes graus de compactação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *38*, 1731-1739.

Souza, R., Hartzell, S., Ferraz, A. P. F., de Almeida, A. Q., de Sousa Lima, J. R., Antonino, A. C. D., & de Souza, E. S. (2021). Dynamics of soil penetration resistance in water-controlled environments. *Soil and Tillage Research*, *205*, 104768.

Steinbrenner, E. C., & Gessel, S. P. (1955). The effect of tractor logging on physical properties of some forest soils in southwestern Washington. *Soil Science Society of America Journal*, *19*(3), 372-376.

Sturion, J. A., Stuepp, C. A., & Wendling, I. (2017). Genetic parameters estimates and visual selection for leaves production in Ilex paraguariensis. *Bragantia*, *76*, 492-500.

Tian, M., Qin, S., Whalley, W. R., Zhou, H., Ren, T., & Gao, W. (2022). Changes of soil structure under different tillage management assessed by bulk density, penetrometer resistance, water retention curve, least limiting water range and X-ray computed tomography. *Soil and Tillage Research*, *221*, 105420.

Tormena, C. A., Barbosa, M. C., Costa, A. C. S. D., & Gonçalves, A. C. A. (2002). Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. *Scientia agrícola*, *59*, 795-801.

Tormena, C. A., Roloff, G., & Sá, J. C. M. (1998). Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *22*, 301-309.

Tormena, C. A., Silva, A. D., & Libardi, P. L. (1998). Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, *22*, 573-581.

Valentine, T. A., Hallett, P. D., Binnie, K., Young, M. W., Squire, G. R., Hawes, C., & Bengough, A. G. (2012). Soil strength and macropore volume limit root elongation rates in many UK agricultural soils. *Annals of botany*, *110*(2), 259-270.

Veihmeyer, F. J., & Hendrickson, A. H. (1949). Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils. *Soil science*, *68*(1), 75-94.

Wendling, I. (2004). Propagação vegetativa de erva-mate (Ilex paraguariensis Saint Hilaire): estado da arte e tendências futuras.

Wendling, I., Santarosa, E., Penteado Junior, J., Auer, C. G., Penteado, S., De Queiroz, D. L., & Dos Santos, A. F. (2020). Manual de produção de mudas clonais de erva-mate.

Wendling, I., & Santin, D. (2015). Propagação e nutrição de erva-mate. *Brasília: Embrapa*.

Wendling, I., Sturion, J. A., Reis, C. A. F., Stuepp, C. A., & Peña, M. L. P. (2016). Indirect and expedite assessment of Ilex paraguariensis commercial yield. *Cerne*, *22*, 241-248.

Wendling, I., Sturion, J. A., & Santin, D. (2017). BRS 408 e BRS 409: cultivares clonais de erva-mate para produção de massa foliar.

Whiteley, G. M., Hewitt, J. S., & Dexter, A. R. (1982). The buckling of plant roots. *Physiologia Plantarum*, *54*(3), 333-342.

Xiong, P., Zhang, Z., Guo, Z., & Peng, X. (2022). Macropores in a compacted soil impact maize growth at the seedling stage: Effects of pore diameter and density. *Soil and Tillage Research*, *220*, 105370.

Yu, C., Mawodza, T., Atkinson, B. S., Atkinson, J. A., Sturrock, C. J., Whalley, R., ... & Mooney, S. J. (2023). The effects of soil compaction on wheat seedling root growth are specific to soil texture and soil moisture status. *Rhizosphere*, 100838.

3 CAPÍTULO II: EFEITOS DA COMPACTAÇÃO DO SOLO NO CRESCIMENTO DE MUDAS DE *Eucalyptus benthamii*

3.1 RESUMO

Nas últimas décadas, o aumento expressivo do uso de máquinas pesadas no manejo florestal tem ocasionado a compactação dos solos florestais, podendo impactar a sobrevivência e o estabelecimento de mudas. Este estudo teve como propósito investigar os efeitos da compactação do solo no crescimento de mudas seminais de *Eucalyptus benthamii*, uma espécie florestal empregada no Sul do Brasil devido à sua tolerância a geadas. O experimento, conduzido em casa de vegetação, simulou três níveis de compactação do solo na camada inferior de cada vaso, estabelecidos com base na densidade máxima obtida pelo ensaio de Proctor: alta, média e sem compactação. As mudas com 35 cm de altura e 2 mm de diâmetro do colo (aproximadamente) foram plantadas na parte superior dos vasos, e avaliações quinzenais da altura e diâmetro foram realizadas até a abertura destes aos 135 dias após o plantio. Os parâmetros avaliados englobaram altura, diâmetro, massa fresca e seca da parte aérea e radicular, densidade e porcentagem de raízes. A resistência do solo à penetração (RP) foi medida com um penetrômetro eletrônico de campo. Não foram observadas variações nos atributos da parte aérea ao longo do estudo. A RP, entretanto, variou entre os níveis de compactação na parte inferior dos vasos, com valores mais elevados em níveis médios e altos de compactação. Resultados mais expressivos foram identificados nas raízes, evidenciando uma redução significativa na massa fresca e seca, densidade e porcentagem de raízes nas camadas de compactação média e alta. Essas descobertas ressaltam a importância de considerar os impactos da compactação do solo no crescimento radicular das mudas, fornecendo informações relevantes para práticas de manejo florestal sustentáveis.

Palavras-chave: Manejo do Solo. Manejo Florestal. Raízes. Resistência à Penetração.

3.2 ABSTRACT

In recent decades, the significant increase in the use of heavy machinery in forest management has led to soil compaction in forested areas, which can impact the survival and establishment of seedlings. This study aimed to investigate the effects of soil compaction on the growth of seedling of *Eucalyptus benthamii*, a forest species commonly employed in the South of Brazil due to its frost tolerance. The experiment, conducted in a greenhouse, simulated three levels of soil compaction in the lower layer of each pot, established based on the maximum density obtained from the Proctor test: high, medium, and non-compacted. Seedlings with 35 cm in height and 2 mm in stem diameter (approximately) were planted in the upper part of the pots, and biweekly evaluations of height and diameter were conducted until the pots were opened at 135 days after planting. Evaluated parameters included height, diameter, fresh and dry mass of aboveground and root parts, density, and percentage of roots. Soil penetration resistance (PR) was measured using a field electronic penetrometer. No variations were observed in aboveground attributes throughout the study. PR, however, varied between compaction levels in the lower part of the pots, with higher values at medium and high compaction levels. More significant results were identified in the roots, showing a significant reduction in fresh and dry mass, density, and root percentage in the layers of medium and high compaction. These findings highlight the importance of

considering the impacts of soil compaction on root growth of seedlings, providing relevant information for sustainable forest management practices.

Keywords: Soil Management. Forest Management. Roots. Soil Penetration Resistance.

3.3 INTRODUÇÃO

O eucalipto se destaca na silvicultura por ser uma das árvores mais plantadas ao redor do mundo, devido à sua adaptabilidade edafoclimática, qualidade da madeira e rápido crescimento em comparação com outras espécies usadas na indústria madeireira (Myburg et al., 2007). Além disso, a espécie está entre as principais fontes de biomassa de madeira para celulose e bioenergia e são considerados matérias-primas promissoras para a produção de biocombustíveis de segunda geração (Oberschelp et al., 2022).

As plantações florestais representam uma alternativa promissora para combater o desmatamento de florestas e mitigar os efeitos das mudanças climáticas (Reichert et al., 2023). No Brasil, as espécies de eucalipto representam a cultura florestal com a maior área cultivada, sendo geralmente cultivadas em ciclos curtos de corte que variam de 7 a 9 anos (Stape et al., 2010). A finalidade é atender as demandas das indústrias de celulose, papel, celulose nanofibrilar, nanocelulose cristalina, lenha e serrarias (Milanez et al., 2013; Simioni et al., 2018).

No Brasil, uma ampla variedade de materiais genéticos de espécies e híbridos de eucalipto está disponível, como resultado do melhoramento genético (Gonçalves et al., 2013). O *Eucalyptus benthamii*, uma espécie utilizada em plantações operacionais na América do Sul para a produção de madeira destinada à celulose e bioenergia (Arnold et al., 2015; Frigotto et al., 2020; Resquin et al., 2020), tem sido objeto de pesquisa devido à sua maior capacidade de tolerar geadas. No entanto, ainda não foram realizados estudos sobre a tolerância da espécie a restrições físicas do solo, como a compactação.

Além disso, apesar da produtividade satisfatória, as causas da grande variabilidade temporal e espacial na produtividade do eucalipto ainda não estão bem definidas (Elli et al., 2019). A demanda do mercado e a diminuição de mão de obra, ocasionaram o aumento da mecanização nas áreas florestais desde 1990 (Jesus et

al., 2015). Assim, como consequência do tráfego de máquinas pesadas, ocorrem alterações nos atributos físicos do solo (Silva et al., 2007).

O ambiente físico do solo apresenta relevância entre os fatores que mais influenciam a produtividade florestal, pois pode ser prejudicial ou benéfico para as espécies florestais (Blouin et al., 2008; Christina et al., 2018; Cavalli et al., 2020). A intensificação florestal com o uso de máquinas pesadas para o preparo do solo (Assis et al., 2015; Abrão et al., 2017; Poltorak et al., 2018) ou atividades de colheita (Reichert et al., 2014, Reichert et al., 2016; Jesus et al., 2015; Jourgholami et al., 2018) causam a degradação da estrutura do solo devido à compactação (Blouin et al., 2008; Suzuki et al., 2012, Suzuki et al., 2014, Suzuki et al., 2015; Sampietro et al., 2015; Fernández et al., 2019). Os efeitos da compactação do solo podem permanecer por décadas, variando de acordo com a textura do solo, as condições ambientais e o uso do solo (Holthusen et al., 2018a, Holthusen et al., 2018b; Mohieddinne et al., 2019).

A água, a aeração, a temperatura e a resistência mecânica do solo afetam diretamente o crescimento das plantas (Letey, 1985). Vários estudos destacaram a importância da avaliação das propriedades do solo para determinar a capacidade produtiva dos locais, abordando fatores edáficos em geral ou propriedades físico-hidráulicas influenciadas pela granulometria e manejo do solo (Prevedello et al., 2013; Suzuki et al., 2014). Um determinado parâmetro de qualidade do solo é influenciado por uma ou mais propriedades distintas (Arshad & Martin, 2002).

Valores elevados de densidade do solo e resistência mecânica são de grande importância para a produtividade do eucalipto devido à sua relação com a mobilidade de água e gases, bem como sua influência no desenvolvimento do sistema radicular (Laclau et al., 2001; Whalley et al., 2007). No Brasil, as florestas comerciais de eucalipto têm sido estabelecidas em diferentes tipos de solo, mas solos com maior disponibilidade hídrica tendem a caracterizar áreas de maior produtividade, enquanto solos com baixa disponibilidade hídrica apresentam menor produtividade, mesmo com o aumento da aplicação de fertilizantes (Stape et al., 2010; Da Silva et al., 2013).

A profundidade efetiva de enraizamento, a camada na qual as raízes enfrentam poucas restrições físicas, é reduzida sempre que a compactação do solo, um perfil raso do solo ou a drenagem deficiente restringem o crescimento das raízes (Reichert et al., 2021). A compactação do solo pode prejudicar o crescimento das plantas (Kondo & Dias Júnior, 1999; Imhoff et al., 2004; Reichert et al., 2007; De Marins et al., 2018), principalmente quando o aumento do grau de compactação é acompanhado

de descontinuidades no sistema de poros do solo, causado pelo tráfego de máquinas em condições críticas de umidade do solo (Da Veiga et al., 2007; Suzuki et al., 2008).

Em ambientes agrícolas, várias práticas de preparo do solo para reduzir a compactação são amplamente conhecidas (Reichert et al., 2009a, Reichert et al., 2009b; Kuhwald et al., 2016, Kuhwald et al., 2020; Selvi et al., 2017; Reichert et al., 2017, Reichert et al., 2018; Alesso et al., 2019; Peixoto et al., 2019). No entanto, para ambientes florestais, ainda existe uma lacuna de conhecimento na otimização das práticas de cultivo, uma vez que as condições e a dinâmica do processo dependem do pedoambiente (França et al., 2021).

Estudos recentes têm empregado técnicas de amostragem e análise espacial para avaliar a compactação do solo, com foco na resistência mecânica à penetração (RP). A RP é de fácil e rápida determinação (Reichert et al., 2016) e indica a dificuldade para o crescimento das raízes (Blouin et al., 2008; Fernandes et al., 2020), tornando-a adequada para estudos espaciais em diversas escalas (Aksakal et al., 2019). Assim, o entendimento do comportamento do solo em áreas de reflorestamento é crucial para a melhoria de suas propriedades e para garantir o crescimento adequado da floresta sem comprometer a conservação do solo (França et al., 2021).

Neste sentido, o presente trabalho parte da hipótese de que a compactação do solo exerce um impacto negativo no crescimento inicial de mudas de *Eucalyptus benthamii*. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar o crescimento inicial de mudas de *E. benthamii* em diferentes níveis de compactação do solo.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 CARACTERÍSTICAS DO SOLO

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, no Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, localizada em Curitiba – PR, entre a longitude de 49° 14' 54" Oeste e a latitude de 25° 24' 47" Sul. A altitude da região onde foi conduzido o experimento é de aproximadamente 910 m do nível do mar.

A área geográfica em que o solo foi coletado, fica na Fazenda Experimental do Canguiri, entre a longitude de 49° 08' Oeste e a latitude de 25° 23' Sul, pertencente à Universidade Federal do Paraná (UFPR), município de Pinhais-PR. A região possui clima do tipo Cfb, temperado úmido, segundo Köppen, com precipitação média anual

de 1.400 mm, temperatura média de 23 °C no mês mais quente e 12 °C no mês mais frio (Alvares et al., 2013)

Foi coletado solo na camada de 0-0,20 m de uma área classificada como Cambissolo Háplico Distrófico Tb típico. As características físico-químicas do solo do experimento estão apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO SOLO UTILIZADO NO EXPERIMENTO

pH	P	K	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al	H+Al	CTC	V	Argila	Silte	Areia	ρ_p
$CaCl_2$	mg dm^{-3}	----------cmol$_c$ dm^{-3}----------						%	----------g kg^{-1}----------			g cm^{-3}
4,84	4,5	0,07	4,6	2,42	0,35	7,2	14,29	49,62	425	188	388	2,89

LEGENDA: P = fósforo disponível – Mehlich 1; K = potássio; Ca^{2+} = cálcio; Mg^{2+} = magnésio; Al = alumínio; H+Al = acidez potencial; CTC = capacidade de troca catiônica; V = saturação por bases e ρ_p = densidade de partículas.

Parte do solo foi destinado às análises de caracterização do mesmo. Foram realizadas análises físicas, tais como densidade de partículas e granulometria. Para determinar a densidade de partículas, utilizou-se o método do balão volumétrico, calculada a partir da massa e volume do solo (Blake & Hartge, 1986). A análise textural foi realizada usando o método do densímetro, que se baseia no princípio da Lei de Stokes na sedimentação de partículas (Gee & Or, 2002). A classe textural foi determinada com base no triângulo textural proposto por Santos et al. (2015) e foi classificada como "Argilosa".

3.4.2 PREPARO DAS MUDAS

As mudas foram adquiridas em um viveiro no município de Guarapuava – PR. Foram utilizadas mudas seminais da espécie *Eucalyptus benthamii*, com padrão uniforme de altura de aproximadamente 35 cm, diâmetro entre 0,2 e 0,3 cm e sistema radicular adequadamente desenvolvido, apresentando raízes de coloração clara tomando todo o espaço dentro do tubete de 50 cm^3.

3.4.3 MONTAGEM DO EXPERIMENTO

O delineamento utilizado foi inteiramente casualizado, com 3 tratamentos de níveis de compactação e 8 repetições, resultando em 24 unidades experimentais. Foram utilizados vasos plásticos com volume de 7 litros medindo 30 cm de altura, 11 cm de diâmetro na base e 13 cm de diâmetro na superfície. Antes de colocar o solo nos vasos, estes receberam uma camada de 2 cm de argila expandida e tecido, para ajudar na drenagem dos vasos.

Primeiramente, os vasos foram preenchidos parcialmente com solo. Para realizar a compactação nos 16 cm da parte inferior dos vasos, foi utilizado o soquete de Proctor, com massa de 4,18 kg. Após a compactação, o restante do solo foi uniformemente acomodado no restante do vaso.

A equação 1 foi utilizada para calcular a energia de compactação nas unidades experimentais:

$$E = m.g.h.N.C \quad (1)$$

Em que:

E: energia potencial gravitacional de compactação (J);

m: massa do soquete (g);

g: aceleração da gravidade (cm s²);

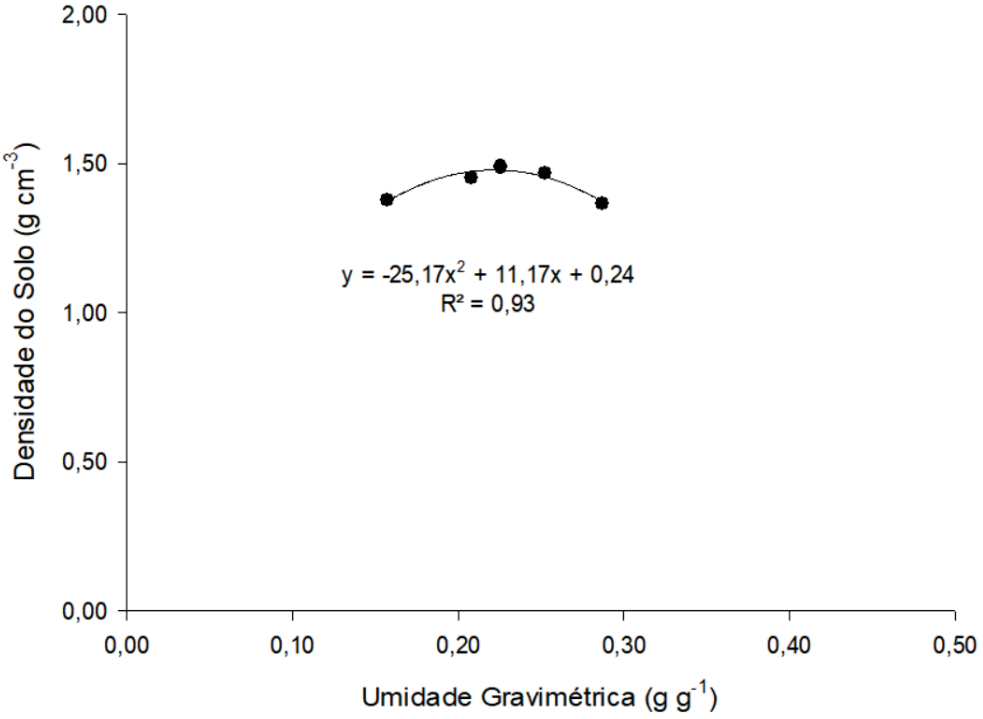
h: altura de queda livre do soquete (cm);

N: número de golpes aplicados, adimensional;

C: número de camadas, adimensional.

Para determinar os níveis de compactação do solo utilizado nos vasos, realizou-se o ensaio de Proctor normal (ABNT NBR-7182/2016; DNER-M162/94). Assim, obteve-se a densidade máxima de 1,48 g cm^{-3} e a umidade ótima para compactação de 0,22 g g^{-1} (Fig. 1).

FIGURA 1 - CURVA DE COMPACTAÇÃO DO SOLO UTILIZADO NO EXPERIMENTO



FONTE: A autora (2024).

Para obter os três níveis de compactação, foi definido uma compactação alta, no qual estimou-se 92% da densidade de referência obtida no ensaio de Proctor normal. Para atingir esse valor, referente à camada compactada (16 cm), foram necessários 80 golpes. Para o nível de compactação médio, o critério foi reduzir o número de golpes para 40. No nível nominado sem compactação, o solo foi simplesmente acomodado de forma uniforme nas colunas.

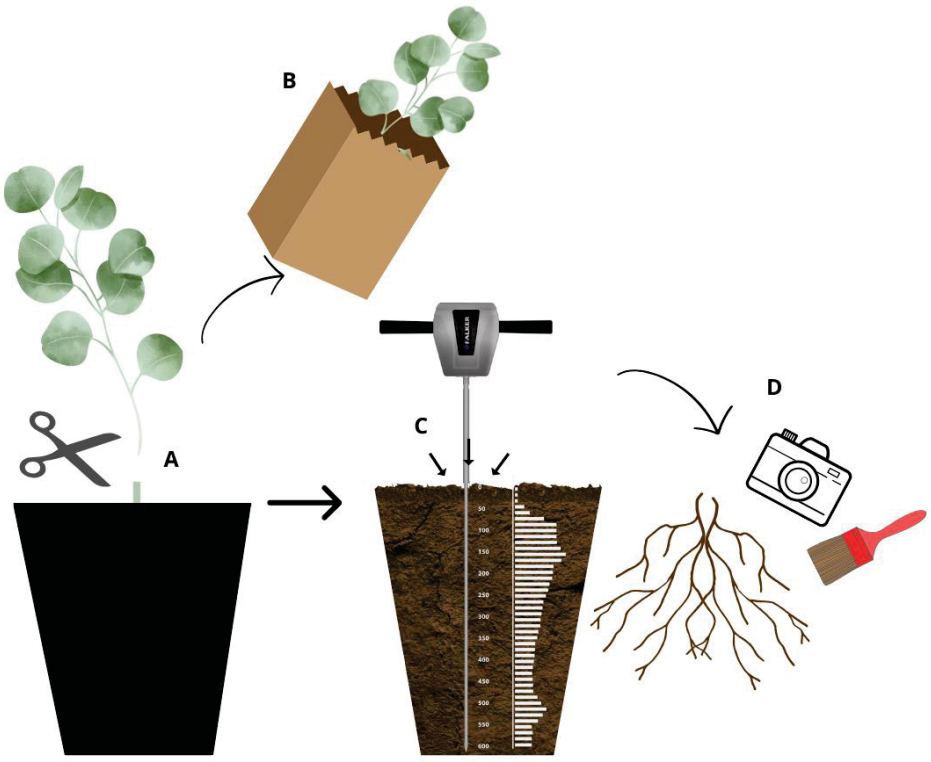
Após a compactação das unidades experimentais, procedeu-se ao plantio das mudas de eucalipto. Cada vaso foi cuidadosamente coberto por uma camada de palha, destinada tanto à supressão de plantas daninhas quanto à conservação da umidade do solo. A manutenção do teor de água foi uniforme em todos os vasos ao longo do experimento.

Após 90 dias da instalação do experimento, a frequência de irrigação foi gradualmente ajustada. Inicialmente, ocorria a cada três dias durante cerca de duas semanas. Posteriormente, o intervalo foi estendido para cada 4 dias e por fim uma vez por semana, permanecendo nesse intervalo até o término do experimento aos 140 dias após o transplantio das mudas para os vasos. Portanto, no último mês do experimento, as plantas passaram mais tempo sem receber água.

3.4.4 PARÂMETROS AVALIADOS

Foram realizadas avaliações de altura e diâmetro das mudas a cada quinze dias, até os 135 dias após o plantio. A mensuração da altura foi realizada utilizando uma fita métrica, enquanto o diâmetro foi registrado por meio de um paquímetro digital. Aos 140 dias após o transplantio das mudas para os vasos, foi realizado um corte no colo da planta, situado a 5 cm de altura a partir da base (como ilustrado na Figura 2A), e separada a parte aérea das mudas (Figura 2B). Na sequência foi medida a resistência do solo à penetração, em três pontos dentro de cada vaso (conforme mostrado na Figura 2C). Posteriormente, o sistema radicular foi separado e coletado com auxílio de um pincel e faca (como apresentado na Figura 2D).

FIGURA 2 – ESQUEMA DE AMOSTRAGEM DAS PLANTAS E RAÍZES E DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO NOS VASOS AOS 140 DIAS APÓS A IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO



FONTE: A autora (2024).

LEGENDA: corte da parte aérea (A), separação da parte aérea (B), medidas de resistência à penetração (C), coleta e fotografia das raízes (D).

3.4.5 DETERMINAÇÃO DOS ATRIBUTOS DE PLANTAS

A parte aérea coletada foi quantificada em massa verde e massa seca. As mudas foram coletadas inteiras e separadas para obtenção da massa fresca da parte aérea. Na sequência, foram colocadas em sacos de papel kraft para secar em estufa de circulação forçada de ar, a 65 ºC, até atingir peso constante em balança de precisão. Após atingir peso constante, foi obtido o valor de massa seca da parte aérea.

3.4.6 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO (RP)

A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada utilizando-se um penetrômetro eletrônico da marca Falker® modelo PenetroLOG®, logo após as plantas terem a parte aérea cortada. O penetrômetro foi configurado para coletar os dados a cada centímetro, em todo o vaso, o cone na ponta da haste possui o ângulo de 35º ponta com diâmetro de 12,81 mm. Três medidas de RP foram tomadas em cada vaso (triplicata).

No momento da determinação da RP o solo estava seco, o que dificultou a medição nos vasos de compactação média e alta. Com isso, os vasos de compactação média e alta receberam água um dia antes da medição, para facilitar a entrada da haste do penetrômetro. Posteriormente, foram coletadas amostras na camada superior, central e inferior de cada vaso, colocadas em latas de alumínio e levadas ao laboratório para secar a 105° até peso constante. Na sequência foi determinada a umidade gravimétrica do solo, que representa a massa de água retida em determinada massa de solo, conforme a equação 2:

$$\theta g = \left(\frac{Msu - Ms}{Ms}\right) \quad (2)$$

Em que:

θg: umidade gravimétrica (g g^{-1});

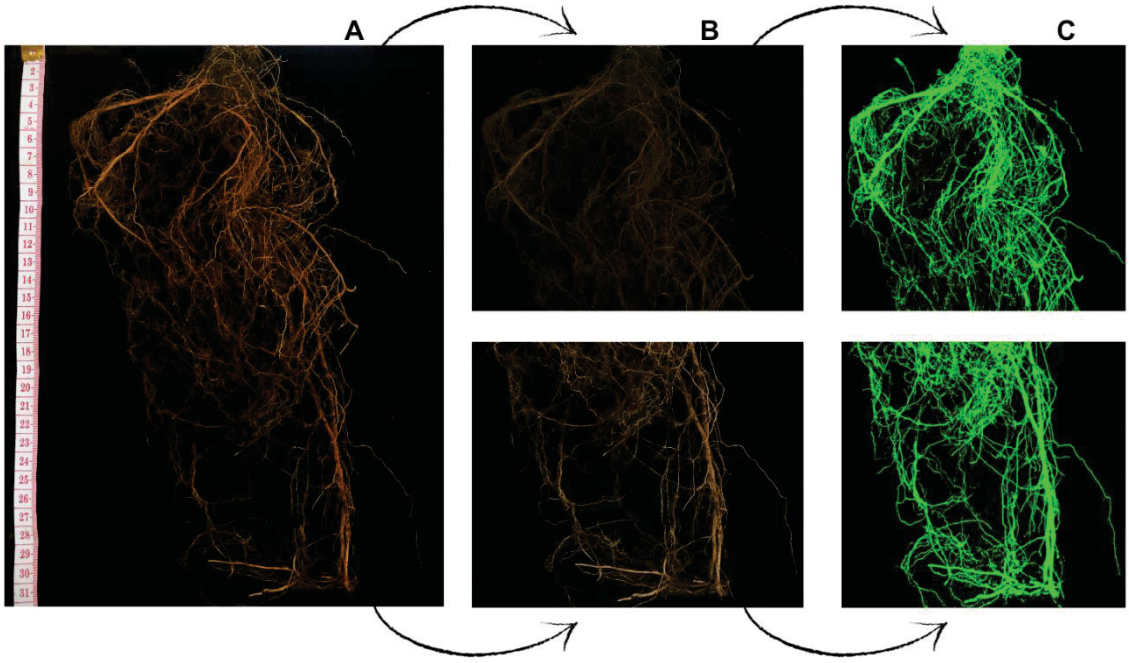
Msu: massa de solo úmido (g);

Ms: massa de solo seco (g).

3.4.7 PROCESSAMENTO DE AMOSTRAS DE RAIZES

Os vasos foram cortados na lateral, e as raízes foram coletadas inteiras dentro de cada vaso, com a ajuda de uma faca e pincel para retirada do solo. Após serem fotografadas, as imagens foram tratadas e na sequência analisadas no software RootSnap, versão 1.3.2.25 (CID Bio-Science, Camas, WA, EUA), para determinar a porcentagem de raízes de cada muda (Fig. 3).

FIGURA 3 – TRATAMENTO DAS IMAGENS DO SISTEMA RADICULAR DE MUDAS DE *Eucalyptus benthamii* SUBMETIDAS A DIFERENTES NÍVEIS DE COMPACTAÇÃOPOR 140 DIAS E ANÁLISE NO SOFTWARE ROOTSNAP



Fonte: A autora (2024).

Após fotografadas, as amostras de raízes mais solo, coletadas na metade do vaso, foram separadas entre camada compactada e não compactada. Na sequência foram lavadas com água sem dispersante, desagregadas manualmente, sobre um conjunto de peneiras de 2 e 1 mm de diâmetro. O processo foi repetido até conseguir retirar a maior parte do solo.

Na sequência, as raízes que ficaram retidas na peneira de 2 mm foram retiradas com pinças e distribuídas em papel absorvente, que posteriormente foram pesadas e levadas à secagem em estufa à 45 °C por 24 horas. As raízes secas foram retiradas do papel e pesadas em balança de precisão, obtendo o valor de massa seca total de

raízes (*Msr*). Na sequência foi calculada a densidade de raízes (*Der*), segundo a equação 3:

$$Der = \left(\frac{Msr}{Vs}\right) \quad (3)$$

Em que:

Der: densidade de raízes (g m^{-3});

Msr: massa seca de raízes (g);

Vs: volume de solo (m^3).

3.4.8 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

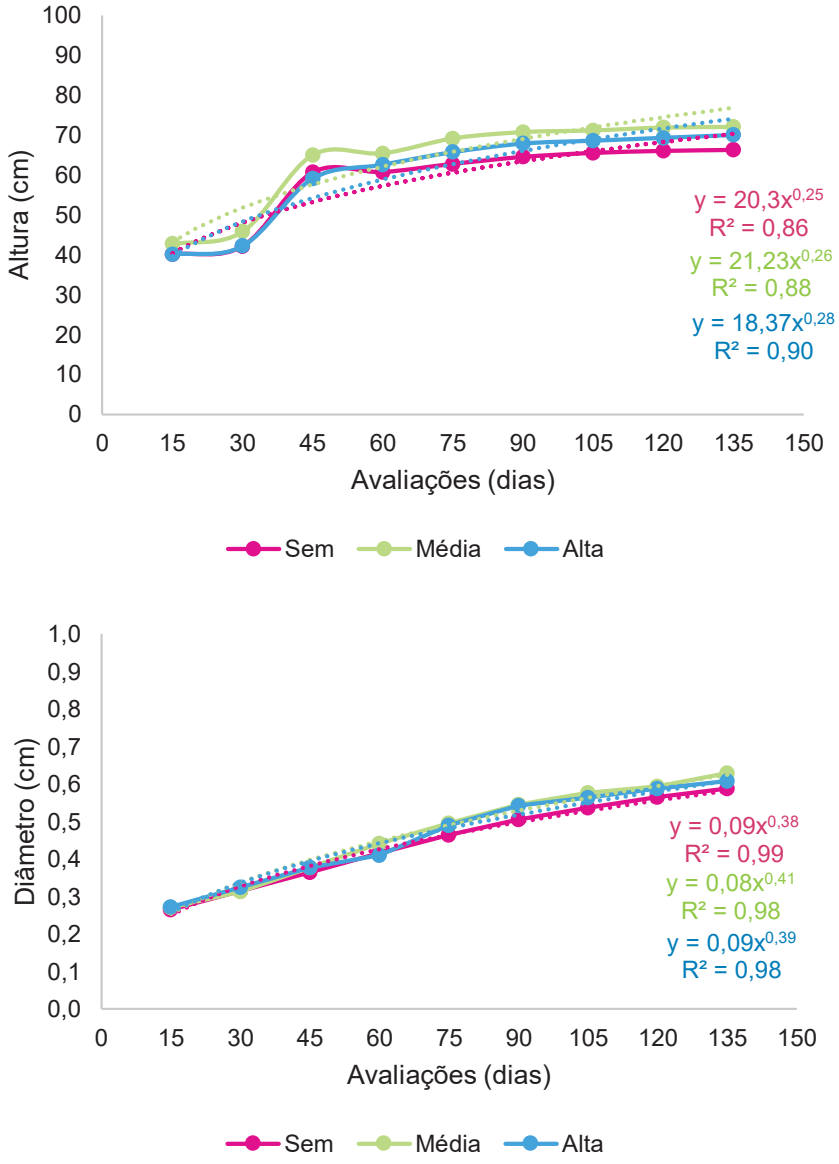
Os dados passaram pelo teste de homogeneidade de variância (Bartlett) e normalidade (Shapiro-Wilk). Aqueles que não se enquadraram nos pressupostos de normalidade foram submetidos à transformação, com retirada de outliers. Em seguida, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, com um nível de 5% de probabilidade. A curva de compactação do solo foi obtida por regressão polinomial de segundo grau, e plotada no software SigmaPlot. Também foram conduzidas análises de regressão do tipo potência. Todas as análises estatísticas foram realizadas com o suporte do software estatístico R 4.3.1.

3.5 RESULTADOS

3.5.1 PARTE AÉREA

A altura e o diâmetro das mudas apresentaram evolução ao longo do experimento (Fig. 4). Inicialmente, tanto a altura quanto o diâmetro partiram de valores similares, entre os níveis de compactação, no momento do plantio das mudas nos vasos. Analisando o potencial de crescimento no período, através das análises de regressão, tem-se que houve aumento mais acentuado da altura no tratamento de compactação alta, e o diâmetro foi maior no tratamento de compactação média.

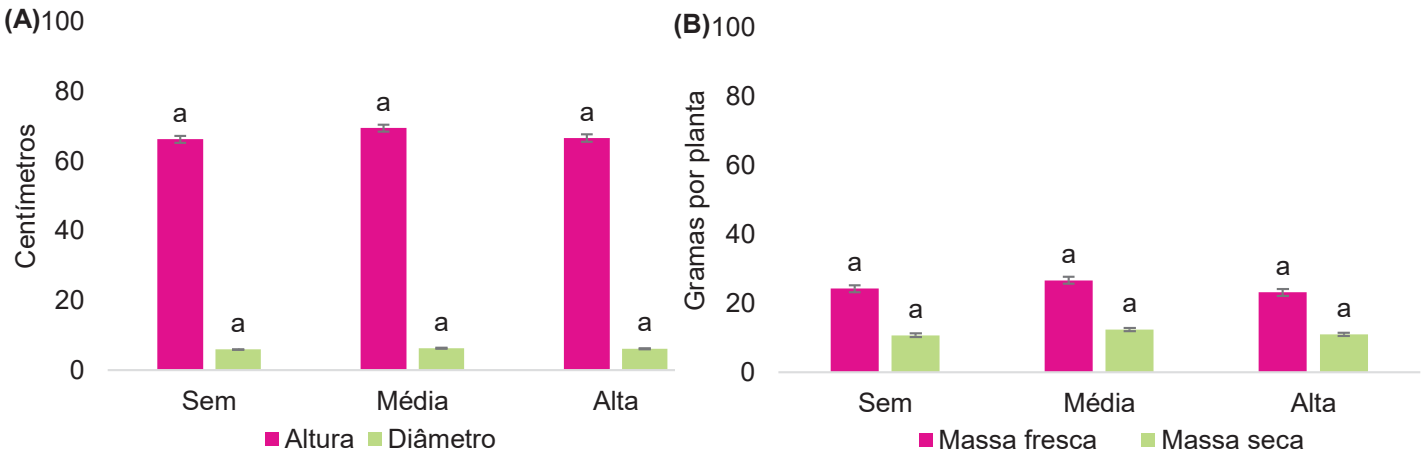
FIGURA 4 - EVOLUÇÃO DA ALTURA E DIÂMETRO DE CAULE DE MUDAS DE *Eucalyptus benthamii* ATÉ OS 135 DIAS APÓS O TRANSPLANTIO DAS MESMAS PARA OS VASOS



FONTE: A autora (2024).

Na última medição, realizada aos 135 dias, não foram observadas diferenças para a altura e diâmetro das mudas entre os níveis de compactação (Fig. 5a). Além disso, a massa fresca e seca da parte aérea também não variaram entre os tratamentos nesse mesmo período (Fig. 5b).

FIGURA 5 – VARIAÇÃO DA ALTURA E DIÂMETRO DE CAULE DE MUDAS DE *Eucalyptus benthamii* AOS 135 DIAS APÓS O TRANSPLANTIO DAS MESMAS PARA OS VASOS



FONTE: A autora (2024).

LEGENDA: médias de altura, diâmetro, massa fresca e seca das mudas de *Eucalyptus benthamii*, em relação aos três níveis de compactação, aos 135 dias. As barras verticais indicam o erro padrão. Médias com letras idênticas indicam que não há diferenças significativas entre os níveis, pelo teste de Tukey com um nível de significância de 5%.

3.5.2 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO E CRESCIMENTO RADICULAR

Os valores médios de RP e umidade gravimétrica nos três níveis de compactação nas diferentes camadas estão apresentados na Tab. 2. Foi observado que os menores valores de RP e umidade foram registrados nos vasos com solo não compactado, enquanto os maiores valores de RP foram observados nos níveis de compactação média e alta. Na maioria das repetições, notou-se um aumento nos valores de RP quando a haste do penetrômetro atingiu a camada compactada, geralmente próximo aos 15 cm de profundidade.

Na primeira camada, onde o solo foi apenas acomodado dentro de cada vaso, os valores de RP não apresentaram diferenças estatisticamente significativas ($p<0,05$) entre os três níveis de compactação. No entanto, na camada inferior, onde foram aplicados os níveis de compactação, observou-se diferença estatística ($p<0,05$) entre os tratamentos. Os níveis de compactação média e alta diferiram significativamente do tratamento sem compactação do solo, alcançando valores de RP > 2 MPa.

A umidade gravimétrica apresentou variação estatística entre os tratamentos nas três camadas amostradas. Os menores valores foram observados no tratamento sem compactação em todas as camadas (Tab. 2).

TABELA 2 - VALORES MÉDIOS DE RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO (MPa) NA CAMADA SUPERIOR E INFERIOR DOS VASOS, E UMIDADE GRAVIMÉTRICA (g g^{-1}) DAS 3 CAMADAS AMOSTRADAS PARA OS TRÊS NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO

	----------RP (MPa)----------		--------Umidade Gravimétrica (g g^{-1})--------		
	Superior	Inferior	Camada superior	Camada central	Camada inferior
Sem	0,11 a	0,31 b	0,03 c	0,03 b	0,04 b
Média	0,14 a	2,13 a	0,31 a	0,28 a	0,25 a
Alta	0,13 a	2,24 a	0,28 b	0,27 a	0,25 a
CV (%)	35,22	20,37	9,32	13,23	13,18

FONTE: A autora (2024).

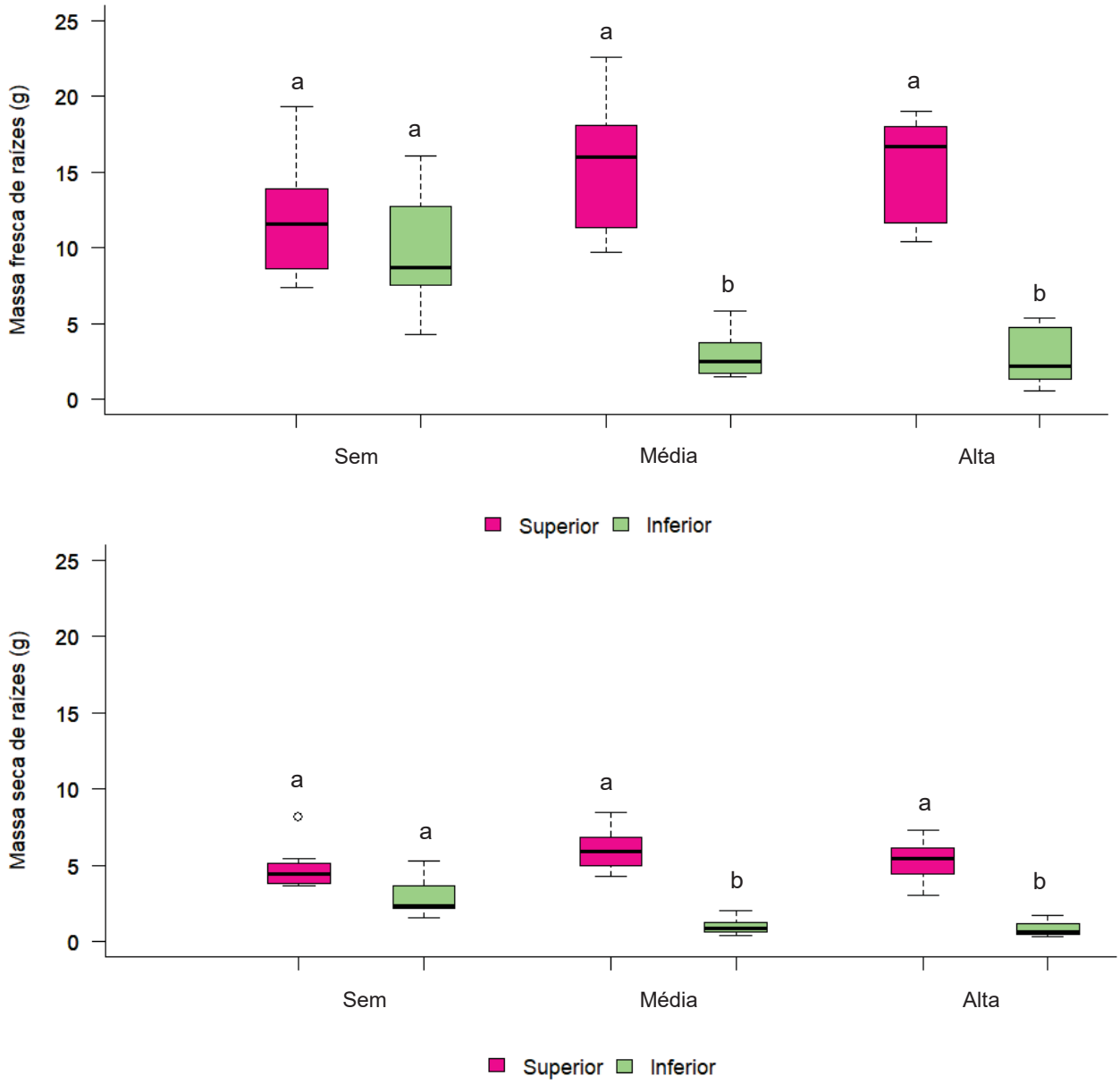
LEGENDA: médias seguidas pela mesma letra entre os níveis de compactação indicam que não há diferenças significativas, conforme o teste de Tukey ($p<0,05$). CV%= coeficiente de variação.

Os parâmetros radiculares apresentaram resultados semelhantes na camada superior, onde os tratamentos não diferiram estatisticamente entre si (Fig. 6). Tanto a massa fresca quanto a massa seca de raízes na metade superior do vaso, onde os sistemas radiculares foram expostos, permaneceram consistentes. No entanto, na camada inferior, sujeita aos níveis de compactação do solo, observou-se uma diferença significativa ($p<0,05$), com o tratamento sem compactação apresentando as maiores médias para massa fresca e massa seca de raízes (Fig. 6). Na camada inferior, o tratamento sem compactação diferiu estatisticamente dos demais, exibindo a maior média para massa fresca (9,8 g) e massa seca (2,6 g) de raízes. Quanto à densidade de raízes, os tratamentos também não diferiram entre si na camada superior. Entretanto, na camada inferior, o tratamento sem compactação foi superior aos demais, registrando a maior média (980 g m^{-3}) para densidade de raízes (Fig. 7).

Além disso, em concordância com o supracitado, a porcentagem de raízes, obtida pelas imagens processadas no software RootSnap, não foi estatisticamente significativa na camada superior para os três tratamentos (Fig. 8a). No entanto, na camada inferior dos vasos, o tratamento sem compactação diferiu estatisticamente

(p<0,05) dos demais, apresentando a maior média (34%) para porcentagem de raízes (Fig. 8b). Novamente, os tratamentos de compactação média e alta não apresentaram diferença estatística quando comparados. Na camada inferior, percebe-se que conforme a compactação do solo aumentou, houve uma diminuição progressiva na presença de raízes, evidenciando a sensibilidade do sistema radicular às condições de compactação mais intensas.

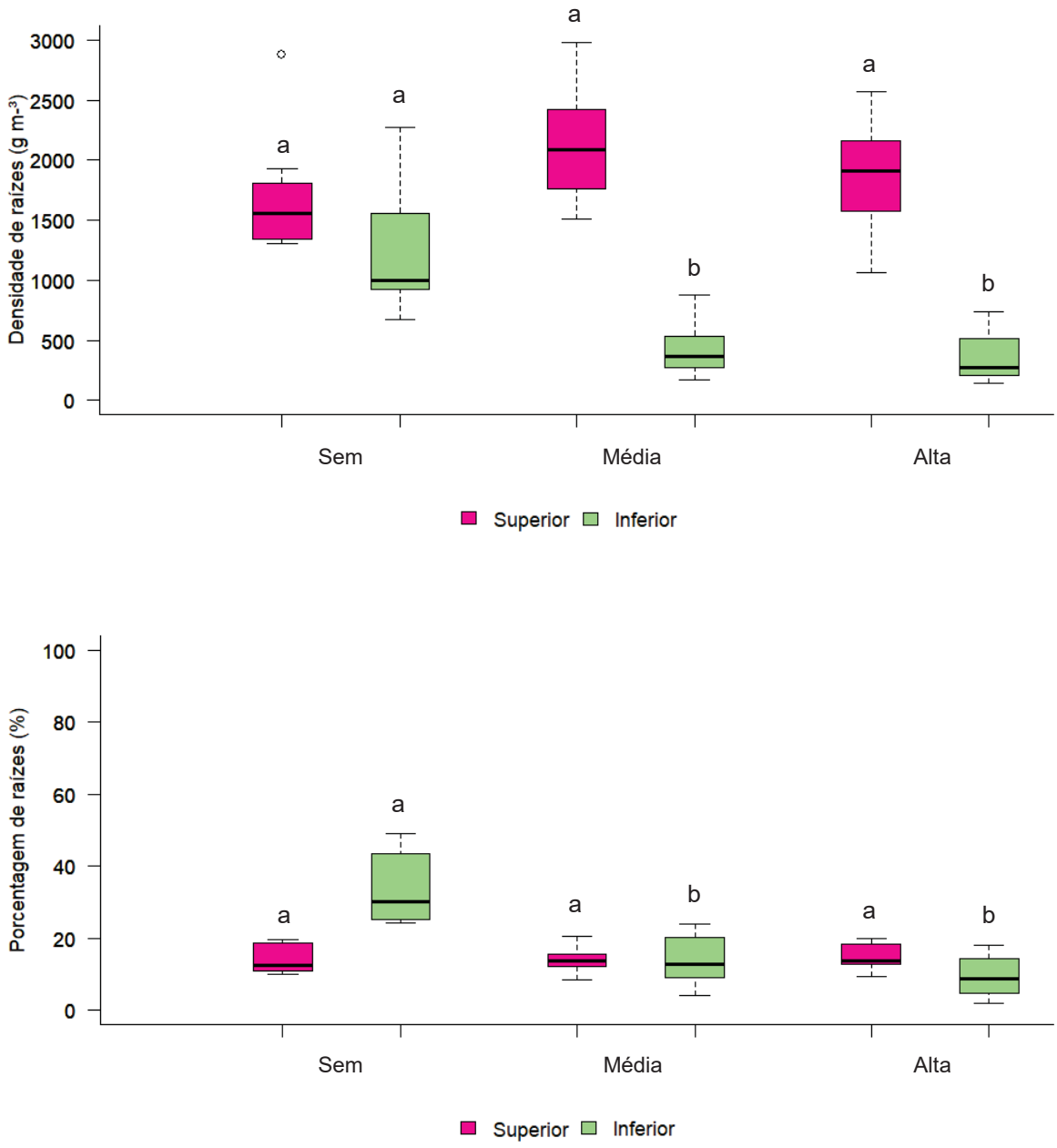
FIGURA 6 - MASSA FRESCA E SECA DE RAÍZES DE MUDAS DE *Eucalyptus benthamii* AOS 135 DIAS APÓS O CULTIVO NOS VASOS



FONTE: A autora (2024).

LEGENDA: médias seguidas pela mesma letra entre os níveis de compactação indicam que não há diferenças significativas, conforme o teste de Tukey (p<0,05).

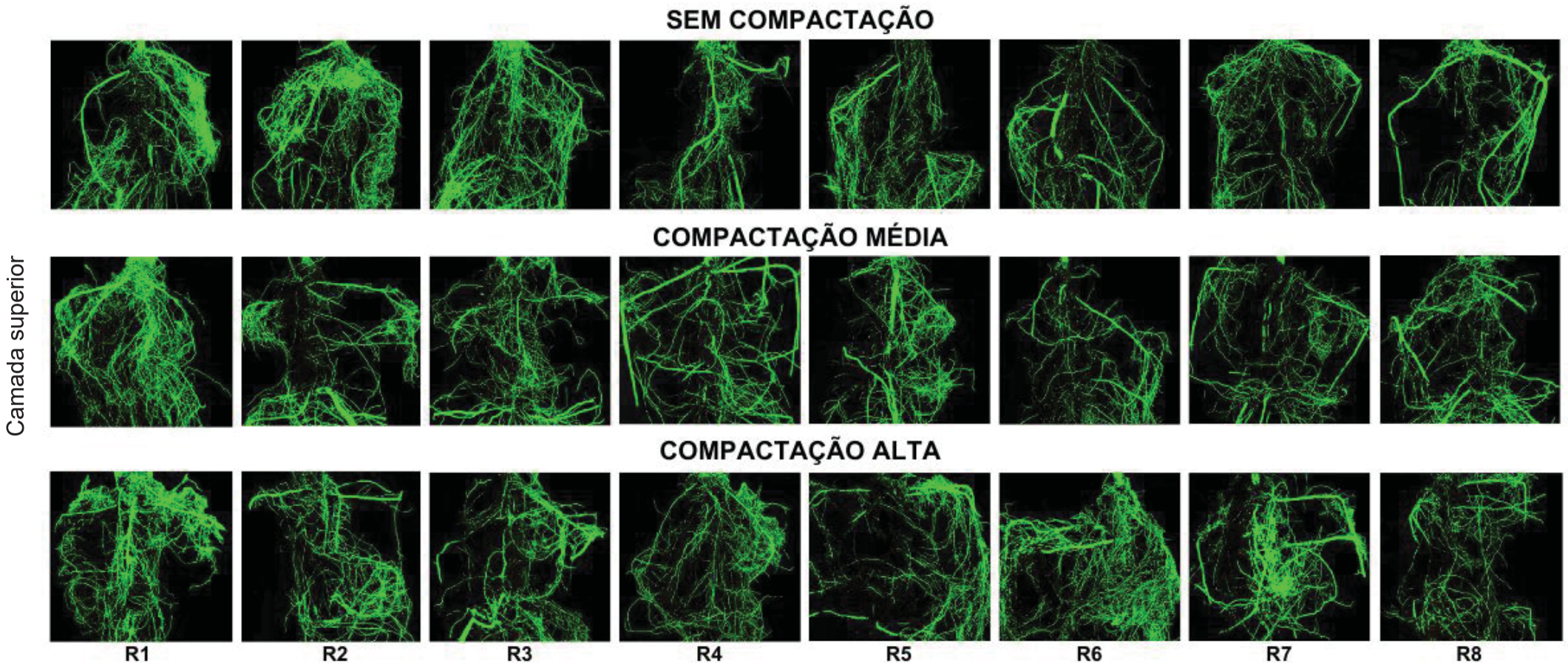
FIGURA 7 – DENSIDADE E PORCENTAGEM DE RAÍZES DE MUDAS DE *Eucalyptus benthamii* AOS 135 DIAS APÓS O CULTIVO NOS VASOS



FONTE: A autora (2024).

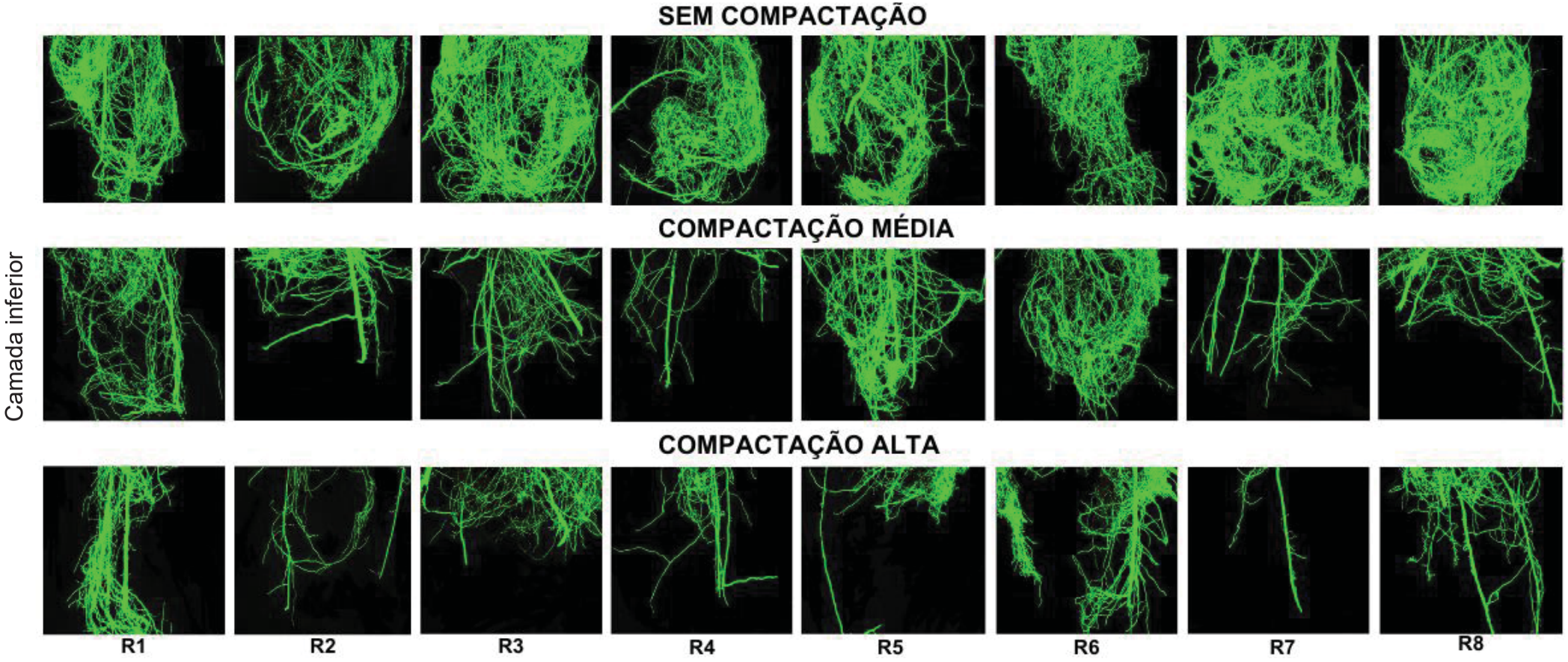
LEGENDA: médias seguidas pela mesma letra entre os níveis de compactação indicam que não há diferenças significativas, conforme o teste de Tukey ($p<0,05$).

FIGURA 8A - PORCENTAGEM DE RAÍZES DE MUDAS DE *Eucalyptus benthamii* SUMBETIDAS A DIFERENTES NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO, NAS 8 REPETIÇÕES, OBTIDAS PELO SOFTWARE ROOTSNAP NA CAMADA SUPERIOR DOS VASOS



FONTE: A autora (2024).

FIGURA 8B - PORCENTAGEM DE RAÍZES DE MUDAS DE *Eucalyptus benthamii* SUBMETIDAS A DIFERENTES NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO, NAS 8 REPETIÇÕES, OBTIDAS PELO SOFTWARE ROOTSNAP NA CAMADA INFERIOR DOS VASOS



FONTE: A autora (2024).

3.6 DISCUSSÃO

3.6.1 PARTE AÉREA

O *E. benthamii*, durante a fase de muda, não apresentou efeitos advindos da compactação do solo na parte aérea (Fig. 5). Porém, cabe ressaltar que os efeitos da compactação podem variar em função da espécie e do grau de compactação estudado (Alameda & Villar, 2012). Em um estudo sobre os efeitos de compactação em diferentes mudas de eucalipto, Williamson & Neilsen (2003) verificaram que o *Eucalyptus obliqua* diminuiu mais do que outras espécies de eucalipto quando ocorreu o aumento da densidade do solo, indicando a necessidade de evitar a compactação no manejo desta espécie. Em contrapartida, os autores constataram que o crescimento de *Eucalyptus amygdalina* não diminuiu com o aumento da densidade. No mesmo estudo, mudas de *Eucalyptus globulus* apresentaram bom crescimento e tolerância à compactação.

Foi evidenciada altura mais acentuada no nível médio de compactação, aos 135 dias após o plantio nos vasos (Fig. 4). De acordo com Arvidsson (1999), a compactação moderada do solo pode, de certa forma, facilitar o contato das raízes com o solo, o que ajuda na absorção de nutrientes e água pelas plantas. Ademais, outros estudos já encontraram um efeito positivo no crescimento de mudas (Alameda & Villar, 2009; Bejarano et al., 2010), quando submetidas a níveis baixos e moderados de compactação do solo. Por exemplo, Mósena & Dillenburg (2004) encontraram, em casa de vegetação, para *Araucaria angustifolia* um aumento na biomassa, com o aumento da densidade do solo, e associaram ao contato mais íntimo entre as raízes e as partículas do solo.

Confome observado na Fig. 5b, não houve diferença significativa para massa fresca e seca da parte aérea das mudas ao final do experimento. Neste sentido, Alameda & Villar (2009) propõem que a compactação do solo pode manifestar valores de não efeito, um grau médio de efeito positivo (no crescimento) e um efeito negativo para valores elevados de compactação do solo. Arvidsson (1999) constatou baixo rendimento na cevada (*Hordeum vulgare*), na menor e maior compactação do solo. Em mudas de *Pinus ponderosa*, por exemplo, Gomez et al. (2002) constataram que o efeito da compactação do solo no crescimento pode ser negativo, insignificante ou positivo, dependendo da textura ou do teor de água do solo.

Em estudo realizado por Jesus et al. (2015), foi avaliado o impacto de diferentes intensidades de tráfego de um *forwarder* na produtividade de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis*. Os autores constataram incrementos médios anuais menores em função do tráfego, desde os dois primeiros anos até a idade da colheita. Reduções na produtividade também foram observadas por Dedecek & Gava (2005), o *Eucalyptus grandis* com 7 anos em rebrota nas linhas de tráfego teve redução de até 66% na produtividade. Em nosso estudo não foram constatadas diferenças na parte aérea, o que pode estar relacionado ao curto período de experimento, em comparação com os estudos de Jesus et al. (2015) e Dedecek & Gava (2005), por exemplo.

Outro fator envolvido é o fornecimento adequado de água no início do experimento, que pode ter influenciado na evolução do crescimento das mudas (Fig. 4). Alguns pesquisadores (Voorhees 1977; Dickey et al., 1985) sugerem que a restrição do crescimento radicular em condições de impedimento físico pode não resultar em diminuição no crescimento da parte aérea se a planta não estiver estressada por água e nutrientes. Neste sentido, pode-se inferir que a irrigação frequente nos primeiros meses do experimento pode ter contribuído para o crescimento gradativo da parte aérea das mudas de *E. benthamii*.

3.6.2 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO E CRESCIMENTO RADICULAR

Os maiores valores de RP foram encontrados nos vasos com os níveis de compactação média e alta, sendo 2,13 MPa e 2,24 MPa, respectivamente (Tab. 2), o que era esperado, já que a compactação foi induzida nestes vasos. De acordo com Eliasson (2005), a resistência do solo à penetração entre 2,0 e 2,5 MPa é propícia para a redução do crescimento, e desenvolvimento radicular de espécies florestais. Limites de RP acima de 3,0 MPa são afirmados como limitantes por Domsch et al. (2006) e Labelle et al. (2019), interrompendo o desenvolvimento radicular. Entretanto, os valores médios observados nas camadas compactadas apresentaram umidade do solo relativamente alta, o que reduz a resistência do solo à penetração radicular. Nesse contexto, é provável que as raízes estiveram submetidas a valores de RP mais elevados, o que pode ter restringido seu crescimento, com a compactação.

Na Tab. 2 pode-se observar a variação da umidade gravimétrica do solo nas diferentes camadas do vaso, para os três níveis de compactação. Os vasos de compactação média e alta apresentaram valores mais elevados, pois houve a

necessidade de adicionar água antes das medidas de RP, devido à dificuldade de inserção da haste no solo. De acordo com Silva et al. (2002), em solos mais compactados, resultante do maior atrito entre as partículas, há necessidade de maior umidade no solo para facilitar o deslocamento das partículas. Por isso, foi realizada a irrigação dos vasos anteriormente à medição da RP, uma vez que essa prática facilita a entrada do penetrômetro. Todavia, embora a RP seja utilizada como um indicador para a compactação do solo, e associada ao crescimento e produtividade das culturas, é uma propriedade que pode apresentar variações (Aksakal et al., 2019). Conforme evidenciado na Tab. 2, a RP é altamente dependente do teor de água no solo (Barrios et al., 2019; Fashi et al., 2019; Fernandes et al., 2020). Neste sentido, Reichert et al. (2021), destaca que em situações de campo, dependendo de como a RP é avaliada, ela pode não se relacionar de forma adequada com propriedades limitantes ou restritivas ao crescimento e densenvolvimento de plantas.

No caso dos vasos sem compactação, a umidade foi baixa (Tab. 2). Vaz et al. (2011) afirmam que a RP medida em condições de solo seco pode não ser tão precisa se tratando de trabalhos com produção agrícola ou florestal. Porque as forças de atrito são maiores, resultando em valores mais altos, então é recomendado realizar as medições de RP em capacidade de campo ou próxima (Reichert et al., 2021). Outro fator mencionado por Bengough & Mullins (1990), é que a determinação da RP do solo por penetrômetros com cone metálico pode resultar em valores de duas a oito vezes maiores que as pressões exercidas pelas raízes. Isso é explicado pelo atrito na interface solo-metal, que tende a ser maior que o atrito entre o solo e as raízes das plantas (Bengough & Mullins, 1990). Ademais, conforme Iijima et al. (2020), a compactação do solo faz com que a raíz produza mucilagem, para reduzir a força de atrito entre as partículas do solo e as raízes. Essa mucilagem é composta por carboidratos complexos, que auxiliam no alongamento das pontas das raízes em solo compactado.

Valores de RP superiores a 2,0 MPa, alcançados nos níveis médio (2,13) e alto (2,24) de compactação (Tab. 2), são considerados restritivos para o desenvolvimento radicular da maioria das espécies agrícolas, e superior a 3,0 MPa restritiva para o desenvolvimento radicular de espécies florestais (Zou et al., 2000). Em relação ao eucalipto, Cavalli at al. (2020) realizaram um estudo com o objetivo de identificar as propriedades físicas do solo que melhor explicam a variância da produtividade de *Eucalyptus saligna*. Dentre os fatores avaliados, a alta produtividade

de povoamentos de eucalipto esteve diretamente relacionada à resistência não restritiva do solo à penetração.

Neste estudo, houve diminuição da densidade de raízes nas camadas de compactação média e alta (Fig. 7). Esse fato é corroborado por Schumacher (1995), que observou diminuição abrupta na densidade de raízes de eucalipto crescendo em uma camada compactada. Mósena & Dillenburg (2004), também constataram diminuição da proporção de raízes da araucária em solo compactado e submetido à estresse hídrico. Segundo Gonçalves & Mello (2000), enquanto o hábito de crescimento das raízes determina o volume das raízes, a densidade das raízes (número e distribuição) determina o grau de exploração do volume do solo pelo sistema radicular (Gonçalves & Mello, 2000). Neste estudo, o grau de exploração do volume do solo pelo sistema radicular foi significativamente menor nas camadas compactadas. Com menor volume de solo explorado pelo sistema radicular devido à compactação do solo, menor é a absorção de água e, portanto, a fotossíntese e o desempenho fisiológico geral da planta são comprometidos (Mariotti et al., 2020). Isto pode determinar que em situações de déficit hídrico, plantas com menor desenvolvimento radicular podem sofrer com secas de forma mais severa e, portanto, limitar seriamente a sobrevivência das mudas (Alameda & Villar, 2009; Lloret et al., 1999).

Conforme observado na Fig. 8a, e respaldado por diversos autores (Mariotti et al., 2020; Bassett et al., 2005; Cambi et al., 2018; Correa et al., 2019), solos compactados podem ser uma barreira para o estabelecimento e crescimento de mudas, porque o aumento da resistência do solo atrasa a penetração da superfície do solo pela radícula (Smith et al., 2001; Smith & DuToit, 2005). As relações entre o crescimento das raízes das plantas e a resistência à penetração são relatadas por diversos autores (Colombi et al., 2017; Colombi et al., 2018; Sinnett et al., 2008; Mulholland et al., 1996; Bello-Bello et al., 2022; Bengough et al., 2011; Lipiec et al., 2012; Valentine et al., 2012).

As raízes das plantas em solo compactado são frequentemente mais curtas e posicionadas principalmente na camada superficial do solo (Wu et al., 2022; Lipiec & Hatano, 2003). O que é corroborado pelas Figuras 6, 7, 8a e 8b, na compactação média e alta a maior quantidade de raízes foi na camada superior, em que o solo não foi compactado. Com isso, as raízes não conseguem explorar plenamente os recursos do solo (Jin et al., 2017; Correa et al., 2019). A aquisição de água e nutrientes é

determinada principalmente pela dimensão da zona radicular e distribuição da densidade radicular e proliferação radicular (Grzesiak et al., 2013; Iijima & Kono, 1991; Oussible et al., 1993; Yamauchi, 1993). Além disso, o custo energético necessário para o alongamento da raiz é maior com o aumento da resistência à penetração (Colombi & Keller, 2019).

Quando o solo tem menor resistência à penetração, conforme observado no tratamento sem compactação (Fig. 8b), a proliferação de raízes finas ocorre em camadas mais profundas do perfil do solo (Schumacher, 1995). Neste sentido, Bejarano et al. (2010), descrevem o papel das raízes no fornecimento de suporte físico às plantas tão importante quanto o papel destas na absorção de água e nutrientes. Quanto menor limitação o sistema radicular encontrar, melhor a planta adulta irá ancorar-se ao solo e enfrentar as adversidades do ambiente. Semelhante ao encontrado neste estudo, analisando a massa seca da parte aérea (Fig. 5b) e massa seca de raízes (Fig. 6), Correa at al. (2022) observaram que as plantas que crescem em solo compactado têm proporcionalmente menos massa de raízes do que massa de parte aérea, em comparação com plantas não impedidas. Esse fato pode estar atrelado a uma possível compensação das plantas em situações de compactação do solo.

3.7 CONCLUSÕES

A hipótese inicial, de que a compactação do solo prejudica o crescimento inicial do *Eucalyptus benthamii*, foi confirmada. Após 140 dias do plantio das mudas nos vasos, não foram observados sinais de prejuízo na parte aérea. No entanto, o sistema radicular das mudas nos níveis médio e alto de compactação foi comprometido, com redução significativa da densidade de raízes, porcentagem de raízes, massa fresca e seca de raízes, quando comparado ao tratamento sem compactação do solo.

3.8 REFERÊNCIAS

Abrão, S. F., Rosa, S. F. D., Reinert, D. J., Reichert, J. M., & Ebling, Â. A. (2017). agregação de um cambissolo húmico em povoamentos de *Pinus taeda* L. com diferentes rotações. *Ciência Florestal*, *27*, 445-455.

Aksakal, E. L., Barik, K., Angin, I., Sari, S., & Islam, K. R. (2019). Spatio-temporal variability in physical properties of different textured soils under similar management and semi-arid climatic conditions. *Catena*, *172*, 528-546.

Alameda, D., & Villar, R. (2012). Linking root traits to plant physiology and growth in Fraxinus angustifolia Vahl. seedlings under soil compaction conditions. *Environmental and Experimental Botany*, *79*, 49-57.

Alameda, D., & Villar, R. (2009). Moderate soil compaction: implications on growth and architecture in seedlings of 17 woody plant species. *Soil and Tillage Research*, *103*(2), 325-331.

Alesso, C. A., Masola, M. J., Carrizo, M. E., Cipriotti, P. A., & Imhoff, S. D. (2019). Spatial variability of short-term effect of tillage on soil penetration resistance. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *65*(6), 822-832.

Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. D. M., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische zeitschrift*, *22*(6), 711-728.

Arnold, R., Li, B., Luo, J., Bai, F., & Baker, T. (2015). Selection of cold-tolerant Eucalyptus species and provenances for inland frost-susceptible, humid subtropical regions of southern China. *Australian Forestry*, *78*(3), 180-193.

Arshad, M. A., & Martin, S. (2002). Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agriculture, ecosystems & environment*, *88*(2), 153-160.

Arvidsson, J. (1999). Nutrient uptake and growth of barley as affected by soil compaction. *Plant and soil*, *208*, 9-19.

Assis, P. C., Stone, L. F., Medeiros, J. C., Madari, B. E., Oliveira, J. D. M., & Wruck, F. J. (2015). Atributos físicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, *19*, 309-316.

Bejarano, M. D., Villar, R., Murillo, A. M., & Quero, J. L. (2010). Effects of soil compaction and light on growth of Quercus pyrenaica Willd.(Fagaceae) seedlings. *Soil and Tillage Research*, *110*(1), 108-114.

Bassett, I. E., Simcock, R. C., & Mitchell, N. D. (2005). Consequences of soil compaction for seedling establishment: implications for natural regeneration and restoration. *Austral Ecology*, *30*(8), 827-833.

Bello-Bello, E., López-Arredondo, D., Rico-Chambrón, T. Y., & Herrera-Estrella, L. (2022). Conquering compacted soils: uncovering the molecular components of root soil penetration. *Trends in Plant Science*.

Barrios, P. G., Bidegain, M. P., & Gutiérrez, L. (2015). Effects of tillage intensities on spatial soil variability and site-specific management in early growth of Eucalyptus grandis. *Forest Ecology and Management*, *346*, 41-50.

Bengough, A. G., & Mullins, C. E. (1990). Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *Journal of soil science*, *41*(3), 341-358.

Bengough, A. G., McKenzie, B. M., Hallett, P. D., & Valentine, T. A. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of experimental botany*, *62*(1), 59-68.

Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Particle density. *Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods*, *5*, 377-382.

Blouin, V. M., Schmidt, M. G., Bulmer, C. E., & Krzic, M. (2008). Effects of compaction and water content on lodgepole pine seedling growth. *Forest Ecology and Management*, *255*(7), 2444-2452.

Cambi, M., Mariotti, B., Fabiano, F., Maltoni, A., Tani, A., Foderi, C., ... & Marchi, E. (2018). Early response of Quercus robur seedlings to soil compaction following germination. *Land Degradation & Development*, *29*(4), 916-925.

Cavalli, J. P., Reichert, J. M., Rodrigues, M. F., & de Araujo, E. F. (2020). Composition and functional soil properties of arenosols and acrisols: Effects on eucalyptus growth and productivity. *Soil and Tillage Research*, *196*, 104439.

Christina, M., Le Maire, G., Nouvellon, Y., Vezy, R., Bordon, B., Battie-Laclau, P., ... & Laclau, J. P. (2018). Simulating the effects of different potassium and water supply regimes on soil water content and water table depth over a rotation of a tropical Eucalyptus grandis plantation. *Forest Ecology and Management*, *418*, 4-14.

Colombi, T., Kirchgessner, N., Walter, A., & Keller, T. (2017). Root tip shape governs root elongation rate under increased soil strength. *Plant Physiology*, *174*(4), 2289-2301.

Colombi, T., & Keller, T. (2019). Developing strategies to recover crop productivity after soil compaction—A plant eco-physiological perspective. *Soil and Tillage Research*, *191*, 156-161.

Colombi, T., Torres, L. C., Walter, A., & Keller, T. (2018). Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth–A vicious circle. *Science of the Total Environment*, *626*, 1026-1035.

Correa, J., Postma, J. A., Watt, M., & Wojciechowski, T. (2019). Root system architectural plasticity and soil compaction: a review. *Journal of Experimental Botany*, *70*, 6019-6034.

Correa, J., Postma, J. A., & Wojciechowski, T. (2022). Phenotypic response to soil compaction varies among genotypes and correlates with plant size in sorghum. *Plant and Soil*, 1-18.

Da Silva, P. H. M., Poggiani, F., Libardi, P. L., & Gonçalves, A. N. (2013). Fertilizer management of eucalypt plantations on sandy soil in Brazil: initial growth and nutrient cycling. *Forest Ecology and Management*, *301*, 67-78.

Da Veiga, M., Horn, R., Reinert, D. J., & Reichert, J. M. (2007). Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. *Soil and Tillage Research*, *92*(1-2), 104-113.

Dedecek, R. A., & Gava, J. L. (2005). Influência da compactação do solo na produtividade da rebrota de eucalipto. *Revista Árvore*, *29*, 383-390.Dickey, E. C., Peterson, T., Eisenhauer, D. E., & Jasa, P. J. (1985). Soil Compaction I Where, how bad, a problem.

Domsch, H., Ehlert, D., Giebel, A., Witzke, K., & Boess, J. (2006). Evaluation of the soil penetration resistance along a transect to determine the loosening depth. *Precision Agriculture*, *7*, 309-326.

de Marins, A. C., Reichert, J. M., Secco, D., Rosa, H. A., & Veloso, G. (2018). Crambe grain yield and oil content affected by spatial variability in soil physical properties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *81*, 464-472.

Eliasson, L. (2005). Effects of forwarder tyre pressure on rut formation and soil compaction. *Silva Fennica*, *39*(4), 549.

Elli, E. F., Sentelhas, P. C., de Freitas, C. H., Carneiro, R. L., & Alvares, C. A. (2019). Assessing the growth gaps of Eucalyptus plantations in Brazil–Magnitudes, causes and possible mitigation strategies. *Forest Ecology and Management*, *451*, 117464.

Fashi, F. H., Gorji, M., & Sharifi, F. (2019). Temporal variability of soil water content and penetration resistance under different soil management practices. *Journal of Soil and Water Conservation*, *74*(2), 188-198.

Fernandes, M. M. H., Coelho, A. P., da Silva, M. F., Bertonha, R. S., de Queiroz, R. F., Furlani, C. E. A., & Fernandes, C. (2020). Estimation of soil penetration resistance with standardized moisture using modeling by artificial neural networks. *Catena*, *189*, 104505.

Fernández, J. F., Rubin, L., Hartmann, P., Puhlmann, H., & von Wilpert, K. (2019). Initial recovery of soil structure of a compacted forest soil can be enhanced by technical treatments and planting. *Forest Ecology and Management*, *431*, 54-62.

França, J. S., Reichert, J. M., Holthusen, D., Rodrigues, M. F., & de Araujo, E. F. (2021). Subsoiling and mechanical hole-drilling tillage effects on soil physical properties and initial growth of eucalyptus after eucalyptus on steeplands. *Soil and Tillage Research*, *207*, 104860.

Frigotto, T., Navroski, M. C., de Aguiar, N. S., Felippe, D., Borsoi, G. A., de Oliveira Pereira, M., & Lovatel, Q. C. (2020). Desempenho de espécies e procedências de Eucalyptus no Planalto Norte Catarinense, Brasil. *Sci. Forestalis*, *48*(127), e3273.

Gee, G. W., & Or, D. (2002). 2.4 Particle-size analysis. *Methods of soil analysis: Part 4 physical methods*, *5*, 255-293.

Gomez, A., Powers, R. F., Singer, M. J., & Horwath, W. R. (2002). Soil compaction effects on growth of young ponderosa pine following litter removal in California's Sierra Nevada. *Soil Science Society of America Journal*, *66*(4), 1334-1343.

Gonçalves, A. N., & Mello, S. L. D. M. (2015). O sistema radicular das árvores. *Nutrição e fertilização florestal*, 427-il.

Gonçalves, J. L., Alvares, C. A., Higa, A. R., Silva, L. D., Alfenas, A. C., Stahl, J., ... & 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.

Grzesiak, S., Grzesiak, M. T., Hura, T., Marcińska, I., & Rzepka, A. (2013). Changes in root system structure, leaf water potential and gas exchange of maize and triticale seedlings affected by soil compaction. *Environmental and Experimental Botany*, *88*, 2-10.

Holthusen, D., Brandt, A. A., Reichert, J. M., & Horn, R. (2018a). Soil porosity, permeability and static and dynamic strength parameters under native forest/grassland compared to no-tillage cropping. *Soil and Tillage Research*, *177*, 113-124.

Holthusen, D., Brandt, A. A., Reichert, J. M., Horn, R., Fleige, H., & Zink, A. (2018b). Soil functions and in situ stress distribution in subtropical soils as affected by land use, vehicle type, tire inflation pressure and plant residue removal. *Soil and Tillage Research*, *184*, 78-92.

Iijima, M., Griffiths, B., & Bengough, A. G. (2000). Sloughing of cap cells and carbon exudation from maize seedling roots in compacted sand. *The New Phytologist*, *145*(3), 477-482.

Iijima, M., & Kono, Y. (1991). Interspecific differences of the root system structures of four cereal species as affected by soil compaction. *Japanese Journal of Crop Science*, *60*(1), 130-145.

Imhoff, S., Da Silva, A. P., & Fallow, D. (2004). Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. *Soil Science Society of America Journal*, *68*(1), 17-24.

Jesus, G. L. D., Silva, I. R., Almeida, L. F. J., Santos, M. A. D., Leite, F. P., & Neves, J. C. L. (2015). Produtividade do eucalipto, atributos físicos do solo e frações da matéria orgânica influenciadas pela intensidade de tráfego e resíduos de colheita. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *39*, 1190-1203.

Jin, K., White, P. J., Whalley, W. R., Shen, J., & Shi, L. (2017). Shaping an optimal soil by root–soil interaction. *Trends in Plant Science*, *22*(10), 823-829.

Jourgholami, M., Khajavi, S., & Labelle, E. R. (2018). Mulching and water diversion structures on skid trails: Response of soil physical properties six years after harvesting. *Ecological engineering*, *123*, 1-9.

Kondo, M. K., & Junior, D. (1999). Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *23*, 211-218.

Kuhwald, M., Blaschek, M., Minkler, R., Nazemtseva, Y., Schwanebeck, M., Winter, J., & Duttmann, R. (2016). Spatial analysis of long-term effects of different tillage practices based on penetration resistance. *Soil Use and Management*, *32*(2), 240-249.

Kuhwald, M., Hamer, W. B., Brunotte, J., & Duttmann, R. (2020). Soil penetration resistance after one-time inversion tillage: a spatio-temporal analysis at the field scale. *Land*, *9*(12), 482.

Labelle, E. R., Poltorak, B. J., & Jaeger, D. (2019). The role of brush mats in mitigating machine-induced soil disturbances: an assessment using absolute and relative soil

bulk density and penetration resistance. *Canadian Journal of Forest Research*, *49*(2), 164-178.

Laclau, J. P., Arnaud, M., Bouillet, J. P., & Ranger, J. (2001). Spatial distribution of Eucalyptus roots in a deep sandy soil in the Congo: relationships with the ability of the stand to take up water and nutrients. *Tree physiology*, *21*(2-3), 129-136.

Letey, J. O. H. N. (1985). Relationship between soil physical properties and crop production. *Advances in soil science*, 277-294.

Lipiec, J., Horn, R., Pietrusiewicz, J., & Siczek, A. (2012). Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. *Soil and Tillage Research*, *121*, 74-81.

Lipiec, J., & Hatano, R. (2003). Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, *116*(1-2), 107-136.

Lloret, F., Casanovas, C., & Penuelas, J. (1999). Seedling survival of Mediterranean shrubland species in relation to root: shoot ratio, seed size and water and nitrogen use. *Functional Ecology*, *13*(2), 210-216.

Mariotti, B., Hoshika, Y., Cambi, M., Marra, E., Feng, Z., Paoletti, E., & Marchi, E. (2020). Vehicle-induced compaction of forest soil affects plant morphological and physiological attributes: A meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, *462*, 118004.

Milanez, D. H., Amaral, R. M. D., Faria, L. I. L. D., & Gregolin, J. A. R. (2013). Assessing nanocellulose developments using science and technology indicators. *Materials Research*, *16*, 635-641.

Mohieddinne, H., Brasseur, B., Spicher, F., Gallet-Moron, E., Buridant, J., Kobaissi, A., & Horen, H. (2019). Physical recovery of forest soil after compaction by heavy machines, revealed by penetration resistance over multiple decades. *Forest Ecology and Management*, *449*, 117472.

Mósena, M., & Dillenburg, L. R. (2004). Early growth of Brazilian pine (Araucaria angustifolia [Bertol.] Kuntze) in response to soil compaction and drought. *Plant and Soil*, *258*, 293-306.

Mulholland, B. J., Black, C. R., Taylor, I. B., Roberts, J. A., & Lenton, J. R. (1996). Effect of soil compaction on barley (Hordeum vulgare L.) growth: I. Possible role for ABA as a root-sourced chemical signal. *Journal of Experimental Botany*, *47*(4), 539-549.

Myburg, A. A., Potts, B. M., Marques, C. M., Kirst, M., Gion, J. M., Grattapaglia, D., ... & Kole, C. (2007). Genome Mapping and Molecular Breeding in Plants, Volume 7, Forest Trees.

Oberschelp, G. P. J., Morales, L. L., Montecchiarini, M. L., Harrand, L., Podestá, F. E., & Margarit, E. (2022). Harder, better, faster, stronger: Frost tolerance of Eucalyptus benthamii under cold acclimation. *Plant Physiology and Biochemistry*, *186*, 64-75.

Oussible, M., Allmaras, R. R., Wynch, R. D., & Crookston, R. K. (1993). Subsurface compaction effects on tillering and nitrogen accumulation in wheat. *Agronomy Journal*, *85*(3), 619-625.

Peixoto, D. S., Silva, B. M., de Oliveira, G. C., Moreira, S. G., da Silva, F., & Curi, N. (2019). A soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under continuous no tillage system in Brazil. *Soil and Tillage Research*, *194*, 104307.

Poltorak, B. J., Labelle, E. R., & Jaeger, D. (2018). Soil displacement during ground-based mechanized forest operations using mixed-wood brush mats. *Soil and Tillage Research*, *179*, 96-104.

Prevedello, J., Kaiser, D. R., Reinert, D. J., Vogelmann, E. S., Fontanela, E., & Reichert, J. M. (2013). Manejo do solo e crescimento inicial de Eucalyptus grandis Hill ex Maiden em Argissolo. *Ciência Florestal*, *23*, 129-138.

Reichert, J. M., Albuquerque, J. A., Kaiser, D. R., Reinert, D. J., Urach, F. L., & Carlesso, R. (2009a). Estimation of water retention and availability in soils of Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *33*, 1547-1560.

Reichert, J. M., Bervald, C. M. P., Rodrigues, M. F., Kato, O. R., & Reinert, D. J. (2014). Mechanized land preparation in eastern Amazon in fire-free forest-based fallow systems as alternatives to slash-and-burn practices: hydraulic and mechanical soil properties. *Agriculture, ecosystems & environment*, *192*, 47-60.

Reichert, J. M., Brandt, A. A., Rodrigues, M. F., da Veiga, M., & Reinert, D. J. (2017). Is chiseling or inverting tillage required to improve mechanical and hydraulic properties of sandy clay loam soil under long-term no-tillage?. *Geoderma*, *301*, 72-79.

Reichert, J. M., Cechin, N. F., Reinert, D. J., Rodrigues, M. F., & Suzuki, L. E. A. S. (2018). Ground-based harvesting operations of Pinus taeda affects structure and pore functioning of clay and sandy clay soils. *Geoderma*, *331*, 38-49.

Reichert, J. M., da Rosa, V. T., Vogelmann, E. S., da Rosa, D. P., Horn, R., Reinert, D. J., ... & Denardin, J. E. (2016). Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. *Soil and Tillage Research*, *158*, 123-136.

Reichert, J. M., Fontanela, E., Awe, G. O., & Fasinmirin, J. T. (2021). Is cassava yield affected by inverting tillage, chiseling or additional compaction of no-till sandy-loam soil?. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *45*.

Reichert, J. M., Morales, B., Lima, E. M., de Bastos, F., Morales, C. A. S., & de Araújo, E. F. (2023). Soil morphological, physical and chemical properties affecting Eucalyptus spp. productivity on Entisols and Ultisols. *Soil and Tillage Research*, *226*, 105563.

Reichert, J. M., Morales, C. A. S., de Bastos, F., Sampietro, J. A., Cavalli, J. P., de Araújo, E. F., & Srinivasan, R. (2021). Tillage recommendation for commercial forest production: Should tillage be based on soil penetrability, bulk density or more complex, integrative properties?. *Geoderma Regional*, *25*, e00381.

Reichert, J. M., Morales, C. A. S., Lima, E. M., de Bastos, F., Sampietro, J. A., de Araújo, E. F., & Srinivasan, R. (2021). Best tillage practices for early-growth of clonal eucalyptus in soils with distinct granulometry, drainage and profile depth. *Soil and Tillage Research*, *212*, 105038.

Reichert, J. M., Rodrigues, M. F., Bervald, C. M. P., & Kato, O. R. (2016). Fire-free fallow management by mechanized chopping of biomass for sustainable agriculture in Eastern Amazon: Effects on soil compactness, porosity, and water retention and availability. *Land Degradation & Development*, *27*(5), 1403-1412.

Reichert, J. M., Suzuki, L. E. A. S., & Reinert, D. J. (2007). Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. *Tópicos em ciência do solo*, *5*, 49-134.

Reichert, J. M., Suzuki, L. E. A. S., Reinert, D. J., Horn, R., & Håkansson, I. (2009b). Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research*, *102*(2), 242-254.

Resquin, F., Navarro-Cerrillo, R. M., Carrasco-Letelier, L., & Rachid-Casnati, C. (2020). Influence of age and planting density on the energy content of Eucalyptus benthamii, Eucalyptus dunnii and Eucalyptus grandis planted in Uruguay. *New Forests*, *51*(4), 631-655.

Sampietro, J. A., Lopes, E. D. S., & Reichert, J. M. (2015). Compactação causada pelo tráfego de feller buncher e skidder em um Neossolo Regolítico sob distintas umidades. *Ciência Florestal*, *25*, 239-248.

Santos, R. D., Santos, H. G., Ker, J. C., Anjos, L. H. C., & Shimizu, S. H. (2015). Field Description and Soil Collect Manual. Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo.

Schumacher, M. V. (1995). *Naehrstoffkreislauf in verschiedenen Bestaenden von Eucalyptus saligna (Smith), Eucalyptus dunnii (Maiden) und Eucalyptus globulus (Labillardière) in Rio Grande do Sul, Brasilien*. na.

Selvi, K. Ç., Sağlam, M., & Dengiz, O. (2017). Geostatistical approach to determine the effects of different soil tillage methods on penetration resistance in a clayey soil. *INMATEH-Agricultural Engineering*, *52*(2).

Silva, S. R., Barros, N. F. D., Costa, L. M. D., Mendonça, E. D. S., & Leite, F. P. (2007). Alterações do solo influenciadas pelo tráfego e carga de um" forwarder" nas entrelinhas de uma floresta de eucalipto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *31*, 371-377.

Silva, V. R., Reinert, D. J., Reichert, J. M., & Soares, J. M. (2002). Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. I-Estado inicial de compactação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *26*, 1-8.

Simioni, F. J., de Almeida Buschinelli, C. C., Moreira, J. M. M. Á. P., dos Passos, B. M., & Girotto, S. B. F. T. (2018). Forest biomass chain of production: Challenges of small-scale forest production in southern Brazil. *Journal of Cleaner Production*, *174*, 889-898.

Sinnett, D., Morgan, G., Williams, M., & Hutchings, T. R. (2008). Soil penetration resistance and tree root development. *Soil Use and Management*, *24*(3), 273-280.

Smith, C. W., & Du Toit, B. (2005). The effect of harvesting operations, slash management and fertilisation on the growth of a Eucalyptus clonal hybrid on a sandy soil in Zululand, South Africa. *Southern African Forestry Journal*, *2005*(203), 15-26.

Smith, K. D., May, P. B., & Moore, G. M. (2001). The influence of compaction and soil strength on the establishment of four Australian landscape trees. *Journal of Arboriculture*, *27*(1), 1-7.

Suzuki, L. E. A. S., Lima, C. L. R. D., Reinert, D. J., Reichert, J. M., & Pillon, C. N. (2014). Estrutura e armazenamento de água em um Argissolo sob pastagem cultivada, floresta nativa e povoamento de eucalipto no Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *38*, 94-106.

Suzuki, L. E. A. S., Reichert, J. M., Reinert, D. J., & de Lima, C. L. R. (2015). Degree of compactness and mechanical properties of a subtropical Alfisol with eucalyptus, native forest, and grazed pasture. *Forest Science*, *61*(4), 716-722.

Suzuki, L. E. A. S., Reinert, D. J., Reichert, J. M., & Lima, C. L. R. D. (2008). Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *32*, 963-973.

Stape, J. L., Binkley, D., Ryan, M. G., Fonseca, S., Loos, R. A., Takahashi, E. N., ... & Azevedo, M. R. (2010). The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence

of water, nutrients and stand uniformity on wood production. *Forest Ecology and Management*, *259*(9), 1684-1694.

Valentine, T. A., Hallett, P. D., Binnie, K., Young, M. W., Squire, G. R., Hawes, C., & Bengough, A. G. (2012). Soil strength and macropore volume limit root elongation rates in many UK agricultural soils. *Annals of botany*, *110*(2), 259-270.

Vaz, C. M., Manieri, J. M., De Maria, I. C., & Tuller, M. (2011). Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. *Geoderma*, *166*(1), 92-101.

Voorhees, W. B. (1977). Our newest natural resource. Soil compaction. How it influences moisture, temperature, yield, root growth. Part 2.

Whalley, W. R., To, J., Kay, B. D., & Whitmore, A. P. (2007). Prediction of the penetrometer resistance of soils with models with few parameters. *Geoderma*, *137*(3-4), 370-377.

Williamson, J. R., & Neilsen, W. A. (2003). The effect of soil compaction, profile disturbance and fertilizer application on the growth of eucalypt seedlings in two glasshouse studies. *Soil and Tillage Research*, *71*(2), 95-107.

Wu, X., Li, H., Rengel, Z., Whalley, W. R., Li, H., Zhang, F., ... & Jin, K. (2022). Localized nutrient supply can facilitate root proliferation and increase nitrogen-use efficiency in compacted soil. *Soil and Tillage Research*, *215*, 105198.

Yamauchi, A. (1993). Significance of root system structure in relation to the stress tolerance in cereal crops. *Low-input sustainable crop production system in Asia*, 347-360.

Zou, C., Sands, R., Buchan, G., & Hudson, I. (2000). Least limiting water range: A potential indicator of physical quality of forest soils. *Soil Research*, *38*(5), 947-958.

4 CONCLUSÃO GERAL

A hipótese formulada sobre a influência prejudicial da compactação do solo no crescimento inicial de mudas florestais, especificamente na erva-mate e no *Eucalyptus benthamii*, foi parcialmente confirmada pelos resultados deste estudo.

No experimento com erva-mate, a compactação do solo teve influência na parte área das mudas clonais da cultivar BRS BLD Yari, o que não ocorreu nas seminais. No experimento com eucalipto, as mudas não tiveram influência da compactação do solo na parte aérea no período estudado.

No entanto, para ambos os experimentos, ocorreu subdesenvolvimento significativo do sistema radicular nas mudas submetidas à compactação do solo. Essa constatação reforça a importância crítica de abordagens que evitem a compactação do solo, destacando a necessidade de estratégias de manejo para garantir o desenvolvimento adequado dessas espécies florestais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do crescimento do mercado internacional da erva-mate, é essencial manter atenção dedicada à qualidade do solo e adotar práticas de cultivo sustentáveis. Isso é crucial para assegurar a produção de alta qualidade e preservar os recursos naturais.

Embora os fertilizantes possam mitigar os efeitos prejudiciais da compactação do solo, morte e tombamento de plantas de erva-mate, é fundamental compreender que a manutenção da produtividade e o alcance dos objetivos de sustentabilidade dependem da minimização da perturbação do solo.

A continuação da pesquisa, explorando diferentes variáveis, bem como diferentes materiais genéticos, prolongando os períodos experimentais, pode contribuir para uma compreensão mais aprofundada os impactos da compactação do solo no crescimento das mudas.

As conclusões deste estudo ressaltam a importância de considerar a qualidade física do solo nas operações florestais. Evitar condições que exacerbem esse problema deve ser uma prioridade nas práticas operacionais para a cultura da erva-mate e do *Eucalyptus benthamii*.

6 REFERÊNCIAS

Abrão, S. F., Rosa, S. F. D., Reinert, D. J., Reichert, J. M., & Ebling, Â. A. (2017). agregação de um cambissolo húmico em povoamentos de *Pinus taeda* L. com diferentes rotações. *Ciência Florestal*, *27*, 445-455.

Abreu, S. L., Reichert, J. M., & Reinert, D. J. (2004). Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *28*, 519-531.

Aguiar, N. S. D., Gabira, M. M., Santin, D., Deschamps, C., Helm, C. V., & Wendling, I. (2023). Planting seasons and environments in initial field establishment of yerba mate clonal cultivars in Southern Brazil. *Revista Ceres*, *70*, e70606.

Aksakal, E. L., Barik, K., Angin, I., Sari, S., & Islam, K. R. (2019). Spatio-temporal variability in physical properties of different textured soils under similar management and semi-arid climatic conditions. *Catena*, *172*, 528-546.

Alameda, D., & Villar, R. (2012). Linking root traits to plant physiology and growth in Fraxinus angustifolia Vahl. seedlings under soil compaction conditions. *Environmental and Experimental Botany*, *79*, 49-57.

Alameda, D., & Villar, R. (2009). Moderate soil compaction: implications on growth and architecture in seedlings of 17 woody plant species. *Soil and Tillage Research*, *103*(2), 325-331.

Alesso, C. A., Masola, M. J., Carrizo, M. E., Cipriotti, P. A., & Imhoff, S. D. (2019). Spatial variability of short-term effect of tillage on soil penetration resistance. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *65*(6), 822-832.

Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. D. M., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische zeitschrift*, *22*(6), 711-728.

Antoniazzi, M. S., Rocha, L. D., Souza, E. L., Guerra, D., Da Silva, D. M., & Redin, M. (2018). Análise da cultura da erva-mate como alternativa social, econômica e ambiental para comunidades rurais. *Extensão em Foco*, *1*(15).

Arnold, R., Li, B., Luo, J., Bai, F., & Baker, T. (2015). Selection of cold-tolerant Eucalyptus species and provenances for inland frost-susceptible, humid subtropical regions of southern China. *Australian Forestry*, *78*(3), 180-193.

Arshad, M. A., & Martin, S. (2002). Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agriculture, ecosystems & environment*, *88*(2), 153-160.

Arvidsson, J. (1999). Nutrient uptake and growth of barley as affected by soil compaction. *Plant and soil*, *208*, 9-19.

Assis, P. C., Stone, L. F., Medeiros, J. C., Madari, B. E., Oliveira, J. D. M., & Wruck, F. J. (2015). Atributos físicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, *19*, 309-316.

Atkinson, B. S., Sparkes, D. L., & Mooney, S. J. (2009). The impact of soil structure on the establishment of winter wheat (Triticum aestivum). *European Journal of Agronomy*, *30*(4), 243-257.

Atwell, B. J. (1990). The effect of soil compaction on wheat during early tillering: I. Growth, development and root structure. *New Phytologist*, *115*(1), 29-35.

Barrios, P. G., Bidegain, M. P., & Gutiérrez, L. (2015). Effects of tillage intensities on spatial soil variability and site-specific management in early growth of Eucalyptus grandis. *Forest Ecology and Management*, *346*, 41-50.

Bassett, I. E., Simcock, R. C., & Mitchell, N. D. (2005). Consequences of soil compaction for seedling establishment: implications for natural regeneration and restoration. *Austral Ecology*, *30*(8), 827-833.

Bejarano, M. D., Villar, R., Murillo, A. M., & Quero, J. L. (2010). Effects of soil compaction and light on growth of Quercus pyrenaica Willd. (Fagaceae) seedlings. *Soil and Tillage Research*, *110*(1), 108-114.

Bello-Bello, E., López-Arredondo, D., Rico-Chambrón, T. Y., & Herrera-Estrella, L. (2022). Conquering compacted soils: uncovering the molecular components of root soil penetration. *Trends in Plant Science*.

Bengough, A. G., McKenzie, B. M., Hallett, P. D., & Valentine, T. A. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of experimental botany*, *62*(1), 59-68.

Bengough, A. G., & Mullins, C. E. (1990). Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *Journal of soil science*, *41*(3), 341-358.

Bhering, S. B., Dos Santos, H. G., Manzatto, C. V., Bognola, I. A., Fasolo, P. J., de Carvalho, A. P., ... & Curcio, G. R. (2007). Mapa de solos do estado do Paraná.

Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Particle density. *Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods*, *5*, 377-382.

Blouin, V. M., Schmidt, M. G., Bulmer, C. E., & Krzic, M. (2008). Effects of compaction and water content on lodgepole pine seedling growth. *Forest Ecology and Management*, *255*(7), 2444-2452.

Blum, A. (2009). Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field crops research*, *112*(2-3), 119-123.

Borges, R., Boff, M. I. C., Mantovani, A., & Radomski, M. I. (2019). Effect of cover on the development and production of secondary compounds of Maytenus ilicifolia and Ilex paraguariensis in agroforestry systems. *Ciência Florestal*, *29*, 1630-1643.

Botwright Acuña, T. L., Pasuquin, E., & Wade, L. J. (2007). Genotypic differences in root penetration ability of wheat through thin wax layers in contrasting water regimes and in the field. *Plant and Soil*, *301*, 135-149.

Burdett, A. N. (1990). Physiological processes in plantation establishment and the development of specifications for forest planting stock. *Canadian Journal of Forest Research*, *20*(4), 415-427.

Burr-Hersey, J. E., Mooney, S. J., Bengough, A. G., Mairhofer, S., & Ritz, K. (2017). Developmental morphology of cover crop species exhibit contrasting behaviour to

changes in soil bulk density, revealed by X-ray computed tomography. *PLoS One*, *12*(7), e0181872.

Cambi, M., Certini, G., Neri, F., & Marchi, E. (2015). The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest ecology and management*, *338*, 124-138.

Cambi, M., Mariotti, B., Fabiano, F., Maltoni, A., Tani, A., Foderi, C., ... & Marchi, E. (2018). Early response of Quercus robur seedlings to soil compaction following germination. *Land Degradation & Development*, *29*(4), 916-925.

Carminati, A., Vetterlein, D., Weller, U., Vogel, H. J., & Oswald, S. E. (2009). When roots lose contact. *Vadose Zone Journal*, *8*(3), 805-809.

Cavalli, J. P., Reichert, J. M., Rodrigues, M. F., & de Araujo, E. F. (2020). Composition and functional soil properties of arenosols and acrisols: Effects on eucalyptus growth and productivity. *Soil and Tillage Research*, *196*, 104439.

Cecagno, D., de Andrade, S. E. V. G., Anghinoni, I., Kunrath, T. R., Martins, A. P., Reichert, J. M., ... & de Faccio Carvalho, P. C. (2016). Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. *Soil and Tillage Research*, *156*, 54-62.

Chou, S. C., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Gomes, J., ... & Marengo, J. (2014). Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. *American Journal of Climate Change*, *3*(05), 512.

Christina, M., Le Maire, G., Nouvellon, Y., Vezy, R., Bordon, B., Battie-Laclau, P., ... & Laclau, J. P. (2018). Simulating the effects of different potassium and water supply regimes on soil water content and water table depth over a rotation of a tropical Eucalyptus grandis plantation. *Forest Ecology and Management*, *418*, 4-14.

Collares, G. L., Reinert, D. J., Reichert, J. M., & Kaiser, D. R. (2006). Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, *41*, 1663-1674.

Colombi, T., & Keller, T. (2019). Developing strategies to recover crop productivity after soil compaction—A plant eco-physiological perspective. *Soil and Tillage Research*, *191*, 156-161.

Colombi, T., Kirchgessner, N., Walter, A., & Keller, T. (2017). Root tip shape governs root elongation rate under increased soil strength. *Plant Physiology*, *174*(4), 2289-2301.

Colombi, T., Torres, L. C., Walter, A., & Keller, T. (2018). Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth–A vicious circle. *Science of the Total Environment*, *626*, 1026-1035.

Colombi, T., & Walter, A. (2017). Genetic diversity under soil compaction in wheat: root number as a promising trait for early plant vigor. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 420.

Correa, J., Postma, J. A., & Wojciechowski, T. (2022). Phenotypic response to soil compaction varies among genotypes and correlates with plant size in sorghum. *Plant and Soil*, 1-18.

Correa, J., Postma, J. A., Watt, M., & Wojciechowski, T. (2019). Root system architectural plasticity and soil compaction: a review. *Journal of Experimental Botany*, *70*, 6019-6034.

Czarnes, S., Hiller, S., Dexter, A. R., Hallett, P. D., & Bartoli, F. (1999). Root: soil adhesion in the maize rhizosphere: the rheological approach. *Plant and Soil*, *211*, 69-86.

Dannowski, M. (1992). Das Penetrationsvermögen von Wurzeln unterschiedlicher Roggen-und Triticalegenotypen in Abhangigkeit von der Bodenlagerungsdichte. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *168*(3), 169-180.

Da Silva, P. H. M., Poggiani, F., Libardi, P. L., & Gonçalves, A. N. (2013). Fertilizer management of eucalypt plantations on sandy soil in Brazil: initial growth and nutrient cycling. *Forest Ecology and Management*, *301*, 67-78.

Da Veiga, M., Horn, R., Reinert, D. J., & Reichert, J. M. (2007). Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. *Soil and Tillage Research*, *92*(1-2), 104-113.

De Conti Medina, C., Neves, C. S. V. J., de Batista Fonseca, I. C., & Torreti, A. F. (2002). Crescimento radicular e produtividade de cana-de-açúcar em função de doses de vinhaça em fertirrigação. *Semina: Ciências Agrárias*, *23*(2), 179-184.

Dedecek, R. A., & Gava, J. L. (2005). Influência da compactação do solo na produtividade da rebrota de eucalipto. *Revista Árvore*, *29*, 383-390.

de Marins, A. C., Reichert, J. M., Secco, D., Rosa, H. A., & Veloso, G. (2018). Crambe grain yield and oil content affected by spatial variability in soil physical properties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *81*, 464-472.

Dexter, A. R., & Hewitt, J. S. (1978). The deflection of plant roots. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *23*(1), 17-22.

Dexter, A. R. (1986). Model experiments on the behaviour of roots at the interface between a tilled seed-bed and a compacted sub-soil: I. Effects of seed-bed aggregate size and sub-soil strength on wheat roots. *Plant and soil*, *95*, 123-133.

Dickey, E. C., Peterson, T., Eisenhauer, D. E., & Jasa, P. J. (1985). Soil Compaction I Where, how bad, a problem.

Domsch, H., Ehlert, D., Giebel, A., Witzke, K., & Boess, J. (2006). Evaluation of the soil penetration resistance along a transect to determine the loosening depth. *Precision Agriculture*, *7*, 309-326.

Dörner, J., Bravo, S., Stoorvogel, M., Dec, D., Valle, S., Clunes, J., ... & Zúñiga, F. (2022). Short-term effects of compaction on soil mechanical properties and pore functions of an Andisol. *Soil and Tillage Research*, *221*, 105396.

Drescher, M. S., Kaiser, D. R., Lima, C. L. R., Braida, J. A. (2023). Compactação do solo. In J. A. Albuquerque & P. I. Gubiani (Ed.), Física do Solo (344 p.). Santa Maria, RS: Pallotti.

Drewry, J. J., Cameron, K. C., & Buchan, G. D. (2008). Pasture yield and soil physical property responses to soil compaction from treading and grazing—a review. *Soil Research*, *46*(3), 237-256.

Eliasson, L. (2005). Effects of forwarder tyre pressure on rut formation and soil compaction. *Silva Fennica*, *39*(4), 549.

Elli, E. F., Sentelhas, P. C., de Freitas, C. H., Carneiro, R. L., & Alvares, C. A. (2019). Assessing the growth gaps of Eucalyptus plantations in Brazil–Magnitudes, causes and possible mitigation strategies. *Forest Ecology and Management*, *451*, 117464.

Fashi, F. H., Gorji, M., & Sharifi, F. (2019). Temporal variability of soil water content and penetration resistance under different soil management practices. *Journal of Soil and Water Conservation*, *74*(2), 188-198.

Fernandes, M. M. H., Coelho, A. P., da Silva, M. F., Bertonha, R. S., de Queiroz, R. F., Furlani, C. E. A., & Fernandes, C. (2020). Estimation of soil penetration resistance with standardized moisture using modeling by artificial neural networks. *Catena*, *189*, 104505.

Fernández, J. F., Rubin, L., Hartmann, P., Puhlmann, H., & von Wilpert, K. (2019). Initial recovery of soil structure of a compacted forest soil can be enhanced by technical treatments and planting. *Forest Ecology and Management*, *431*, 54-62.

Figueiredo, G. C., Silva, A. P. D., Tormena, C. A., Giarola, N. F. B., Moraes, S. O., & Almeida, B. G. D. (2011). Desenvolvimento de um consolidômetro pneumático: modelagem da compactação, penetrometria e resistência tênsil de agregados de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *35*, 389-402.

França, J. S., Reichert, J. M., Holthusen, D., Rodrigues, M. F., & de Araujo, E. F. (2021). Subsoiling and mechanical hole-drilling tillage effects on soil physical properties and initial growth of eucalyptus after eucalyptus on steeplands. *Soil and Tillage Research*, *207*, 104860.

Frigotto, T., Navroski, M. C., de Aguiar, N. S., Felippe, D., Borsoi, G. A., de Oliveira Pereira, M., & Lovatel, Q. C. (2020). Desempenho de espécies e procedências de Eucalyptus no Planalto Norte Catarinense, Brasil. *Sci. Forestalis*, *48*(127), e3273.

Gee, G. W., & Or, D. (2002). 2.4 Particle-size analysis. *Methods of soil analysis: Part 4 physical methods*, *5*, 255-293.

Geist, J. M., Hazard, J. W., & Seidel, K. W. (1989). Assessing physical conditions of some Pacific Northwest volcanic ash soils after forest harvest. *Soil Science Society of America Journal*, *53*(3), 946-950.

Gomez, A., Powers, R. F., Singer, M. J., & Horwath, W. R. (2002). Soil compaction effects on growth of young ponderosa pine following litter removal in California's Sierra Nevada. *Soil Science Society of America Journal*, *66*(4), 1334-1343.

Gómez-Aparicio, L., Pérez-Ramos, I. M., Mendoza, I., Matias, L., Quero, J. L., Castro, J., ... & Maranon, T. (2008). Oak seedling survival and growth along resource gradients in Mediterranean forests: implications for regeneration in current and future environmental scenarios. *Oikos*, *117*(11), 1683-1699.

Gonçalves, A. N., & Mello, S. L. D. M. (2015). O sistema radicular das árvores. *Nutrição e fertilização florestal*, 427-il.

Gonçalves, J. L., Alvares, C. A., Higa, A. R., Silva, L. D., Alfenas, A. C., Stahl, J., ... & 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.

Goulart, I. C. G. D. R., Santin, D., & Brasileiro, B. P. (2022). Fatores que afetam a produtividade na cultura da erva-mate. *Ciência Florestal*, *32*, 1345-1367.

Grzesiak, S., Grzesiak, M. T., Hura, T., Marcińska, I., & Rzepka, A. (2013). Changes in root system structure, leaf water potential and gas exchange of maize and triticale seedlings affected by soil compaction. *Environmental and Experimental Botany*, *88*, 2-10.

Haling, R. E., Simpson, R. J., Culvenor, R. A., Lambers, H., & Richardson, A. E. (2011). Effect of soil acidity, soil strength and macropores on root growth and morphology of perennial grass species differing in acid-soil resistance. *Plant, Cell & Environment*, *34*(3), 444-456.

Hamza, M. A., & Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and tillage research*, *82*(2), 121-145.

Heck, C. I., & De Mejia, E. G. (2007). Yerba Mate Tea (Ilex paraguariensis): a comprehensive review on chemistry, health implications, and technological considerations. *Journal of food science*, *72*(9), R138-R151.

Helliwell, J. R., Sturrock, C. J., Miller, A. J., Whalley, W. R., & Mooney, S. J. (2019). The role of plant species and soil condition in the structural development of the rhizosphere. *Plant, cell & environment*, *42*(6), 1974-1986.

Holthusen, D., Brandt, A. A., Reichert, J. M., & Horn, R. (2018a). Soil porosity, permeability and static and dynamic strength parameters under native forest/grassland compared to no-tillage cropping. *Soil and Tillage Research*, *177*, 113-124.

Holthusen, D., Brandt, A. A., Reichert, J. M., Horn, R., Fleige, H., & Zink, A. (2018b). Soil functions and in situ stress distribution in subtropical soils as affected by land use, vehicle type, tire inflation pressure and plant residue removal. *Soil and Tillage Research*, *184*, 78-92.

Horn, R., Vossbrink, J., Peth, S., & Becker, S. (2007). Impact of modern forest vehicles on soil physical properties. *Forest ecology and management*, *248*(1-2), 56-63.

Iijima, M. (1993). Effects of soil compaction on the yield response of four cereal species. *Crop Production and Improvement Technology in Asia*.

Iijima, M., Griffiths, B., & Bengough, A. G. (2000). Sloughing of cap cells and carbon exudation from maize seedling roots in compacted sand. *The New Phytologist*, *145*(3), 477-482.

Iijima, M., & Kono, Y. (1991). Interspecific differences of the root system structures of four cereal species as affected by soil compaction. *Japanese Journal of Crop Science*, *60*(1), 130-145.

Iijima, M., Kono, Y., Yamauchi, A., & Pardales Jr, J. R. (1991). Effects of soil compaction on the development of rice and maize root systems. *Environmental and Experimental Botany*, *31*(3), 333-342.

Imhoff, S., Da Silva, A. P., & Fallow, D. (2004). Susceptibility to compaction, load support capacity, and soil compressibility of Hapludox. *Soil Science Society of America Journal*, *68*(1), 17-24.

Jamshidi, R., Jaeger, D., & Dragovich, D. (2018). Establishment of pioneer seedling species on compacted skid tracks in a temperate Hyrcanian forest, northern Iran. *Environmental earth sciences*, *77*, 1-13.

Jesus, G. L. D., Silva, I. R., Almeida, L. F. J., Santos, M. A. D., Leite, F. P., & Neves, J. C. L. (2015). Produtividade do eucalipto, atributos físicos do solo e frações da matéria orgânica influenciadas pela intensidade de tráfego e resíduos de colheita. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *39*, 1190-1203.

Jin, K., White, P. J., Whalley, W. R., Shen, J., & Shi, L. (2017). Shaping an optimal soil by root–soil interaction. *Trends in Plant Science*, *22*(10), 823-829.

Jourgholami, M. (2018). Effects of soil compaction on growth variables in Cappadocian maple (Acer cappadocicum) seedlings. *Journal of forestry research*, *29*, 601-610.

Jourgholami, M., Khajavi, S., & Labelle, E. R. (2018). Mulching and water diversion structures on skid trails: Response of soil physical properties six years after harvesting. *Ecological engineering*, *123*, 1-9.

Koebernick, N., Daly, K. R., Keyes, S. D., George, T. S., Brown, L. K., Raffan, A., ... & Roose, T. (2017). High-resolution synchrotron imaging shows that root hairs influence rhizosphere soil structure formation. *New Phytologist*, *216*(1), 124-135.

Kondo, M. K., & Junior, D. (1999). Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *23*, 211-218.

Krejci, L. C., Martins, L. G. C., & Lourenço, P. Y. (1986). Desenvolvimento do sistema radicular de Eucalyptus sp sob diferentes condições de solo. *Salvador: COPENER*.

Kuhwald, M., Blaschek, M., Minkler, R., Nazemtseva, Y., Schwanebeck, M., Winter, J., & Duttmann, R. (2016). Spatial analysis of long-term effects of different tillage practices based on penetration resistance. *Soil Use and Management*, *32*(2), 240-249.

Kunz, M., Gonçalves, A. D. M. D. A., Reichert, J. M., Guimarães, R. M. L., Reinert, D. J., & Rodrigues, M. F. (2013). Compactação do solo na integração soja-pecuária de leite em Latossolo argiloso com semeadura direta e escarificação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *37*, 1699-1708.

Kuhwald, M., Hamer, W. B., Brunotte, J., & Duttmann, R. (2020). Soil penetration resistance after one-time inversion tillage: a spatio-temporal analysis at the field scale. *Land*, *9*(12), 482.

Labelle, E. R., Poltorak, B. J., & Jaeger, D. (2019). The role of brush mats in mitigating machine-induced soil disturbances: an assessment using absolute and relative soil bulk density and penetration resistance. *Canadian Journal of Forest Research*, *49*(2), 164-178.

Laclau, J. P., Arnaud, M., Bouillet, J. P., & Ranger, J. (2001). Spatial distribution of Eucalyptus roots in a deep sandy soil in the Congo: relationships with the ability of the stand to take up water and nutrients. *Tree physiology*, *21*(2-3), 129-136.

Letey, J. O. H. N. (1985). Relationship between soil physical properties and crop production. *Advances in soil science*, 277-294.

Liang, J., Zhang, J., Chan, G., & Wong, M. H. (1999). Can differences in root responses to soil drying and compaction explain differences in performance of trees growing on landfill sites?. *Tree physiology*, *19*(9), 619-624.

Lipiec, J., Horn, R., Pietrusiewicz, J., & Siczek, A. (2012). Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. *Soil and Tillage Research*, *121*, 74-81.

Lipiec, J., & Hatano, R. (2003). Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, *116*(1-2), 107-136.

Lloret, F., Casanovas, C., & Penuelas, J. (1999). Seedling survival of Mediterranean shrubland species in relation to root: shoot ratio, seed size and water and nitrogen use. *Functional Ecology*, *13*(2), 210-216.

Lucas, M. (2022). Perspectives from the Fritz-Scheffer Awardee 2020—The mutual interactions between roots and soil structure and how these affect rhizosphere processes#. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *185*(1), 8-18.

Lucas, M., Schlüter, S., Vogel, H. J., & Vetterlein, D. (2019). Roots compact the surrounding soil depending on the structures they encounter. *Scientific reports*, *9*(1), 16236.

Manschadi, A. M., Christopher, J., deVoil, P., & Hammer, G. L. (2006). The role of root architectural traits in adaptation of wheat to water-limited environments. *Functional plant biology*, *33*(9), 823-837.

Mariotti, B., Hoshika, Y., Cambi, M., Marra, E., Feng, Z., Paoletti, E., & Marchi, E. (2020). Vehicle-induced compaction of forest soil affects plant morphological and physiological attributes: A meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, *462*, 118004.

Marques, A. D. C., Reis, M. S. D., & Denardin, V. F. (2019). As paisagens da erva-mate: uso das florestas e conservação socioambiental. *Ambiente & Sociedade*, *22*.

Medrado, M. J. S., Lourenço, R. S., Rodigheri, H. R., Dedecek, R. A., Philipovsky, J. F., & Correa, G. (2000). Implantação de ervais.

Milanez, D. H., Amaral, R. M. D., Faria, L. I. L. D., & Gregolin, J. A. R. (2013). Assessing nanocellulose developments using science and technology indicators. *Materials Research*, *16*, 635-641.

Mohieddinne, H., Brasseur, B., Spicher, F., Gallet-Moron, E., Buridant, J., Kobaissi, A., & Horen, H. (2019). Physical recovery of forest soil after compaction by heavy machines, revealed by penetration resistance over multiple decades. *Forest Ecology and Management*, *449*, 117472.

Mósena, M., & Dillenburg, L. R. (2004). Early growth of Brazilian pine (Araucaria angustifolia [Bertol.] Kuntze) in response to soil compaction and drought. *Plant and Soil*, *258*, 293-306.

Mulholland, B. J., Black, C. R., Taylor, I. B., Roberts, J. A., & Lenton, J. R. (1996). Effect of soil compaction on barley (Hordeum vulgare L.) growth: I. Possible role for ABA as a root-sourced chemical signal. *Journal of Experimental Botany*, *47*(4), 539-549.

Mueller, C. W., Baumert, V., Carminati, A., Germon, A., Holz, M., Kögel-Knabner, I., ... & Vidal, A. (2024). From rhizosphere to detritusphere–Soil structure formation driven by plant roots and the interactions with soil biota. *Soil Biology and Biochemistry*, 109396.

Munns, E. N. (1947). Forest Management on Municipal Water Source Areas. *Journal of Forestry*, *45*(5), 315-322.

Myburg, A. A., Potts, B. M., Marques, C. M., Kirst, M., Gion, J. M., Grattapaglia, D., ... & Kole, C. (2007). Genome Mapping and Molecular Breeding in Plants, Volume 7, Forest Trees.

Nolz, R., Cepuder, P., Balas, J., & Loiskandl, W. (2016). Soil water monitoring in a vineyard and assessment of unsaturated hydraulic parameters as thresholds for irrigation management. *Agricultural Water Management*, *164*, 235-242.

Oberschelp, G. P. J., Morales, L. L., Montecchiarini, M. L., Harrand, L., Podestá, F. E., & Margarit, E. (2022). Harder, better, faster, stronger: Frost tolerance of Eucalyptus benthamii under cold acclimation. *Plant Physiology and Biochemistry*, *186*, 64-75.

Oliveira, J. E. D., & Esselin, P. M. (2019). Uma etno-história da erva-mate e dos povos indígenas de língua guarani na região Platina: da Província do Guairá ao Antigo Sul de Mato Grosso. *Fronteiras e interculturalidade. 1º edição. Tubarão, SC: Copiart*.

Orzech, K., Wanic, M., & Załuski, D. (2021). The effects of soil compaction and different tillage systems on the bulk density and moisture content of soil and the yields of winter oilseed rape and cereals. *Agriculture*, *11*(7), 666.

Otto, R., Silva, A. D., Franco, H. C. J., Oliveira, E. D., & Trivelin, P. C. O. (2011). High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. *Soil and tillage research*, *117*, 201-210. Reitz, R., Klein, R. M., & Reis, A. (1983). Projeto madeira do rio grande do sul. *Sellowia.*

Oussible, M., Allmaras, R. R., Wynch, R. D., & Crookston, R. K. (1993). Subsurface compaction effects on tillering and nitrogen accumulation in wheat. *Agronomy Journal*, *85*(3), 619-625.

Page-Dumroese, D. S., Jurgensen, M., & Terry, T. (2010). Maintaining soil productivity during forest or biomass-to-energy thinning harvests in the western United States. *Western Journal of Applied Forestry*, *25*(1), 5-11.

Passioura, J. B. (2002). Soil conditions and plant growth. *Plant, Cell & Environment*, *25*(2), 311-318.

Peixoto, D. S., Silva, B. M., de Oliveira, G. C., Moreira, S. G., da Silva, F., & Curi, N. (2019). A soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under continuous no tillage system in Brazil. *Soil and Tillage Research*, *194*, 104307.

Pfeifer, J., Kirchgessner, N., & Walter, A. (2014). Artificial pores attract barley roots and can reduce artifacts of pot experiments. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *177*(6), 903-913.

Phalempin, M., Landl, M., Wu, G. M., Schnepf, A., Vetterlein, D., & Schlüter, S. (2022). Maize root-induced biopores do not influence root growth of subsequently grown maize plants in well aerated, fertilized and repacked soil columns. *Soil and Tillage Research*, *221*, 105398.

Phalempin, M., Lippold, E., Vetterlein, D., & Schlüter, S. (2021). Soil texture and structure heterogeneity predominantly governs bulk density gradients around roots. *Vadose Zone Journal*, *20*(5), e20147.

Poltorak, B. J., Labelle, E. R., & Jaeger, D. (2018). Soil displacement during ground-based mechanized forest operations using mixed-wood brush mats. *Soil and Tillage Research*, *179*, 96-104.

Prevedello, J., Kaiser, D. R., Reinert, D. J., Vogelmann, E. S., Fontanela, E., & Reichert, J. M. (2013). Manejo do solo e crescimento inicial de Eucalyptus grandis Hill ex Maiden em Argissolo. *Ciência Florestal*, *23*, 129-138.

Quero, J. L., Gómez-Aparicio, L., Zamora, R., & Maestre, F. T. (2008). Shifts in the regeneration niche of an endangered tree (Acer opalus ssp. granatense) during ontogeny: using an ecological concept for application. *Basic and Applied Ecology*, *9*(6), 635-644.

Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., & Vogel, H. J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma*, *314*, 122-137.

Ramos, I. P. (2007). Factores que condicionan la regeneración natural de especies leñosas en un bosque mediterráneo del sur de la Península Ibérica. *Ecosistemas*, *16*(2).

Ramos, M. F., da Silva Almeida, W. R., do Amaral, R. D. L., & Suzuki, L. E. A. S. (2022). Degree of compactness and soil quality of peach orchards with different production ages. *Soil and Tillage Research*, *219*, 105324.

Reichert, J. M., Albuquerque, J. A., Kaiser, D. R., Reinert, D. J., Urach, F. L., & Carlesso, R. (2009a). Estimation of water retention and availability in soils of Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *33*, 1547-1560.

Reichert, J. M., Bervald, C. M. P., Rodrigues, M. F., Kato, O. R., & Reinert, D. J. (2014). Mechanized land preparation in eastern Amazon in fire-free forest-based fallow systems as alternatives to slash-and-burn practices: hydraulic and mechanical soil properties. *Agriculture, ecosystems & environment*, *192*, 47-60.

Reichert, J. M., Brandt, A. A., Rodrigues, M. F., da Veiga, M., & Reinert, D. J. (2017). Is chiseling or inverting tillage required to improve mechanical and hydraulic properties of sandy clay loam soil under long-term no-tillage?. *Geoderma*, *301*, 72-79.

Reichert, J. M., Cechin, N. F., Reinert, D. J., Rodrigues, M. F., & Suzuki, L. E. A. S. (2018). Ground-based harvesting operations of Pinus taeda affects structure and pore functioning of clay and sandy clay soils. *Geoderma*, *331*, 38-49.

Reichert, J. M., da Rosa, V. T., Vogelmann, E. S., da Rosa, D. P., Horn, R., Reinert, D. J., ... & Denardin, J. E. (2016). Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. *Soil and Tillage Research*, *158*, 123-136.

Reichert, J. M., Fontanela, E., Awe, G. O., & Fasinmirin, J. T. (2021). Is cassava yield affected by inverting tillage, chiseling or additional compaction of no-till sandy-loam soil?. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *45*.

Reichert, J. M., Morales, B., Lima, E. M., de Bastos, F., Morales, C. A. S., & de Araújo, E. F. (2023). Soil morphological, physical and chemical properties affecting Eucalyptus spp. productivity on Entisols and Ultisols. *Soil and Tillage Research*, *226*, 105563.

Reichert, J. M., Morales, C. A. S., de Bastos, F., Sampietro, J. A., Cavalli, J. P., de Araújo, E. F., & Srinivasan, R. (2021). Tillage recommendation for commercial forest production: Should tillage be based on soil penetrability, bulk density or more complex, integrative properties?. *Geoderma Regional*, *25*, e00381.

Reichert, J. M., Morales, B., Lima, E. M., de Bastos, F., Morales, C. A. S., & de Araújo, E. F. (2023). Soil morphological, physical and chemical properties affecting Eucalyptus spp. productivity on Entisols and Ultisols. *Soil and Tillage Research*, *226*, 105563.

Reichert, J. M., Morales, C. A. S., Lima, E. M., de Bastos, F., Sampietro, J. A., de Araújo, E. F., & Srinivasan, R. (2021). Best tillage practices for early-growth of clonal eucalyptus in soils with distinct granulometry, drainage and profile depth. *Soil and Tillage Research*, *212*, 105038.

Reichert, J. M., Rodrigues, M. F., Bervald, C. M. P., & Kato, O. R. (2016). Fire-free fallow management by mechanized chopping of biomass for sustainable agriculture in Eastern Amazon: Effects on soil compactness, porosity, and water retention and availability. *Land Degradation & Development*, *27*(5), 1403-1412.

Reichert, J. M., Suzuki, L. E. A. S., & Reinert, D. J. (2007). Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. *Tópicos em ciência do solo*, *5*, 49-134.

Reichert, J. M., Suzuki, L. E. A. S., Reinert, D. J., Horn, R., & Håkansson, I. (2009b). Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research*, *102*(2), 242-254.

Resquin, F., Navarro-Cerrillo, R. M., Carrasco-Letelier, L., & Rachid-Casnati, C. (2020). Influence of age and planting density on the energy content of *Eucalyptus*

benthamii, *Eucalyptus dunnii* and *Eucalyptus grandis* planted in Uruguay. *New Forests*, *51*(4), 631-655.

Sampietro, J. A., Lopes, E. D. S., & Reichert, J. M. (2015). Compactação causada pelo tráfego de feller buncher e skidder em um Neossolo Regolítico sob distintas umidades. *Ciência Florestal*, *25*, 239-248.

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*, 571-579.

Santos, R. D., Santos, H. G., Ker, J. C., Anjos, L. H. C., & Shimizu, S. H. (2015). Field Description and Soil Collect Manual. Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo.

Santos, R. D., Santos, H. G., Ker, J. C., Anjos, L. H. C., & Shimizu, S. H. (2015). Field Description and Soil Collect Manual. Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo.

Schumacher, M. V. (1995). *Naehrstoffkreislauf in verschiedenen Bestaenden von Eucalyptus saligna (Smith), Eucalyptus dunnii (Maiden) und Eucalyptus globulus (Labillardière) in Rio Grande do Sul, Brasilien*. na.

Seixas, F., & Souza, C. R. D. (2007). Avaliação e efeito da compactação do solo, devido à freqüência de tráfego, na produção de madeira de eucalipto. *Revista Árvore*, *31*, 1047-1052.

Selvi, K. Ç., Sağlam, M., & Dengiz, O. (2017). Geostatistical approach to determine the effects of different soil tillage methods on penetration resistance in a clayey soil. *INMATEH-Agricultural Engineering*, *52*(2).

Silva, A. P., Kay, B. D., & Perfect, E. (1994). Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Science Society of America Journal*, *58*, 1775-81.

Silva, A. P., Libardi, P. L., & Camargo, O. A. (1986). Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *10*(2), 91-5.

Silva, F. R. D., Albuquerque, J. A., & Costa, A. D. (2014). Crescimento inicial da cultura da soja em Latossolo Bruno com diferentes graus de compactação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *38*, 1731-1739.

Silva, S. R., Barros, N. F. D., Costa, L. M. D., Mendonça, E. D. S., & Leite, F. P. (2007). Alterações do solo influenciadas pelo tráfego e carga de um" forwarder" nas entrelinhas de uma floresta de eucalipto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *31*, 371-377.

Silva, V. R., Reinert, D. J., Reichert, J. M., & Soares, J. M. (2002). Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. I-Estado inicial de compactação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *26*, 1-8.

Simioni, F. J., de Almeida Buschinelli, C. C., Moreira, J. M. M. Á. P., dos Passos, B. M., & Girotto, S. B. F. T. (2018). Forest biomass chain of production: Challenges of small-scale forest production in southern Brazil. *Journal of Cleaner Production*, *174*, 889-898.

Sinnett, D., Morgan, G., Williams, M., & Hutchings, T. R. (2008). Soil penetration resistance and tree root development. *Soil Use and Management*, *24*(3), 273-280.

Smith, C. W., & Du Toit, B. (2005). The effect of harvesting operations, slash management and fertilisation on the growth of a Eucalyptus clonal hybrid on a sandy soil in Zululand, South Africa. *Southern African Forestry Journal*, *2005*(203), 15-26.

Smith, K. D., May, P. B., & Moore, G. M. (2001). The influence of compaction and soil strength on the establishment of four Australian landscape trees. *Journal of Arboriculture*, *27*(1), 1-7.

Souza, R., Hartzell, S., Ferraz, A. P. F., de Almeida, A. Q., de Sousa Lima, J. R., Antonino, A. C. D., & de Souza, E. S. (2021). Dynamics of soil penetration resistance in water-controlled environments. *Soil and Tillage Research*, *205*, 104768.

Suzuki, L. E. A. S., Lima, C. L. R. D., Reinert, D. J., Reichert, J. M., & Pillon, C. N. (2014). Estrutura e armazenamento de água em um Argissolo sob pastagem cultivada, floresta nativa e povoamento de eucalipto no Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *38*, 94-106.

Suzuki, L. E. A. S., Reichert, J. M., Reinert, D. J., & de Lima, C. L. R. (2015). Degree of compactness and mechanical properties of a subtropical Alfisol with eucalyptus, native forest, and grazed pasture. *Forest Science*, *61*(4), 716-722.

Suzuki, L. E. A. S., Reinert, D. J., Reichert, J. M., & Lima, C. L. R. D. (2008). Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *32*, 963-973.

Stape, J. L., Binkley, D., Ryan, M. G., Fonseca, S., Loos, R. A., Takahashi, E. N., ... & Azevedo, M. R. (2010). The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. *Forest Ecology and Management*, *259*(9), 1684-1694.

Steinbrenner, E. C., & Gessel, S. P. (1955). The effect of tractor logging on physical properties of some forest soils in southwestern Washington. *Soil Science Society of America Journal*, *19*(3), 372-376.

Sturion, J. A., Stuepp, C. A., & Wendling, I. (2017). Genetic parameters estimates and visual selection for leaves production in Ilex paraguariensis. *Bragantia*, *76*, 492-500.

Tian, M., Qin, S., Whalley, W. R., Zhou, H., Ren, T., & Gao, W. (2022). Changes of soil structure under different tillage management assessed by bulk density, penetrometer resistance, water retention curve, least limiting water range and X-ray computed tomography. *Soil and Tillage Research*, *221*, 105420.

Tormena, C. A., Barbosa, M. C., Costa, A. C. S. D., & Gonçalves, A. C. A. (2002). Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. *Scientia agrícola*, *59*, 795-801.

Tormena, C. A., Roloff, G., & Sá, J. C. M. (1998). Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *22*, 301-309.

Tormena, C. A., Silva, A. D., & Libardi, P. L. (1998). Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, *22*, 573-581.

Valentine, T. A., Hallett, P. D., Binnie, K., Young, M. W., Squire, G. R., Hawes, C., & Bengough, A. G. (2012). Soil strength and macropore volume limit root elongation rates in many UK agricultural soils. *Annals of botany*, *110*(2), 259-270.

Vaz, C. M., Manieri, J. M., De Maria, I. C., & Tuller, M. (2011). Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. *Geoderma*, *166*(1), 92-101.

Veihmeyer, F. J., & Hendrickson, A. H. (1949). Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils. *Soil science*, *68*(1), 75-94.

Voorhees, W. B. (1977). Our newest natural resource. Soil compaction. How it influences moisture, temperature, yield, root growth. Part 2.

Wendling, I. (2004). Propagação vegetativa de erva-mate (Ilex paraguariensis Saint Hilaire): estado da arte e tendências futuras.

Wendling, I., Santarosa, E., Penteado Junior, J., Auer, C. G., Penteado, S., De Queiroz, D. L., & Dos Santos, A. F. (2020). Manual de produção de mudas clonais de erva-mate.

Wendling, I., & Santin, D. (2015). Propagação e nutrição de erva-mate. *Brasília: Embrapa*.

Wendling, I., Sturion, J. A., Reis, C. A. F., Stuepp, C. A., & Peña, M. L. P. (2016). Indirect and expedite assessment of Ilex paraguariensis commercial yield. *Cerne*, *22*, 241-248.

Wendling, I., Sturion, J. A., & Santin, D. (2017). BRS 408 e BRS 409: cultivares clonais de erva-mate para produção de massa foliar.

Whiteley, G. M., Hewitt, J. S., & Dexter, A. R. (1982). The buckling of plant roots. *Physiologia Plantarum*, *54*(3), 333-342.

Williamson, J. R., & Neilsen, W. A. (2003). The effect of soil compaction, profile disturbance and fertilizer application on the growth of eucalypt seedlings in two glasshouse studies. *Soil and Tillage Research*, *71*(2), 95-107.

Wu, X., Li, H., Rengel, Z., Whalley, W. R., Li, H., Zhang, F., ... & Jin, K. (2022). Localized nutrient supply can facilitate root proliferation and increase nitrogen-use efficiency in compacted soil. *Soil and Tillage Research*, *215*, 105198.

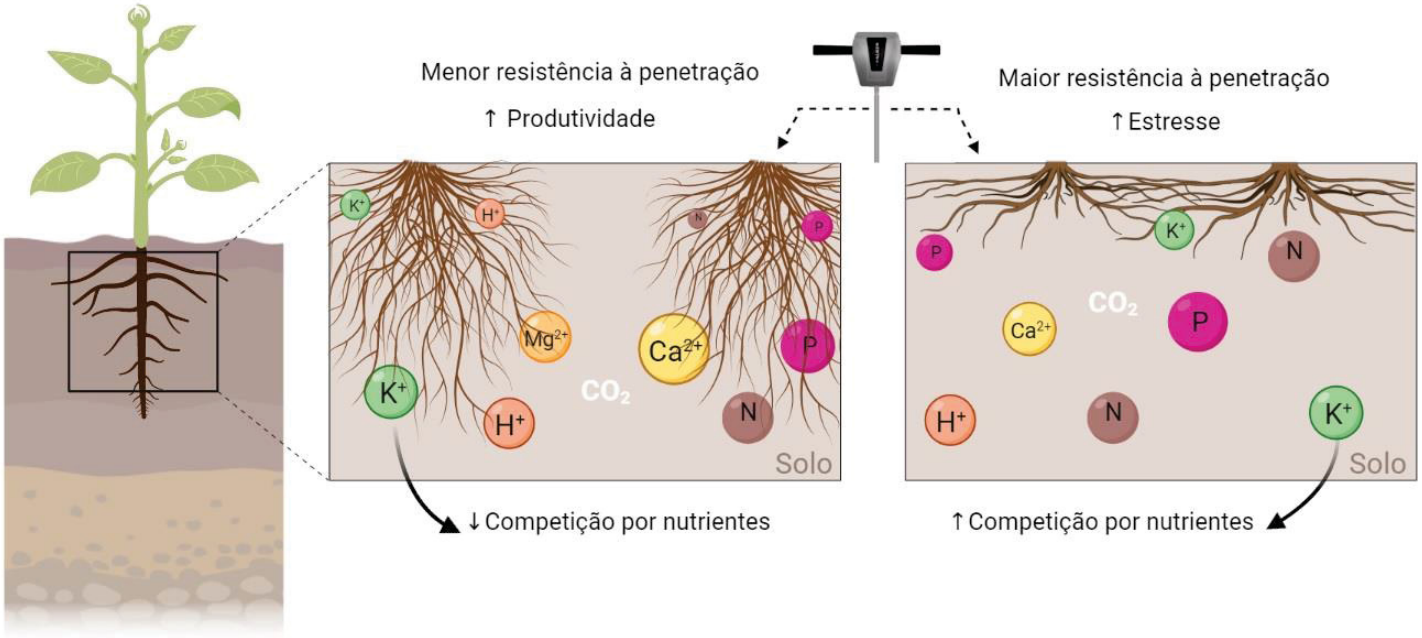
Xiong, P., Zhang, Z., Guo, Z., & Peng, X. (2022). Macropores in a compacted soil impact maize growth at the seedling stage: Effects of pore diameter and density. *Soil and Tillage Research*, *220*, 105370.

Yamauchi, A. (1993). Significance of root system structure in relation to the stress tolerance in cereal crops. *Low-input sustainable crop production system in Asia*, 347-360.

Yu, C., Mawodza, T., Atkinson, B. S., Atkinson, J. A., Sturrock, C. J., Whalley, R., ... & Mooney, S. J. (2023). The effects of soil compaction on wheat seedling root growth are specific to soil texture and soil moisture status. *Rhizosphere*, 100838.

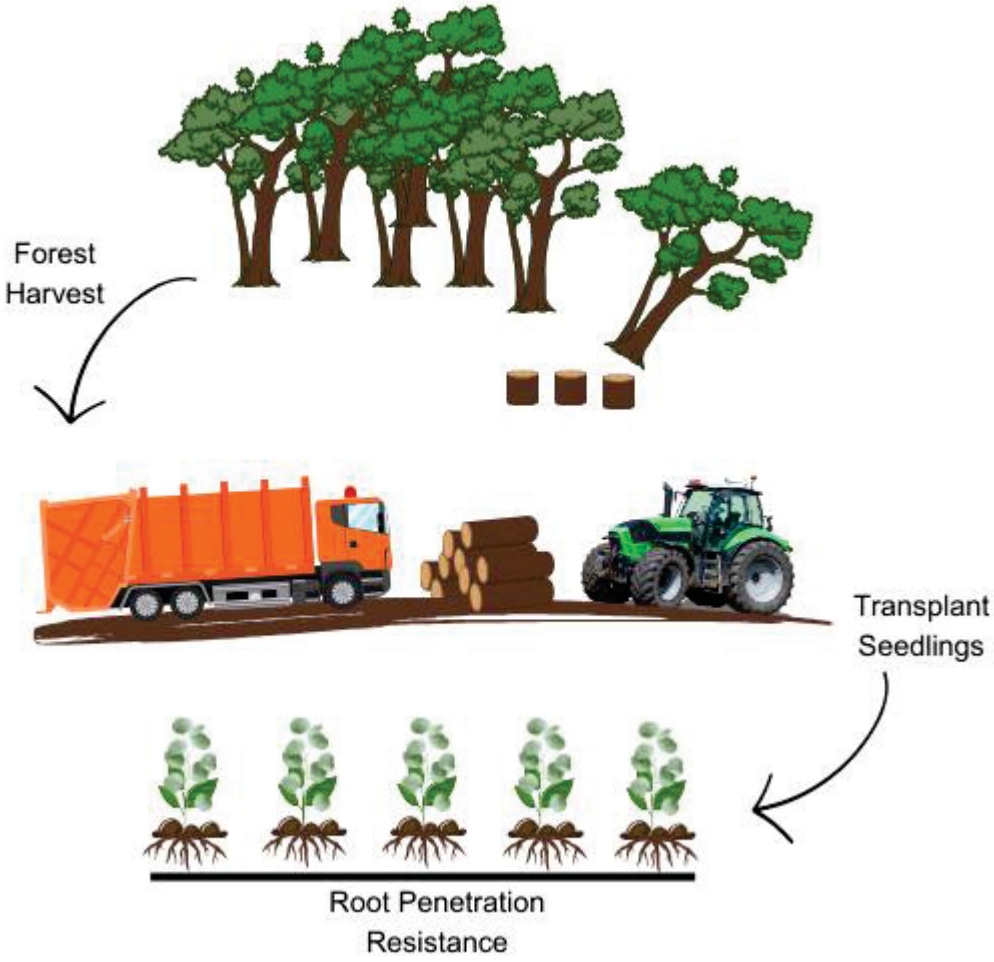
Zou, C., Sands, R., Buchan, G., & Hudson, I. (2000). Least limiting water range: A potential indicator of physical quality of forest soils. *Soil Research*, *38*(5), 947-958.

APÊNDICE 1 – PARÂMETROS DE PLANTA E SOLO INFLUENCIADOS PELO AUMENTO DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DO SOLO



Fonte: A autora (2024).

APÊNDICE 2 – COMPACTION IN FOREST SOILS



Fonte: A autora (2024).