

JÉSSICA CONCEIÇÃO NUNES SILVA

**TOLERÂNCIA DE CLONES DE EUCALIPTO À COMPACTAÇÃO
DO SOLO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

S586t
2018

Silva, Jéssica Conceição Nunes, 1991-
Tolerância de clones de eucalipto à compactação do solo /
Jéssica Conceição Nunes Silva. – Viçosa, MG, 2018.
xii, 71 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Teógenes Senna de Oliveira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 55-66.

1. Solos - Compactação. 2. Raízes (Botânica) - Morfologia.
3. Plantas - Nutrição. 4. Biomassa florestal. 5. Eucalipto.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos.
Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas. II.
Título.

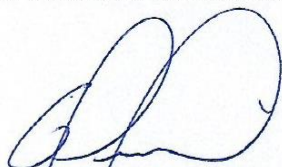
CDD 22. ed. 631.4

JÉSSICA CONCEIÇÃO NUNES SILVA

TOLERÂNCIA DE CLONES DE EUCALIPTO À COMPACTAÇÃO DO SOLO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

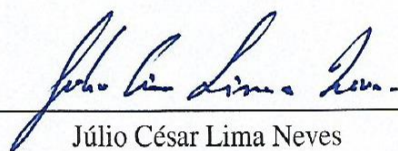
APROVADA: 27 de setembro de 2018.



Guilherme Luiz de Jesus



Leonardus Vergutz



Júlio César Lima Neves
(Coorientador)



Teógenes Senna de Oliveira
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a Nossa Senhora da Conceição, minha padroeira, por todas as graças alcançadas durante esse período de estudos na cidade de Viçosa-Minas Gerais.

Aos meus familiares, pelo apoio, em especial à minha preciosa mãe, Selma Nunes e aos meus irmãos: Luís, Gleice, Cássia e Camille, pelo amor e confiança.

À Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade de realização do mestrado em Solos e Nutrição de Plantas

Ao professor Teógenes Senna de Oliveira, pela orientação, disponibilidade e ensinamentos dados nessa etapa fundamental da minha vida profissional.

Ao professor Júlio César Lima Neves, pela coorientação, apoio, paciência e gentileza ao longo da realização desse trabalho.

A todos os professores do Departamento de Solos, em especial ao professor Leonardus Vergutz, pela ajuda com os cálculos da adubação de cobertura. Aos professores Raphael Bragança e Genelício Crusoé, pela belíssima coordenação do Departamento.

Aos técnicos e professores responsáveis pelos laboratórios, de Física, Fertilidade, Espectrometria, Geoquímica, Celulose e Papel e Compactação (CBR), respectivamente dos Departamentos de Solos, Engenharia Florestal e Engenharia Civil da UFV.

Aos vários amigos que fiz na cidade de Viçosa. Égua, essa foi a melhor parte! Especialmente a Aline, Javier, Angélica, Rafael, Fernanda, Vanessa, Jhonatas, Arlindo e Demétrios. Obrigada por todos os momentos de descontração, amizade, estudos e companheirismo. Grata!

A Cristian por toda ajuda e companheirismo durante esta etapa de nossa formação pessoal e profissional, sem dúvida, uma das melhores das nossas vidas.

À empresa Celulose Nipo-brasileira S/A (Cenibra) pelo fornecimento dos materiais genéticos utilizados no estudo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado.

A todos, o meu muito obrigada!

BIOGRAFIA DO AUTOR

JÉSSICA CONCEIÇÃO NUNES SILVA, filha primogênita de Francisca Selma Nunes Silva, nasceu em 18 de abril de 1991, em Santarém, estado do Pará, Brasil.

Em 2009, concluiu o ensino médio na Escola Estadual de Ensino Fundamental e Médio Nossa Senhora Aparecida, com estágio no Instituto de Estudos Integrados Cidadão da Amazônia –INEA Amazônia, em Santarém, PA.

Em 2010, cursou pré-vestibular no projeto Pré – vestibular solidário (PPVS) da Universidade Federal do Oeste do Pará – UFOPA, campus Santarém, PA.

Em 2011, iniciou o curso de graduação em Engenharia Florestal pela Universidade Federal do Oeste do Pará – UFOPA, campus de Santarém, PA. Onde foi estagiária do laboratório de sementes florestais da Amazônia, atuou na área de sistemas agroflorestais (SAF's), atuando também no Projeto Saúde e Alegria, com reflorestamento de áreas de capoeira degradadas e na Embrapa Amazônia Ocidental, com avaliações de atributos físicos do solo de sistemas de integração Lavoura, Pecuária e Floresta (iLPF). Foi também bolsista de iniciação científica na área de física e manejo do solo, uso de sistemas agroflorestais e agricultura familiar, assim como monitora das disciplinas Sociedade, Natureza e Desenvolvimento e propriedades e classificação de solos, graduando-se em junho de 2016.

Em julho de 2016, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, da Universidade Federal de Viçosa, em nível de mestrado, atuando na linha de pesquisa: Alterações de Propriedades Edáficas em Diferentes Sistemas de Manejo, submetendo-se à defesa em setembro de 2018.

RESUMO

NUNES SILVA, Jéssica Conceição, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2018. **Tolerância de clones de eucalipto à compactação do solo.** Orientador: Teógenes Senna de Oliveira. Coorientador: Júlio César Lima Neves.

A compactação do solo no setor florestal promove a diminuição da produtividade dos sítios florestais, o que leva a necessidade de identificação de materiais genéticos mais aptos a essa condição. Objetivou-se avaliar o crescimento e a eficiência nutricional de clones de eucalipto submetidos a diferentes graus de compactação do solo, em condições controladas, na tentativa de classificar e selecionar aqueles mais aptos. O experimento foi conduzido com material de Latossolo Vermelho Amarelo (LVA), utilizando mudas de 16 clones de eucalipto (35 dias). Essas mudas foram submetidas a três graus de compactação (GC) do solo: 75% (GC1); 85% (GC2) e 92% (GC3). O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial com três graus de compactação e 16 clones. As mudas foram conduzidas em estruturas de PVC (0,25 m de altura e 0,10 m de diâmetro) por 60 dias, tendo sido avaliados: altura (H), diâmetro (Dc), taxa de crescimento (TCA), área foliar específica (AFE), produção de matéria seca (MS) e sua respectiva partição (PART), a morfologia radicular e o índice de qualidade Dickson (IQD), assim como as eficiências de aquisição (EA), translocação (ET) e utilização (EU) dos nutrientes pelos clones. Os dados foram submetidos à análise de variância, seguido do desdobramento da interação e comparações de médias por contrastes ortogonais ($p < 0,05$). Os resultados permitiram a classificação dos clones em quatro grupos utilizando a ANOVA e do Índice Kappa de Fleiss (KF). Altura e diâmetro apresentaram-se pouco sensíveis, enquanto a morfologia radicular, conteúdos e eficiência de utilização altamente seletivas. As melhores respostas ao crescimento e produção de matéria seca foram observadas para os clones 4, 7, 8, 9, 10, 11, 14, 15 e 16, não tendo sido observadas perdas de altura e matéria seca de folha, caule, parte aérea e raízes finas e grossas. Os clones 10, 11 e 16 também conseguiram conviver com a compactação do solo, porém destacaram-se por não modificarem a morfologia radicular. Já os clones 2, 5, 6, 12 e 13 foram os que mais sensíveis aos efeitos da compactação do solo. No geral, pode-se recomendar os clones 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 14 e 16 como aqueles potencialmente tolerantes à compactação, o que poderá ser validado em avaliações em condições de campo.

ABSTRACT

NUNES SILVA, Jéssica Conceição, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, September 2018. **Tolerance of *eucalyptus* clones to soil compaction.** Adviser: Teógenes Senna de Oliveira. Co-adviser: Júlio César Lima Neves.

Soil compaction in the forestry sector promotes the decrease of the productivity of forest sites, which leads to the need to identify genetic materials more suitable to this condition. The objective of this study was to evaluate growth and nutritional efficiency of eucalyptus clones submitted to different degrees of soil compaction under controlled conditions to classify and select the most suitable ones. The experiment was conducted with Oxisols, using seedlings of 16 eucalyptus clones (35 days). These seedlings were submitted to three degrees of compaction (DC) of the soil: 75% (DC1); 85% (DC2) and 92% (DC3). The experimental design was completely randomized in a factorial scheme with three degrees of compaction and 16 clones. The seedlings were conducted in PVC (0.25 m high and 0.10 m diameter) for 60 days, it was assessed: height (H), diameter (Dc), growth rate (TCA), leaf area (AFE), dry matter production (DM) and their respective partition (PART), root morphology and Dickson quality index (IQD), as well as absorption efficiencies (EA), translocation (ET) and utilization (EU) of nutrients by the clones. The data were subjected to analysis of variance, followed by the unfolding of the interaction and comparisons of means by orthogonal contrasts ($p < 0.05$). The results allowed the clones to be classified into four groups using ANOVA and the Fleiss Kappa Index (KF). Height and diameter were not extremely sensitive, while root morphology, content and efficiency of use were highly selective. The best responses to growth and dry matter production were observed for clones 4, 7, 8, 9, 10, 11, 14, 15 and 16, with no loss of height and dry matter of leaf, stem, aerial part and thin and thick roots. Clones 10, 11 and 16 also managed to live with soil compaction, however they stood out for not changing the root morphology. Clones 2, 5, 6, 12 and 13 were the most sensitive to the effects of soil compaction. In general, clones 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 14 and 16 can be recommended as those potentially tolerant to compaction, which can be validated in evaluations under field conditions.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Produtividade florestal	3
2.2. Adensamento e/ou compactação de sítios florestais	3
2.3. Implicações da compactação em solos.....	5
2.3.1. Propriedades químicas, físicas e biológicas do solo	5
2.3.2. Ecofisiologia da planta.....	6
2.4. Eficiência nutricional	7
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	9
3.1. Caracterização do solo e material genético	9
3.1. Montagem das colunas e grau de compactação do solo.....	12
3.2. Análises morfológicas e de crescimento da parte aérea e a raiz	12
3.3. Índice de qualidade de Dickson (IQD).....	15
3.4. Determinação dos teores e conteúdos nutricionais	15
3.5. Eficiência nutricional	16
3.6. Análises estatísticas.....	17
3.7. Classificação de clones	18
4. RESULTADOS.....	21
4.1. Crescimento, desenvolvimento e produção de matéria seca	21
4.2. Morfologia radicular	28
4.3. Teores e conteúdo de nutrientes	32
4.4. Eficiência nutricional	37
4.4.1. Eficiência de aquisição.....	37
4.4.2. Eficiência de translocação.....	39
4.4.3. Eficiência de utilização	41
4.5. Classificação de clones	43

5. DISCUSSÃO.....	46
5.1. Produção e desenvolvimento de clones.....	46
5.2. Desenvolvimento de raízes em solo compactado.....	48
5.3. Eficiência nutricional de clones de eucalipto.....	49
5.4. Seleção e classificação de clones de eucalipto.....	52
6. CONCLUSÕES.....	54
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
APÊNDICES.....	67

1. INTRODUÇÃO

A mecanização em sistemas de produção agrícola e florestal cria condições favoráveis ao crescimento de espécies e ao mesmo tempo desfavoráveis aos atributos físicos do solo (BALBINO et al., 2011; FERNANDES; SOUZA, 2003). A combinação de condições ideais de manejo dos solos e maquinários agrícolas e/ou florestais existentes tem sido um desafio para os setores produtivos (FERNANDES; SOUZA, 2003; RICHART et al., 2005, 2016).

Aliar condições inadequadas de umidade à práticas mecanizadas do solo pode resultar em compactação, reduzindo, conseqüentemente, a produtividade das culturas agrícolas e florestais na área manejada (RAPER, 2005). A perda de produtividade está diretamente relacionada às mudanças de ordem física dos solos ao longo dos anos, tais perdas podem chegar até 24% em sistemas agrícolas e florestais por conta de mudanças estruturais do solo (UNEP, 2012).

Os efeitos da compactação do solo podem persistir ao longo das rotações, acumulando-se até 40 cm de profundidade do solo (CAMBI et al., 2017). Após décadas, podem ocorrer resquícios de compactação das rotações anteriores, mesmo com o preparo do solo da área florestal, haja vista que as rotações estão cada vez mais curtas (FERNANDES; SOUZA, 2003; TORRES et al., 2015).

No setor florestal áreas compactadas apresentam menor rendimento quando comparadas a áreas não compactadas, com reduções que chegam a 2/3 do volume (m³) de madeira de eucalipto produzida (DEDECEK; GAVA, 2005). A compactação nessas áreas desfavorece o desempenho das espécies, interagindo fortemente com limitações de água e nutrientes, reduzindo consideravelmente o incremento médio da madeira em (m³) e rebrota do plantio (ALAMEDA; ANTEN; VILLAR, 2012; DEDECEK; GAVA, 2005).

A redução da produtividade na área florestal ocorre principalmente em razão das alterações na distribuição, tamanho e continuidade dos poros do solo, haja vista que ocorre a diminuição do fluxo de ar e água, ocasionando diminuição da aquisição de água e nutrientes pelas plantas (BERISSO et al., 2012; MOURA et al., 2008; PINTO et al., 2011). As reduções de até 38% do C e 57%, 25%, 31%, respectivamente nas concentrações de N, P e K no solo, podem ocorrer onde houve o aumento da densidade pelo tráfego de máquinas (BERISSO et al., 2012). Estudos semelhantes também observaram reduções significativas de C, N, P e K total do solo, onde houve

aumento da densidade, pelo tráfego de máquinas (JAAFARI; NAJAFI E ZENNER, 2014).

Nesse sentido a eficiência nutricional pode ser utilizada para caracterizar diferentes espécies de plantas, genótipos e cultivares quanto à capacidade de absorver e utilizar nutrientes mesmo em condições restritas (ABICHEQUER; BOHNEN, 1998; BALIGAR; FAGERIA, 1999; BATISTA; NETO; DECCETTI, 2015; CAMARGO et al., 2008; ROSIM, 2013). Genótipos que possuam maior eficiência na aquisição, translocação e utilização de nutrientes, mesmo em condições restritas do solo podem ser utilizados como ferramenta de sustentabilidade de áreas florestais (BALIGAR; FAGERIA, 1999).

O eucalipto é uma espécie eficiente do ponto de vista hídrico-nutricional, tolerando solos ácidos e de baixa fertilidade (SILVEIRA et al., 2002). Contudo, mesmo se adaptando bem a essas condições, cada clone comporta-se de forma diferenciada nas condições apresentadas pelo sítio florestal, necessitando assim de trabalhos de seleção dos melhores materiais genéticos para as diferentes situações de estresses (BATISTA; NETO; DECCETTI, 2015).

Estudos dessa magnitude são raros especialmente quando envolvem a avaliação de raízes e seleção de materiais genéticos que melhor se desenvolvam em condições de estresse físico do solo (BOTREL et al., 2010; CASTRO et al., 2013; CHAVES et al., 2004; ROSADO et al., 2012). A avaliação da produção de matéria seca, crescimento de raízes e nutrição de plantas de sítios florestais, pode ajudar na escolha dos melhores materiais genéticos (SILVA et al., 2002).

Desta forma, objetivou-se nesse estudo, avaliar o crescimento e a eficiência nutricional de clones de eucalipto submetidos, em condições controladas, a diferentes graus de compactação do solo, na tentativa de classificar e selecionar aqueles mais aptos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Produtividade florestal

A indústria florestal brasileira é atualmente referência internacional no setor de florestas plantadas, liderando o ranque de 2016, com produtividade média de 35,7 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ para eucalipto e 30,5 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ para pinus. Contribui, assim, com 1,1% do PIB nacional e 6,2% do PIB industrial, acumulando R\$71,1 bilhões em 2016 (IBÁ, 2017; OLIVEIRA et al., 2018).

A área total de florestas plantadas no Brasil chegou a 7,8 milhões de hectares em 2016, dos quais 5,67 milhões são de eucalipto, 1,58 milhão de pinus e 0,59 milhão de outras espécies tais como: acácia, teca, seringueira e paricá (FOELKEL, 2005; IBÁ, 2017; SIMIONI et al., 2018). Essas áreas estão distribuídas nas cinco regiões do território nacional, sendo: 54,2% no sudeste, 16,4% no nordeste, 12,2% no centro-oeste, 11,8% no sul e 5,5% no norte (ABRAF, 2013). O estado de Minas Gerais possui 24% dos plantios nacionais (IBÁ, 2017; REZENDE; PEREIRA; BOTELHO, 2013).

Dentre as inúmeras espécies madeireiras utilizadas pelo setor, o eucalipto ganha destaque por possuir características de rápido crescimento, produtividade, diversidade de espécies e grande gama de utilizações na indústria florestal (FOELKEL, 2014; MORA; GARCIA, 2000). As espécies de eucalipto mais utilizadas no momento, em função das características de sua madeira, são: *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus viminalis*, bem como híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* “Urograndis” (ABRAF, 2013; BALLONI; SIMÕES, 1980; SIMIONI et al., 2018).

2.2. Adensamento e/ou compactação de sítios florestais

O solo é composto de um sistema trifásico (sólido, líquido e gasoso), o qual possui um arranjo estrutural de suas partículas, formando espaços porosos que armazenam água e ar, podendo conduzir e/ou armazenar e disponibilizar água e nutrientes para as plantas (WATTS et al., 1996). O adensamento e/ou compactação são os principais resultados das mudanças de estrutura do solo no sistema solo-planta, sendo a primeira sem interferência humana e a segunda em função das atividades de manejo do solo (DEXTER, 2004).

O conceito de adensamento do solo está baseado no aumento da densidade do solo e redução da porosidade em razão de processos pedogenéticos como a dessecação, a iluviação ou a precipitação química, sem interferência antrópica (HOLTZ; KOVACS, 1981; ZANI FILHO et al., 2016). Já a compactação é definida como o aumento da densidade do solo em função do rearranjo das partículas e consequente redução da porosidade, sendo originadas de energia mecânica externa advinda do tráfego de máquinas e/ou animais e implementos (HOLTZ; KOVACS, 1981; SUZUKI et al., 2007).

A compactação do solo e/ou subsolo é maior em sistemas florestais que nos sistemas agrícolas, em função de forças mecânicas aplicadas no solo (MILDE; DEDECEK; GAVA, 2010). Essas forças tem como origem o crescimento radicular das árvores e a carga aplicada no processo de corte das árvores e o arraste das toras dentro dos talhões (JAKOBSEN; GREACEN, 1985). O próprio peso do maquinário utilizado no manejo florestal contribui efetivamente para a compactação do solo (FERNANDES; SOUZA, 2003; JAKOBSEN; GREACEN, 1985).

A camada superficial do solo é extremamente vulnerável à compactação, com degradação significativa da estrutura do solo e comprometimento do funcionamento dos poros. No entanto, o movimento de colheita florestal pode afetar as camadas subsuperficiais (até pelo menos 40 cm) dependendo do tipo de solo, umidade e estrutura (REICHERT et al., 2018). O movimento realizado pelo maquinário dentro da área de manejo promove a formação de sulcos pelo rodado do veículo, o revolvimento superficial e deformações no solo, como depressões e superfícies de acúmulo de água (AGHERKAKLI; NAJAFI; SADEGHI, 2010).

O uso do trator em área florestal mostrou maior grau de compactação, alta densidade aparente, baixa macroporosidade (abaixo do nível crítico), condutividade hidráulica reduzida (quase impermeável) e aumento da resistência à penetração (acima do crítico limite de 2 MPa) (REICHERT et al., 2018). Nesse sentido a compactação do solo atua como fator modificador das condições físicas dos solos, sendo atualmente uma problemática em sítios florestais (JESUS et al., 2015; REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007; RICHART et al., 2005; SHAHGOLI; ABUALI, 2015).

A compactação é uma consequência indesejada da mecanização florestal, pois reduz a produtividade biológica do solo e, em alguns casos, torna-o inapropriado para o desenvolvimento das plantas (HILLEL, 1998). O tráfego de máquinas em

determinados conteúdos de água no solo pode desencadear compactação adicional do solo, pois com o aumento da umidade torna-se muito mais susceptível a deformação (SHAHGHOLI; ABUALI, 2015). Tal prática modifica as principais propriedades do solo, tendo como principal consequência a diminuição da produtividade florestal nos talhões (CAMBI et al., 2017; COSTA et al., 2012; GŁAB; GONDEK, 2014; OLIVEIRA et al., 2006; SILVA; REINERT; REICHERT, 2000).

A densidade do solo é um parâmetro útil para expressar os efeitos da compactação do solo, sendo definida pela razão entre massa de sólidos e volume total do solo, expressa em kg dm^{-3} de solo (BLAKE; HARTGE, 1979). Em alternativa à medida isolada da densidade do solo, tem-se proposto à medida da densidade relativa do solo, o chamado de grau de compactação, expresso em porcentagem, onde se relaciona a densidade do solo com uma densidade referência (CARTER, 1990; HÂKANSSON, 1990).

A densidade referência pode ser obtida por dois métodos, dentre outros: o ensaio de compactação proctor normal, o qual utiliza amostras de solo com estrutura não preservada (CARTER, 1990; NADERI-BOLDAJI; KELLER, 2016), e o teste de compressão uniaxial com estrutura preservada ou não seguido de aplicações de pressões de 200 kPa e 1.600kPa respectivamente (HÂKANSSON, 1990). A densidade relativa visa normalizar a densidade atual do solo de tal modo que um determinado valor de densidade relativa descreve o mesmo estado de compacidade em qualquer solo, isto é, independentemente da textura do solo (NADERI-BOLDAJI; KELLER, 2016).

2.3. Implicações da compactação em solos

2.3.1. Propriedades químicas, físicas e biológicas do solo

O uso e manejo dos solos dos talhões florestais podem ser limitados por modificações de diversas propriedades desencadeadas pela compactação do solo, sejam elas de ordem química, física ou biológica (CUNHA et al., 2012). As limitações químicas estão relacionadas principalmente à pobreza em nutrientes disponíveis na solução do solo, pois o transporte de nutrientes é reduzido no perfil do solo em função da descontinuidade dos poros, afetando os mecanismos de transporte e aquisição de nutrientes pelas plantas (BERISSO et al., 2012).

A compactação reduz ainda os teores de C no solo, pois a taxa de mineralização da matéria orgânica é afetada pelo déficit hídrico, redução da aeração e mudanças na

temperatura do solo, alterando todo o funcionamento do sistema solo-planta (BERISSO et al., 2012; BEYLICH et al., 2010; JAAFARI; NAJAFI; ZENNER, 2014; NAGHDI; SOLGI; ILSTEDT, 2016).

As limitações físicas são observadas principalmente pelo aumento da densidade do solo, assim como a diminuição da porosidade total, com modificação da condutividade hidráulica e o aumento da resistência à penetração (CHAVES et al., 2004; DO VALE et al., 1996; NESPER et al., 2015; ROSADO et al., 2012; TORMENA et al., 2002). A perda da estrutura física desestabiliza os agregados do solo, expondo o carbono armazenado à oxidação, o que leva a diminuição dos estoques de carbono e nitrogênio dos solos (WANG et al., 2016).

A compactação do solo altera ainda a atividade da fauna do solo, pois a macro e microfauna dependem de processos metabólicos e fisiológicos que são modificados pela compactação do solo, como por exemplo, o acesso à água e nutrientes, a aeração e luz (CUNHA et al., 2012; GODOY et al., 2013). A compactação restringe e seleciona, assim, o número de espécies nesse ambiente, modificando por consequência a diversidade de organismos no habitat, além de deixar as plantas susceptíveis às pragas e doenças (CUNHA et al., 2012; DA SILVA et al., 2011; GODOY et al., 2013; GONÇALVES et al., 2013).

2.3.2. Ecofisiologia da planta

A compactação do solo modifica a ecofisiologia (ecologia, morfologia, fisiologia e bioquímica) das plantas, pois, em solos onde ocorre a compactação, é possível verificar sintomas nas plantas e consequente diminuição na produtividade do sítio. As modificações recorrentes são desde folhas amareladas e de tamanho reduzido a sistemas radiculares rasos e tortuosos, podendo culminar no tombamento das árvores nos talhões por má formação das raízes (JUNIOR, 2000).

Nesse sentido, pode-se observar a importância do sistema radicular, haja vista que é o primeiro componente da planta a apresentar modificação estrutural, em função da compactação do solo (GOSS et al., 1993; O'TOOLE; BLAND, 1987; SALEEM et al., 2018). As mudanças promovidas nos atributos físicos do solo alteram o crescimento, desenvolvimento e distribuição de raízes no solo, pois, quando os limites críticos da compactação são alcançados pelas plantas (superior a 2 kPa), o crescimento das raízes é inibido, induzindo a mortalidade das mudas (GLAB; GONDEK, 2014; OLIVEIRA et al., 2006).

O comprimento e densidade das raízes é reduzido em função da diminuição da oferta de água e nutrientes, portanto, uma problemática para o setor florestal (CAMBI et al., 2017; COSTA et al., 2012; SILVA; REINERT; REICHERT, 2000). Com o déficit hídrico e nutricional ocasionado pela compactação do solo, as folhas também sofrem modificações de ordem fisiológica, como por exemplo, diminuição da fotossíntese líquida e, por consequência, a produtividade das culturas (LIAO et al., 2018). A menor produção de matéria seca, seguido de elevados índices de redistribuição de nutrientes antes da queda das folhas, são estratégias muitas vezes usadas pelas plantas para manter o conteúdo nutricional na planta, adequando-se às restrições impostas aos materiais genéticos (WINCKLER et al., 2006).

Nesse sentido, as avaliações dos parâmetros ecofisiológicos das plantas são importantes, pois com o aumento da resistência a penetração ocorre uma série de modificações estruturais na planta (VELLINI et al., 2008). Essas modificações envolvem a diminuição da produção de matéria seca de raízes finas, aumento do diâmetro das raízes e diminuição da matéria seca da parte aérea, fato esse que terá como consequência a diminuição da produção de lenho (madeira) (COSTA et al., 2012; DEDECEK; GAVA, 2005; GOMES et al., 2002; SILVA et al., 2002).

2.4. Eficiência nutricional

O termo eficiência nutricional pode ser utilizado para caracterizar diferentes espécies de plantas, genótipos e cultivares quanto à capacidade de absorver, transferir e utilizar nutrientes. Esta eficiência está diretamente relacionada à eficiência na aquisição, translocação e utilização de nutrientes pelas plantas (BALIGAR; FAGERIA, 1999).

A eficiência de aquisição de nutrientes pode ser definida como a capacidade de aquisição de nutrientes mesmo em condições de baixa disponibilidade (CLARKSON, 1985). É avaliada por meio da relação do conteúdo total do nutriente na planta pela matéria seca de raízes finas (SWIADER; CHYAN; FREIJI, 1994).

A eficiência de translocação refere-se ao movimento ou à transferência do íon do local de aquisição na raiz para outro ponto dentro da planta ou fora da zona de aquisição da raiz (FAQUIN, 2005; MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997), e avaliada pela relação entre conteúdo do nutriente presente na parte aérea pelo conteúdo total do nutriente na planta (LI et al., 1991).

Já a eficiência de utilização, por sua vez, é a capacidade que a planta possui em redistribuir e reutilizar os nutrientes absorvidos, realizando-as dos órgãos mais velhos para aqueles em crescimento, empregando-os na produção de biomassa (CLARKSON; HANSON, 1980). Essa eficiência relaciona a matéria seca total ao quadrado pelo conteúdo total do nutriente na planta (SIDDIQUI; GLASS, 1981).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização do solo e material genético

O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Universidade Federal de Viçosa (UFV), utilizando Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) coletado na camada de 20-40 cm de profundidade, no município de Viçosa, Minas Gerais (20°45' S e 42°52'W) (Tabela 1). As principais etapas desenvolvidas neste experimento foram sintetizadas na Figura 1 e descritas detalhadamente a seguir.

Tabela 1. Propriedades químicas e físicas da camada 20-40 cm de Latossolo Vermelho Amarelo (LVA), Viçosa- Minas Gerais- Brasil

Propriedades químicas ⁽¹⁾	Valores
pH H ₂ O (1:2.5)	5,24
Matéria orgânica (MO) (dag kg ⁻¹)	0,91
P rem. (mg L ⁻¹)	6,0
Ca ²⁺ (cmolc dm ⁻³)	1,18
Mg ²⁺ (cmolc dm ⁻³)	0,08
P disponível (mg dm ⁻³)	0,6
K ⁺ (mg dm ⁻³)	33
Al (cmolc dm ⁻³)	0
H + Al (cmolc dm ⁻³)	1,4
Soma das bases (SB) (cmolc dm ⁻³)	1,34
CTC efetiva (cmolc dm ⁻³)	1,34
CTC total (cmolc dm ⁻³)	2,74
Saturação base (%)	48,9
Saturação de alumínio (%)	0
Propriedades físicas ⁽²⁾	Valores
Areia grosseira (g kg ⁻¹)	1,75
Areia fina (g kg ⁻¹)	108
Silte (g kg ⁻¹)	36
Argila (g kg ⁻¹)	681
Densidade de partículas (g cm ⁻³)	2,65
Densidade do solo (g cm ⁻³)	1,06
Argila dispersa em água (kg ⁻¹ kg ⁻¹)	0,21
Grau de floculação (kg ⁻¹ kg ⁻¹)	0,90

⁽¹⁾ pH H₂O = determinado por potenciometria em solução (1:2.5; solo: água); Matéria Orgânica (MO) = carbono orgânico por Walkey-Black (YEOMANS; BREMNER, 1988) utilizando fator de correção de 1,724; fósforo remanescente (P-rem) = extraído com 10 mmol L⁻¹ de CaCl₂, contendo 60 mg L⁻¹ de P na relação 1:10, determinação do teor de P em solução após agitação por 5 min através de fotometria (ALVAREZ V. et al., 2001); Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ = extraídos com KCl 1 mol L⁻¹ e determinados por fotometria e titulometria; S = extraído por fosfato monocálcico em ácido acético e determinado por fotometria; B = extraído com água quente e determinado por fotometria (EMBRAPA, 2011); P disponível (P disp), K⁺, Fe, Zn, Mn e Cu = extraídos com Mehlich-1 e determinados com fotometria de chama e espectrometria (DEFELIPO; RIBEIRO, 1981); H+Al: extraídos por acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ em pH 7.0 e determinados por titulometria; soma de bases (SB) = K⁺ + Ca²⁺ + Mg²⁺; Capacidade de troca de cátions efetiva (t) = SB + Al³⁺ e total (T) = SB + (H+Al); Índice de Saturação por Bases (V) = (SB x 100)/T; Índice de Saturação por Alumínio (m) = 100 x Al³⁺/t, todos conforme Embrapa (2011).

⁽²⁾ Granulometria: dispersão física com agitação lenta por 16 horas (50 rpm) e química com NaOH 0.1 mol L⁻¹ com determinação da areia por tamisamento e quantificação da argila e silte pelo método da pipeta (ALMEIDA et al., 2012); densidade do solo e de partículas pelo método do anel volumétrico e do balão volumétrico, respectivamente (BLAKE; HARTGE, 1979); argila dispersa em água (ADA) com dispersão semelhante a análise granulométrica sem uso de dispersante químico; grau de floculação estimado pela equação: $GF = [(Argila - ADA)/(ADA)] \times 100$ (ALMEIDA et al., 2012).

Dezesseis materiais genéticos clonais comerciais de eucalipto, produzidos pela empresa Celulose Nipo-Brasileira S/A (Cenibra), com idade média de 35 dias foram utilizados nesse estudo (Tabela 2). As mudas foram produzidas com substrato composto por 40% de vermiculita expandida, 40% de casca de arroz carbonizada e 20% de fibra de coco triturada.

Tabela 2. Identificação dos materiais genéticos de eucalipto utilizados neste estudo

ID	Materiais genéticos
1	<i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden x <i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake
2	<i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden x <i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake
3	<i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake 4 x <i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden 26
4	<i>Eucalyptus urophylla</i> 6 x <i>Eucalyptus grandis</i> 221
5	<i>Eucalyptus urophylla</i> 11 x <i>Eucalyptus grandis</i> 23
6	<i>Eucalyptus grandis</i> W. Hill ex Maiden
7	<i>Eucalyptus grandis</i> W. Hill ex Maiden
8	<i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>E. grandis</i>
9	<i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>E. grandis</i>
10	<i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake 11 x <i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden 23
11	<i>Eucalyptus grandis</i> Hill ex Maiden x <i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake
12	<i>Eucalyptus urophylla</i> 6 x <i>Eucalyptus grandis</i> 221
13	<i>Eucalyptus grandis</i> 6-9 x <i>Eucalyptus urophylla</i> 2/1
14	<i>Eucalyptus grandis</i> 3 x <i>Eucalyptus urophylla</i> 5
15	Híbrido de <i>Eucalyptus urophylla</i>
16	<i>Eucalyptus urophylla</i> 7 x <i>Eucalyptus grandis</i> 26

O experimento foi conduzido por 60 dias em esquema fatorial (3x16), com três graus de compactação e 16 clones e quatro repetições, totalizando 192 unidades amostrais, utilizando delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC). As unidades experimentais foram montadas com solo umedecido à capacidade de campo (umidade do solo 0,37 kg⁻¹ kg⁻¹) e corrigido quimicamente com superfosfato simples utilizando a dose de 300 mg kg⁻¹ para P. Após o plantio das mudas, foi realizada a adubação de cobertura, utilizando os seguintes nutrientes, fontes e doses, respectivamente: N, CH₄N₂O e 100 mg kg⁻¹; K, KCl e 150 mg kg⁻¹; B, H₃BO₃ e 0,81 mg kg⁻¹; Cu, CuSO₄ e 1,33 mg kg⁻¹; Fe, FeCl₃ e 1,55 mg kg⁻¹; Mn, MnSO₄ e 3,66 mg kg⁻¹; Mo, (NH₄)₆Mo₇O₂₄ e 0,15 mg kg⁻¹; e Zn, ZnSO₄ e 4 mg kg⁻¹, conforme valores sugeridos por Novais; Neves e Barros (1991).

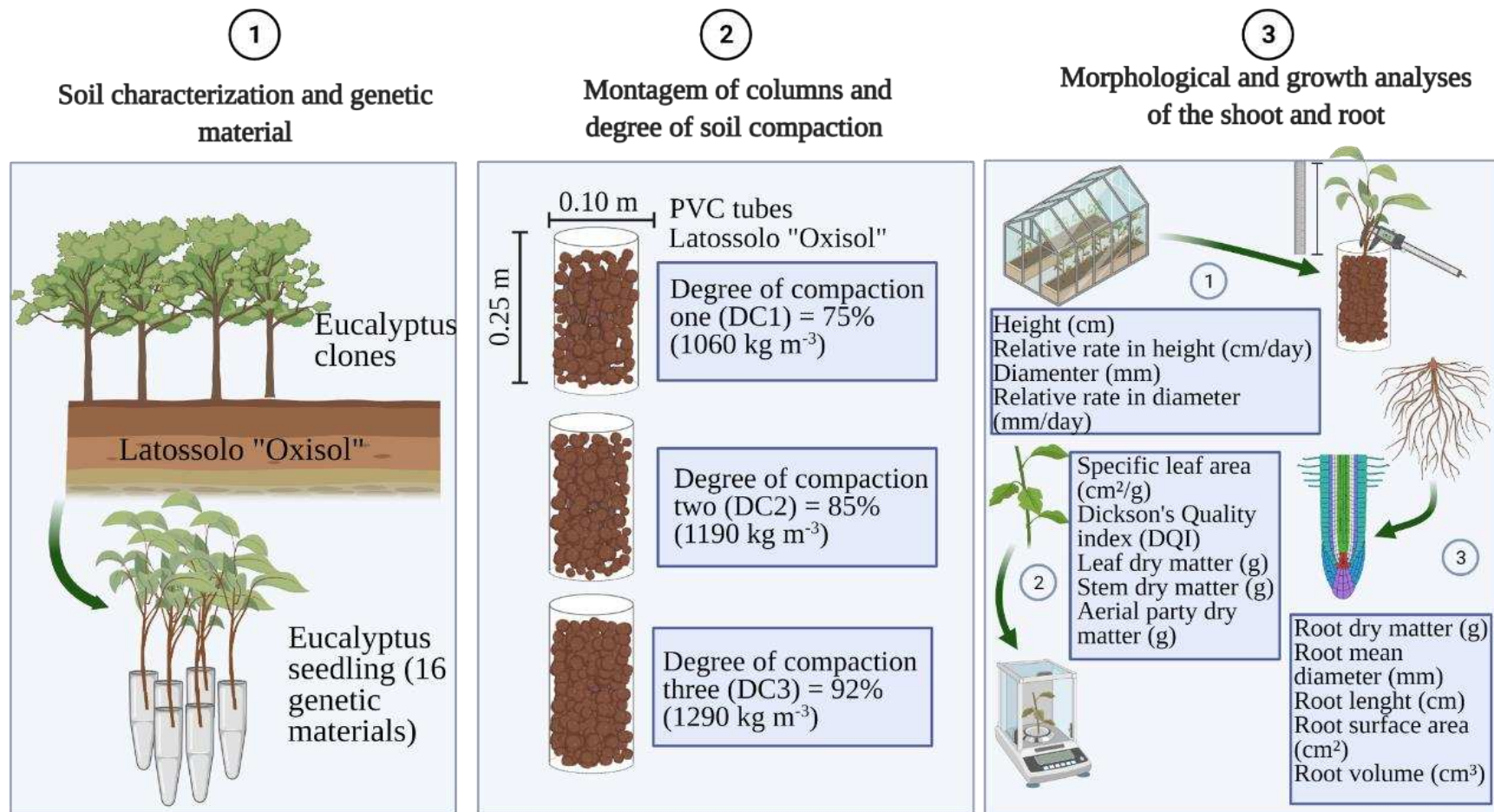


Figura 1. Principais aspectos da montagem (1 e 2), condução e análise experimental dos clones de eucalipto (3)

3.1. Montagem das colunas e grau de compactação do solo

Tubos de PVC (0,25 m de altura e 0,10 m de diâmetro) foram utilizados para a montagem das colunas de solo, totalizando o volume de 0,0020 m³ em cada unidade experimental. A coluna de solo compactado foi montada com auxílio de prensa hidráulica de 15 t de capacidade, em camadas de 5 cm de espessura, visando garantir maior uniformidade da compactação na coluna de PVC e a mesma condição inicial de compactação, qualquer que fosse a região da coluna. Na região de inserção da muda foi feito o uso de tubete (preenchido com solo compactado para evitar deformação) preparado como modelo (Figura 1), de tal forma que fosse garantido o mesmo volume inicial ($7,45 \cdot 10^{-05} \text{m}^3$) ocupado pelo sistema radicular das plantas e substrato das mudas utilizadas. Essa medida foi adotada para se evitar o crescimento de raízes na interface entre a parede do tubo de PVC e o bloco de solo compactado.

O conteúdo de água nas estruturas montadas foi mantido constante, mediante pesagens diárias dos vasos e reposição de água pela capilaridade e regas diárias, seguido do rodízio de vasos a cada cinco dias. As condições de umidade e disponibilidade de nutrientes foram mantidas constantes para os clones durante toda execução do experimento em casa de vegetação.

O grau de compactação (GC) do solo foi estabelecido pela consideração da densidade do solo na condição natural de ocorrência do Latossolo Vermelho-Amarelo, obtida pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 2011), bem como respectivas densidades-referência (máxima), determinadas pelo teste de compressão uniaxial (HÅKANSSON, 1990), nesse caso, respectivamente de 1.060 kg dm⁻³ e 1.390 kg dm⁻³. Os três graus de compactação (GC) do solo adotados e respectivas densidades máximas, no presente estudo, foram: 75% (GC1) e 1060 kg m⁻³, 85% (GC2) e 1190 kg m⁻³ e 92% (GC3) e 1290 kg m⁻³. Em casa de vegetação, observou-se o desenvolvimento das mudas, do início do experimento, passados 35 dias após a germinação e ao final do experimento, ocasião na qual as mudas completaram 95 dias, ou seja, 35 dias após a germinação e 60 dias de condução em casa de vegetação (Figura 2).

3.2. Análises morfológicas e de crescimento da parte aérea e a raiz

A parte aérea foi avaliada quanto à altura (H), utilizando régua graduada da base do caule até o meristema apical da planta, e o diâmetro do coleto (Dc), mensurado com paquímetro digital com precisão de 0,01 mm. As mudas foram mensuradas

semanalmente, com início aos 35 dias e término aos 95 dias. Os dados de altura e diâmetro utilizados foram àqueles obtidos a partir da subtração dos valores da última medição em relação à primeira do experimento, para assim descontar o crescimento existente inicialmente.

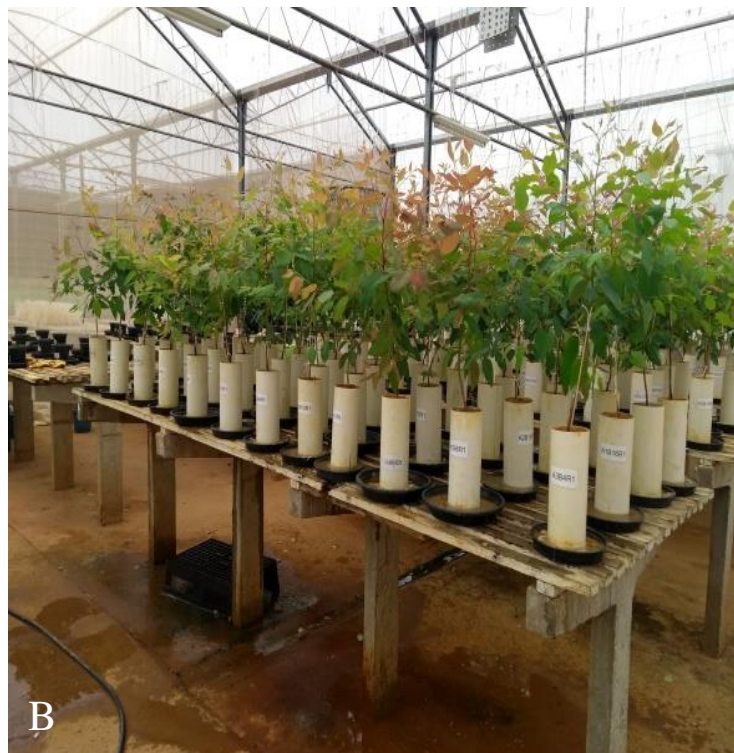
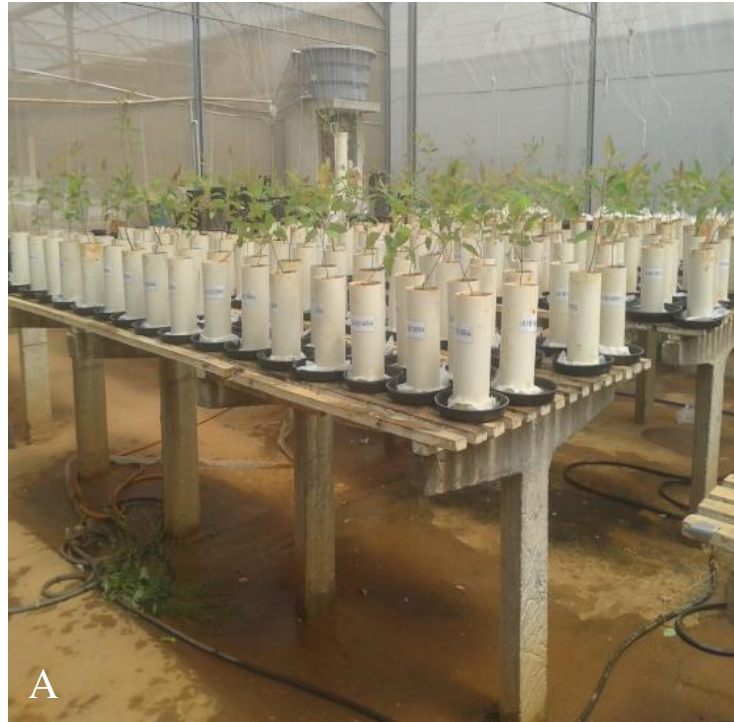


Figura 2. Visão geral do experimento em casa de vegetação aos (A) 35 dias e aos (B) 95 dias

As taxas de crescimento absoluto em altura (TCAH) e em diâmetro (TCADc), assim como as taxas de crescimento relativo em altura (TCRH) e em diâmetro (TCADc) das mudas, foram estimadas conforme as equações (1 e 2) propostas por Benincasa (1988):

$$TCA = \frac{V_{i+1} - V_i}{T_{i+1} - T_i} \quad (1)$$

$$TCR = \frac{\ln V_{i+1} - \ln V_i}{T_{i+1} - T_i} \quad (2)$$

em que V_i é a variável em estudo, em cm ou mm, Ln é o logaritmo neperiano e T é o tempo de cada período, em dias.

A determinação da área foliar (AF) foi realizada utilizando o medidor de área foliar modelo LI-3100C (LI-COR, 1995), o que permitiu obter a área foliar específica (AFE) pela divisão da AF pela matéria seca de folhas (MSF).

Ao final do experimento, as plantas foram separadas em parte aérea (folha e caule) e raízes grossas ($\emptyset \Rightarrow 2$ mm) e finas ($\emptyset < 2$ mm). A matéria fresca de folhas e caule foi acondicionada em saco de papel e secas em estufa de circulação forçada de ar com temperatura de aproximadamente 70°C, por 72 horas. Posteriormente foram pesadas para obtenção das massas de matéria seca de folha (MSF) e do caule (MSC) que, juntas, compõem a massa da matéria seca da parte aérea (MSPA).

As raízes foram lavadas sobre peneiras com malha de 1 mm e aparadas em um balde para separação do solo e raízes finas. Após a limpeza, as amostras foram acondicionadas em recipientes de plástico contendo solução de álcool etílico a 30% e armazenadas sob-refrigeração a 2°C.

As variáveis, comprimento radicular (Lr), volume radicular (Vr), área de superfície (As), diâmetro médio radicular (Dmr) e número de pontas de raízes (Pt) foram determinadas utilizando o sistema *WinRHIZO Pro 2009a* (Basic, Reg, Pro & Arabidopsis for Root Measurement), acoplado a um *scanner* profissional *Epson XL 10000*. A relação do número de pontas de raízes (Pt) pelo comprimento radicular (L), também foi estimada (Pt/L), demonstrando a distribuição dos números de pontas de raízes ao longo do comprimento radicular, ou seja, o arranjo e estrutura do sistema radicular.

Após a análise morfológica, a matéria fresca de raízes foi seca em estufa de circulação forçada com temperatura de aproximadamente 70°C, por 72 horas, sendo em seguida, pesadas para obtenção das massas de matéria seca de raízes finas (MSRF) e de raízes grossas (MSRG), que juntas compõe a matéria seca de raiz total (MSR). A massa de matéria seca total (MST) é o resultado da soma de todos os compartimentos da planta.

As partições (PART) de matéria seca das folhas (PARTF), do caule (PARTC), da parte aérea (PARTPA) e das raízes finas (PARTRF) e grossas (PARTRG) foram calculadas pela razão entre a massa de matéria de cada compartimento em relação à matéria seca total, em porcentagem.

3.3. Índice de qualidade de Dickson (IQD)

As mudas foram também avaliadas ao final do experimento por meio do índice de qualidade de Dickson (IQD), que representa o estado geral da muda, quanto ao crescimento e produção de matéria seca, considerando-se quanto maior o valor de IQD, melhor o estado da muda avaliada (DICKSON; LEAF; HOSNER, 1960), conforme equação (3):

$$IQD = \frac{MST}{\frac{H}{Dc} + \frac{MSPA}{MSR}} \quad (3)$$

em que IQD é o Índice de Qualidade de Dickson; MST é a matéria seca total, em g; H é altura, em cm; Dc é o diâmetro do coleto, em mm; MSPA é a matéria seca da parte aérea, em g e MSR é a matéria seca de raiz, em g.

3.4. Determinação dos teores e conteúdos nutricionais

Após a secagem do material vegetal, esse foi triturado em moinho tipo Wiley e mineralizado por meio de mistura dos ácidos nítrico e perclórico (4:1) (JOHNSON; ULRICH, 1959), para determinação dos teores de P, K, Ca, Mg, S, Mn, Fe, Cu e Zn na matéria seca de folhas, caule e raízes. A determinação dos elementos em extrato foi realizada em espectrômetro de emissão atômica com indução de plasma (EEA-ICP).

O nitrogênio (N) foi quantificado por meio de digestão sulfúrica, seguida de destilação de Kjeldahl e titulação com ácido clorídrico (HCl) 0,02 mol L⁻¹, conforme Bremner (1996). O boro (B) foi determinado por meio de digestão seca (calcinação)

e as leituras realizadas no espectrofotômetro UV, comprimento de onda de 420 nm (CAPELLE, 1961).

O conteúdo de nutriente foi determinado para cada nutriente na matéria seca das folhas, caule e raízes, parte aérea e total, tendo sido calculado pela multiplicação dos teores do nutriente obtido no compartimento pela matéria seca do respectivo compartimento (teor x massa de matéria seca).

3.5. Eficiência nutricional

A eficiência nutricional dos clones de eucalipto foi determinada para cada nutriente e compartimento da matéria seca, por meio das eficiências de aquisição, de translocação e de utilização.

A eficiência de aquisição (EA) foi determinada conforme metodologia proposta por Swiader; Chyan e Freiji (1994), utilizando-se a equação (4):

$$EA = \frac{cTNP}{MSRF} \quad (4)$$

em que: EA é a eficiência de aquisição de nutriente pela planta, em mg g⁻¹; cTNP é o conteúdo total de nutriente na planta, em mg; e MSRF é a matéria seca de raiz fina em g.

A eficiência de translocação (ET) foi determinada conforme metodologia descrita por Li et al. (1991), de acordo com a equação (5):

$$ET = \frac{cNPA}{cTNP} \quad (5)$$

em que: ET é a eficiência de translocação de nutriente pela planta, em mg mg⁻¹; e cNPA é o conteúdo de nutriente na parte aérea, em mg; cTNP é o conteúdo total de nutriente na planta, em mg.

A eficiência de utilização (EU) por sua vez foi determinada conforme metodologia descrita por Siddiqui e Glass (1981), utilizando-se a equação (6):

$$EU = \frac{MMST^2}{cTNP} \quad (6)$$

em que: EU é a eficiência de utilização de nutriente pela planta, em $g^2\ mg^{-1}$; e MST é a matéria seca total, em g; cTNP é o conteúdo total de nutriente na planta, em mg.

3.6. Análises estatísticas

A análise de variância (ANOVA) dos dados foi aplicada com significância de até 5% de probabilidade. O desdobramento da interação clone x compactação foi realizado para avaliar do efeito da compactação sobre as variáveis avaliadas em cada clone estudado, nesse caso, utilizando contrastes ortogonais para comparações de médias, com significância de até 5% de probabilidade para todas as amostras avaliadas.

Os contrastes ortogonais utilizados foram estabelecidos em função dos graus de compactação e avaliados para cada clone. O contraste um (C1) comparou as médias das variáveis dos tratamentos GC2 e GC3 em solo compactado com as médias do solo controle (GC1), conforme equação (7).

$$C1 = \bar{y}_{GC2} + GC3 \text{ vs } \bar{y}_{GC1} \quad (7)$$

em que: C1 é o contraste ortogonal 1; GC2 é o grau de compactação dois; GC3 é o grau de compactação três; e GC1 é o grau de compactação um.

O contraste dois (C2) comparou as médias das variáveis avaliadas em solo compactado em seu maior grau (GC3) com as médias do solo compactado em seu grau intermediário (GC2), conforme equação (8).

$$C2 = \bar{y}_{GC3} \text{ vs } \bar{y}_{GC2} \quad (8)$$

As variáveis selecionadas para a classificação dos clones foram as com F calculado (razão entre o quadrado médio dos tratamentos e o quadrado médio do erro experimental obtido pela ANOVA) > F tabelado (1,83), já que tal valor expressa o valor mínimo (limite crítico) para observação de diferenças significativas ao nível de 1% para as variáveis. Desta forma, pressupõe-se que as variáveis selecionadas foram

as que mais refletiram as diferenças de comportamento dos clones frente a compactação.

3.7. Classificação de clones

A classificação dos clones em quatro grupos, foi realizada considerando-se a não significância e as diferenças significativas dos contrastes, sejam elas positivas ou negativas (Tabela 3).

Tabela 3. Classificação dos clones em grupos conforme os seus respectivos contrastes

Grupo	C1 (p-valor 5%)	C2 (p-valor 5%)	Classificação
1	ns	ns	Tolerante
2	ns	* + \bar{y} ou - \bar{y}	Moderadamente tolerante
3	* + \bar{y} ou - \bar{y}	* + \bar{y} ou - \bar{y}	Sensível
4	* + \bar{y} ou - \bar{y}	ns	Moderadamente sensível

¹ contraste um ($C1 = \bar{y} GC2 + GC3$ vs $\bar{y} GC1$); Contraste dois ($C2 = \bar{y} GC3$ vs $\bar{y} GC2$), onde GC1: Grau de compactação um, 1060 kg m³; GC2: Grau de compactação dois, 1190 kg m³; e GC3: Grau de compactação três, 1290 kg m³;

² *significativo ao nível de 5% de probabilidade e ns = não significativo ao nível de 5% de probabilidade (ANOVA), onde há possibilidade de efeito positivo significativo (+*), ou seja, aumento da média da variável em questão com a compactação, ou efeito negativo significativo (-*), com respectiva diminuição da média da variável com a compactação;

Os clones classificados no grupo um (G1) foram considerados como não responsivos à compactação do solo, ou seja, tolerantes à compactação, pois não houve diferenças significativas para as médias dos contrastes das variáveis avaliadas (C1 e C2). Nesta condição não há redução ou incremento significativo das variáveis com a compactação do solo para os clones desse grupo (Figura 3, 1A e 2A).

No grupo dois (G2), os clones classificados nesse grupo apresentaram moderada tolerância à compactação, pois apresentam diferenças significativas apenas no C2, o que indica a não existência do efeito da média dos dois maiores graus de compactação do solo (C1). Os valores observados para as variáveis podem aumentar ou reduzir significativamente no GC2 em relação a GC3, o que leva a redução ou incremento significativo com a compactação do solo no C2 (Figura 3, 1B e 2B).

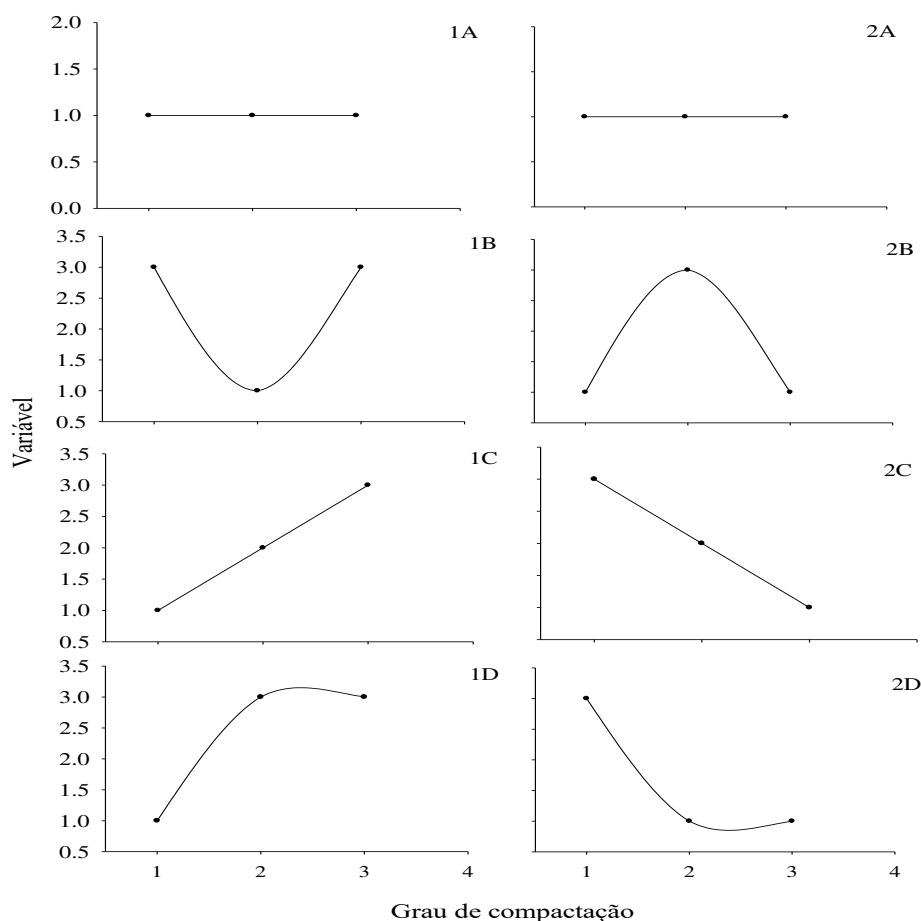


Figura 3. Representação gráfica do comportamento dos clones em função do grau de compactação, para o contraste 1(C1) e contraste 2 (C2) em quatro situações de classificação do comportamento dos clones (A, B, C e D)

Os clones do grupo três (G3), foram classificados como sensíveis à compactação, pois apresentaram diferenças significativas para as comparações entre médias dos dois contrastes (C1 e C2), o que indicam que os clones foram afetados pela compactação do solo (C1 e C2). Nesse caso pode haver a redução ou o aumento significativo com a compactação do solo (Figura 3, 1C e 2C).

No grupo quatro (G4), os clones foram classificados como modernamente sensíveis à compactação, pois as diferenças significativas existentes para C1 e não existentes para C2 indicam que os clones foram afetados pela compactação do solo (C1), mas não o suficiente para apresentarem incremento ou redução com o CG3 (C2) (Figura 3, 1D e 2D).

Posteriormente à identificação dos grupos, utilizou-se duas variações do teste de concordância de Kappa proposto por Cohen (1960), para avaliar a concordância dentro e entre as classificações com múltiplo-avaliadores (Equação 9).

$$Kappa = \frac{P(o)-P(e)}{1-P(e)} \quad (9)$$

em que: KF é o Kappa de Fleiss; P(o) é a proporção observada de concordâncias (soma das respostas concordantes dividida pelo total); P(e) é a proporção esperada de concordâncias (soma dos valores esperados das respostas concordantes dividida pelo total).

Foram calculados o teste Kappa de Fleiss (KF) adaptado por Fleiss (1981), para múltiplas variáveis com fator fixo e o teste Kappa de Randolph (KR) adaptado por Randolph (2005) para múltiplas variáveis com fator livre. Fator fixo diz respeito à avaliadores que sabem a priori a quantidade de casos que devem ser distribuídos em cada categoria. Por exemplo, esse pode ser o caso quando um avaliador está livre para atribuir casos a categorias, desde que haja uma certa quantidade predeterminada de casos em cada categoria no final. Enquanto as livres, são quando os avaliadores não conhecem a priori as quantidades de casos que devem ser distribuídos em cada categoria. Por exemplo, este é o caso quando um avaliador está livre para atribuir casos a categorias sem limites de quantos casos devem entrar em cada categoria.

Na primeira classificação, utilizou-se as variáveis relacionadas ao crescimento, desenvolvimento e produção de matéria seca das mudas e, na segunda, apenas variáveis relacionadas à eficiência nutricional. Procurou-se ao final verificar a concordância das duas classificações dos clones. Para todas as análises estatísticas do presente estudo adotou-se o software Statistica 8.0 (STAT SOFT., 2007).

4. RESULTADOS

4.1. Crescimento, desenvolvimento e produção de matéria seca

O crescimento dos clones de eucalipto foi mensurado através da altura (H), diâmetro (D) e taxa relativa de crescimento em altura (TCRA) e diâmetro (TCRD). Tais variáveis não foram sensíveis neste estudo, pois apresentaram poucas diferenças significativas nos contrastes (C1 e C2) para grande parte dos clones avaliados. Com exceção dos clones 3 e 7 (H e TCRA) e clones 2, 11, 13 e 14 (D e TCRD) (Tabela 4).

Os clones que apresentaram diferenças significativas nos contrastes, em sua maioria, reduziram o crescimento com a compactação do solo (C1 e C2). O clone 7 foi a exceção dentre aqueles que apresentaram diferenças significativas, pois apresentou aumento em H com o aumento da compactação (C1), tendo sido observados incrementos da ordem de 23,63 cm na condição controle (GC1) para 34,75 cm no solo compactado (GC3), com conseqüente aumento da TCAH, de 0,37 cm dia⁻¹ a 0,54 cm dia⁻¹ respectivamente.

O desenvolvimento dos clones foi avaliado pelas variáveis: área foliar específica (AFE) e índice de qualidade de Dickson (IQD). Nesses casos, observaram-se também poucas diferenças significativas, como é o caso de IQD (4 casos em 16) e AFE (8 casos em 16). Observou-se que as diferenças significativas estiveram presentes em maior número de casos para o C2 (Tabela 4).

Ao avaliar os clones que apresentaram diferenças significativas, nota-se diminuição da qualidade das mudas com a compactação, expresso pelo aumento da AFE para os clones 1, 2, 5, 6, 7, 12, 13 e 14, identificando-se incrementos médios da ordem de 154,86 cm² g⁻¹ a 188,75 cm² g⁻¹ e redução dos valores de IQD para os clones 2, 6, 12 e 13, da ordem 1,37 a 1,00. Demonstrando que houve alteração da área da foliar e/ou da massa de matéria seca das plantas, pois houve incremento de 33,89 cm² de área foliar por grama de matéria seca, na ocasião da compactação do solo.

A redução da qualidade das mudas (IQD), como apresentado pelos clones 2, 6, 12 e 13, demonstram um desequilíbrio entre as variáveis altura e diâmetro (redução de D e TCRD para os clones 2, 13 e 14), assim como alterações significativas para as variáveis de produção de matéria seca da planta. Os clones 4, 8, 9, 10, 15 e 16, foram os únicos que não apresentaram diferenças significativas nos contrastes referentes às variáveis de crescimento e desenvolvimento.

Tabela 4. Crescimento e desenvolvimento de clones de eucalipto submetidos a três graus de compactação do solo

Clone	H (cm)					TCAH (cm dia ⁻¹)					TCRH (cm dia ⁻¹)					AFE (cm ² g ⁻¹)				
	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2
1	43,53	33,13	38,75	ns	ns	0,68	0,61	0,52	ns	ns	0,015	0,014	0,012	ns	ns	130,79	173,51	216,90	+ *	+ *
2	39,85	34,98	32,63	ns	ns	0,62	0,55	0,51	ns	ns	0,016	0,015	0,015	ns	ns	130,46	179,61	231,40	+ *	+ *
3	40,25	42,80	30,78	ns	- *	0,63	0,67	0,48	ns	- *	0,017	0,017	0,012	ns	- *	162,41	158,67	149,21	ns	ns
4	38,63	34,76	31,05	ns	ns	0,60	0,54	0,49	ns	ns	0,013	0,012	0,01	ns	ns	156,58	161,19	165,80	ns	ns
5	41,95	37,30	37,93	ns	ns	0,66	0,58	0,59	ns	ns	0,014	0,014	0,014	ns	ns	172,35	170,14	205,00	ns	+ *
6	35,83	36,70	28,53	ns	ns	0,56	0,57	0,45	ns	ns	0,014	0,014	0,012	ns	ns	151,63	169,22	126,86	ns	- *
7	23,63	28,88	34,75	+ *	ns	0,37	0,45	0,54	+ *	ns	0,006	0,007	0,009	ns	ns	138,28	107,98	140,97	ns	+ *
8	36,63	34,40	35,58	ns	ns	0,57	0,56	0,54	ns	ns	0,015	0,014	0,014	ns	ns	169,74	163,87	142,99	ns	ns
9	39,78	38,35	36,63	ns	ns	0,62	0,6	0,57	ns	ns	0,014	0,013	0,012	ns	ns	56,76	149,73	160,66	ns	ns
10	32,90	30,88	38,13	ns	ns	0,51	0,6	0,48	ns	ns	0,012	0,013	0,015	ns	ns	99,54	196,55	203,24	ns	ns
11	41,38	37,75	37,23	ns	ns	0,65	0,59	0,58	ns	ns	0,015	0,014	0,014	ns	ns	181,17	166,74	185,28	ns	ns
12	29,86	32,78	28,80	ns	ns	0,47	0,51	0,45	ns	ns	0,013	0,013	0,012	ns	ns	217,33	166,17	205,71	ns	+ *
13	32,60	29,03	25,98	ns	ns	0,51	0,45	0,41	ns	ns	0,013	0,011	0,01	ns	ns	162,91	169,15	208,62	ns	+ *
14	32,80	30,20	33,68	ns	ns	0,51	0,53	0,47	ns	ns	0,013	0,012	0,012	ns	ns	135,09	99,72	174,54	ns	+ *
15	31,03	32,38	29,13	ns	ns	0,48	0,51	0,46	ns	ns	0,013	0,013	0,013	ns	ns	156,66	126,30	146,87	ns	ns
16	31,93	31,96	34,83	ns	ns	0,50	0,5	0,54	ns	ns	0,013	0,014	0,012	ns	ns	89,35	153,77	168,54	ns	ns
Clone	Dc (mm)					TCADc (mm dia ⁻¹)					TCRDc (mm dia ⁻¹)					IQD				
	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2
1	4,54	4,15	4,48	ns	ns	0,071	0,07	0,065	ns	ns	0,014	0,014	0,013	ns	ns	1,05	1,22	1,29	ns	ns
2	4,78	4,38	3,36	- *	- *	0,075	0,069	0,053	- *	- *	0,017	0,015	0,014	- *	ns	1,39	1,37	0,92	ns	- *
3	4,24	4,60	4,05	ns	ns	0,066	0,072	0,063	ns	ns	0,014	0,015	0,013	ns	ns	1,19	1,24	1,15	ns	ns
4	5,22	4,65	4,25	ns	ns	0,082	0,073	0,066	ns	ns	0,017	0,016	0,015	ns	ns	1,76	1,70	1,49	ns	ns
5	4,95	4,95	4,12	ns	ns	0,077	0,077	0,064	ns	ns	0,014	0,014	0,014	ns	ns	1,24	1,14	1,04	ns	ns
6	4,59	3,88	3,64	ns	ns	0,072	0,061	0,057	ns	ns	0,016	0,014	0,013	- *	ns	1,49	1,22	1,19	- *	ns
7	2,85	3,10	3,33	ns	ns	0,045	0,048	0,052	ns	ns	0,007	0,007	0,009	ns	ns	1,12	1,07	0,84	ns	ns
8	4,32	4,31	3,75	ns	ns	0,068	0,067	0,059	ns	ns	0,016	0,015	0,014	ns	ns	1,20	1,16	1,05	ns	ns
9	3,75	4,40	3,86	ns	ns	0,059	0,069	0,06	ns	ns	0,013	0,015	0,014	ns	ns	1,21	1,34	1,18	ns	ns
10	4,55	4,00	4,16	ns	ns	0,071	0,065	0,062	ns	ns	0,016	0,014	0,014	ns	ns	1,22	1,31	1,05	ns	ns
11	4,81	3,87	3,26	- *	ns	0,075	0,061	0,051	- *	ns	0,017	0,015	0,012	- *	ns	1,09	1,00	1,03	ns	ns
12	4,32	4,38	3,59	ns	ns	0,068	0,068	0,056	ns	ns	0,015	0,015	0,013	ns	ns	1,40	1,47	1,04	ns	- *
13	4,33	3,87	2,76	- *	- *	0,068	0,06	0,043	- *	- *	0,014	0,014	0,01	ns	- *	1,19	1,34	0,85	ns	- *
14	4,19	3,34	2,91	- *	ns	0,066	0,052	0,045	- *	ns	0,015	0,012	0,011	- *	ns	1,15	1,12	1,01	ns	ns
15	3,64	3,19	2,97	ns	ns	0,057	0,05	0,046	ns	ns	0,015	0,014	0,013	ns	ns	1,05	1,09	0,92	ns	ns
16	3,34	3,93	4,07	ns	ns	0,052	0,061	0,064	ns	ns	0,012	0,013	0,015	ns	ns	0,98	1,05	1,13	ns	ns

¹ GC1: Grau de compactação um, 1060 kg m³; GC2: Grau de compactação dois, 1190 kg m³; e GC3: Grau de compactação três, 1290 kg m³; Contraste um (C1 = $\bar{y}_{GC2} + GC3$ vs \bar{y}_{GC1}); Contraste dois (C2 = \bar{y}_{GC3} vs \bar{y}_{GC2});

² *significativo ao nível de 5% de probabilidade e ns = não significativo ao nível de 5% de probabilidade (ANOVA), onde há possibilidade de efeito positivo significativo (+*), ou seja, aumento da média da variável em questão com a compactação, ou efeito negativo significativo (-*), com respectiva diminuição da média da variável com a compactação; ³ Altura (H), taxa de crescimento absoluto em altura (TCAH), taxa de crescimento relativo em altura (TCRH), diâmetro do coleto (Dc), taxa de crescimento absoluto em diâmetro (TCADc), taxa de crescimento relativo em diâmetro (TCRDc), área foliar específica (AFE) e índice de qualidade de Dickson (IQD).

A produção de matéria seca de folha (MSF), caule (MSC) e parte aérea (MSPA) foram diretamente impactadas pela compactação do solo (Tabela 5) e (Figura 4, 5 e 6). Ocorreram reduções em todas as situações, com poucos casos de clones que apresentaram respostas positivas à compactação (1, 7, 11 e 14). Observou-se que estas variáveis foram bastante sensíveis a compactação, em vista do grande número de diferenças significativas (média de 11 casos em 16), quando comparado as variáveis de crescimento abordados no tópico anterior (H e D).

As reduções de produção de MSF foram da ordem de 12,09 g na condição controle (GC1) para 10,12 g no solo compactado (GC3), fato este bastante frequente (11 casos em 16). Ocorreram reduções também para a MSC, na condição controle (9,37 g) em relação ao solo compactado (6,61 g), com presença de 11 casos em 16, assim como incrementos significativos de até 0,65 g de MSC com a compactação.

Houve também grande número de diferenças significativas negativas (12 casos em 16) e nenhum caso de incremento para a MSPA. As reduções médias da MSPA foram de 21,01g na condição controle à 17,15 g no solo compactado. As perdas de matéria seca registradas com a compactação foram de até 3,86 g por planta, especialmente para a parte aérea.

Os clones que não foram afetados pela compactação sejam para a produção de MSF (4, 10, 11, 14 e 15), MSC (1, 6, 10 e 16) ou MSPA (7, 9, 10 e 11) apresentaram-se indiferentes. Desta forma, observa-se que o clone 10 foi o único material genético que não apresentou reduções a nível de produção de matéria seca com a compactação em todos os compartimentos citados (Tabela 5).

A produção de matéria seca de raízes finas (MSRF), raízes grossas (MSRG) e raízes totais (MSR) apresentaram menor número de interações significativas, quando comparados a parte aérea dos clones. Houve incrementos (MSRG e MSR) e reduções significativas para todos os compartimentos relacionados a raízes. O maior número de casos significativos foi observado para a MSRG (8 casos em 16), sendo a maior parte incrementos, expressando aumento de até 0,27 g de raiz com a compactação. Os clones 2 e 6 apresentaram redução da produção da MSRF com a compactação, essa redução foi da ordem de 1,42 g na condição controle para 0,96 g no solo compactado, demonstrando-se sensíveis a compactação.

Tabela 5. Produção e partição de matéria seca de clones de eucalipto submetidos a três graus de compactação do solo

Clone	MSF (g)					MSC (g)					MSPA (g)					MSRF (g)					MSRG (g)					MST (g)				
	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2
1	13,05	11,04	10,62	- *	ns	10,33	9,45	8,42	ns	ns	23,38	20,49	19,04	- *	ns	1,07	1,21	1,32	ns	ns	0,54	0,82	1,00	+ *	ns	25,00	21,06	22,81	- *	ns
2	13,62	13,24	8,21	- *	- *	8,73	8,66	6,90	- *	ns	22,35	21,90	15,11	- *	- *	1,49	1,3	0,87	ns	- *	0,90	0,99	0,87	ns	ns	24,75	24,19	16,85	- *	- *
3	11,72	13,55	10,38	ns	- *	8,98	9,63	7,33	- *	ns	20,70	23,18	17,72	ns	- *	1,32	1,53	1,06	- *	ns	0,83	0,56	0,81	ns	ns	22,85	25,27	19,59	ns	- *
4	12,23	12,17	10,54	ns	ns	10,81	9,38	8,18	ns	- *	23,04	21,55	18,71	- *	ns	1,72	1,55	1,47	ns	ns	1,46	1,49	1,18	ns	- *	26,22	24,59	21,37	- *	ns
5	13,29	13,01	10,44	ns	- *	10,84	8,71	7,55	ns	- *	24,13	21,71	18,00	- *	- *	1,04	1,16	0,8	ns	ns	0,90	0,52	1,01	ns	+ *	26,07	23,39	19,81	- *	- *
6	13,80	12,28	11,34	- *	- *	9,31	8,82	7,53	ns	ns	23,11	21,10	18,86	- *	ns	1,45	1,47	0,95	- *	ns	1,07	0,73	1,03	ns	+ *	25,63	23,29	20,84	- *	ns
7	10,26	11,73	9,39	ns	- *	9,57	7,74	8,24	ns	+ *	19,83	19,46	17,63	ns	ns	1,08	1,1	0,86	ns	ns	0,69	0,74	0,6	ns	ns	21,60	21,31	19,09	ns	ns
8	12,82	11,44	10,38	- *	- *	8,39	6,99	6,53	ns	- *	21,21	18,43	16,91	- *	ns	1,16	1,11	0,97	ns	ns	0,82	0,84	1,02	ns	ns	23,18	20,39	18,89	- *	ns
9	12,82	14,50	12,21	ns	- *	9,83	9,25	8,91	ns	ns	22,65	23,75	21,12	ns	ns	1,31	1,42	1,21	ns	ns	0,96	0,92	0,84	ns	ns	24,91	26,01	23,25	ns	ns
10	11,69	12,38	13,31	ns	ns	9,15	9,34	7,83	ns	ns	21,53	21,14	21,03	ns	ns	1,17	1,21	1,07	ns	ns	0,64	0,9	0,61	ns	ns	23,34	23,14	22,82	ns	ns
11	11,25	11,46	10,84	ns	ns	9,66	7,22	8,17	ns	+ *	20,91	19,02	18,68	ns	ns	1,00	1,00	0,89	ns	ns	0,74	0,75	1,10	ns	+ *	22,65	20,44	21,01	ns	ns
12	9,94	12,37	8,86	ns	- *	6,76	7,78	5,79	+ *	ns	16,70	20,15	14,65	ns	- *	1,21	1,51	1,14	ns	ns	1,36	1,02	0,73	- *	ns	19,27	22,68	16,52	ns	- *
13	10,40	10,71	8,13	ns	- *	8,54	8,08	5,11	- *	ns	18,94	18,79	13,24	- *	- *	1,26	1,14	0,72	ns	ns	0,68	1,15	0,92	+ *	ns	20,88	21,08	14,88	ns	- *
14	10,71	12,92	11,60	ns	ns	7,52	8,97	7,04	+ *	ns	18,23	21,89	18,64	ns	ns	1,19	1,17	1,16	ns	ns	0,67	0,70	0,90	ns	ns	20,12	23,72	20,71	ns	ns
15	11,68	11,76	10,78	ns	ns	9,31	6,34	4,71	ns	- *	20,99	18,10	15,49	- *	ns	1,2	1,33	1,06	ns	ns	0,44	0,85	0,70	+ *	ns	22,63	20,27	17,25	- *	ns
16	11,34	13,28	10,94	ns	- *	8,00	8,33	7,10	ns	ns	19,34	21,61	18,04	ns	- *	0,95	0,99	0,70	ns	ns	0,77	0,86	0,97	ns	ns	21,07	23,17	20,00	ns	ns
	PARTF (%)					PARTC (%)					PARTPA (%)					PARTRF (%)					PARTRG (%)					PARTR (%)				
1	52,2	49,0	49,7	ns	ns	41,3	42,0	39,4	ns	ns	93,5	91,0	89,1	- *	ns	4,3	5,4	6,2	ns	ns	2,2	3,6	4,7	+ *	ns	6,5	9,0	10,9	+ *	ns
2	55,0	54,7	48,7	ns	- *	35,3	35,8	41,0	ns	+ *	90,3	90,5	89,7	ns	ns	6,0	5,4	5,2	ns	ns	3,7	4,1	5,2	ns	ns	9,7	9,5	10,3	ns	ns
3	51,3	53,6	53,0	ns	ns	39,3	38,1	37,4	ns	ns	90,6	91,7	90,5	ns	ns	5,8	6,0	5,4	ns	ns	3,6	2,2	4,1	ns	+ *	9,4	8,3	9,5	ns	ns
4	46,6	49,5	49,3	ns	ns	41,2	38,1	38,3	ns	ns	87,9	87,6	87,6	ns	ns	6,6	6,3	6,9	ns	ns	5,6	6,0	5,5	ns	ns	12,1	12,4	12,4	ns	ns
5	51,0	55,3	53,1	ns	ns	41,6	37,0	38,4	ns	ns	92,6	92,3	91,5	ns	ns	4,0	3,4	5,9	ns	ns	3,4	4,3	2,6	ns	+ *	7,4	7,7	8,5	ns	ns
6	53,8	52,7	54,4	ns	ns	36,3	37,9	36,1	ns	ns	90,2	90,6	90,5	ns	ns	5,7	6,3	4,5	ns	ns	4,2	3,1	4,9	ns	+ *	9,8	9,4	9,5	ns	ns
7	47,5	55,0	49,2	ns	- *	44,3	38,7	40,5	- *	+ *	91,8	93,7	89,7	ns	ns	5,0	5,2	4,5	ns	ns	3,2	3,5	3,1	ns	ns	8,2	8,7	7,6	ns	ns
8	55,3	56,0	55,0	ns	ns	36,2	34,3	34,6	ns	ns	91,5	90,3	89,6	ns	ns	5,0	4,7	5,9	ns	ns	3,5	5,0	4,5	+ *	ns	8,5	9,7	10,4	ns	ns
9	51,4	55,8	52,5	ns	ns	39,5	35,6	38,3	ns	ns	90,9	91,3	90,8	ns	ns	5,3	5,5	5,2	ns	ns	3,9	3,2	4,0	ns	ns	9,1	8,7	9,2	ns	ns
10	53,0	57,3	51,5	ns	+ *	39,2	40,2	34,5	ns	- *	92,2	97,5	85,9	ns	ns	5,0	5,2	4,7	ns	ns	2,7	3,9	2,7	ns	ns	7,8	9,1	7,4	ns	ns
11	49,7	55,2	52,4	ns	ns	42,6	39,4	34,9	- *	ns	92,3	94,5	87,4	ns	ns	4,4	4,8	4,3	ns	ns	3,3	3,6	5,3	ns	+ *	7,7	8,5	9,6	ns	ns
12	51,6	54,6	53,6	ns	ns	35,1	34,3	35,1	ns	ns	86,7	88,9	88,6	+ *	ns	6,3	6,6	6,9	ns	ns	7,1	4,5	4,4	- *	ns	13,3	11,1	11,4	- *	ns
13	49,8	50,8	54,6	ns	ns	40,9	38,4	34,3	- *	ns	90,7	89,2	89,0	ns	ns	6,0	5,4	4,8	ns	ns	3,3	5,5	6,2	+ *	ns	9,3	10,8	11,0	ns	ns
14	53,2	53,9	56,7	ns	ns	37,4	37,4	34,4	ns	ns	90,6	91,4	91,1	ns	- *	5,9	4,9	5,7	ns	ns	3,5	3,7	3,3	ns	+ *	9,4	8,6	8,9	ns	+ *
15	51,6	58,0	62,5	+ *	ns	41,1	31,3	27,3	- *	ns	92,8	89,2	89,8	- *	ns	5,3	6,6	6,2	ns	ns	1,9	4,2	4,1	+ *	ns	7,2	10,8	10,2	+ *	ns
16	53,8	56,3	55,8	ns	ns	38,0	35,4	36,2	ns	ns	91,8	91,7	92,1	ns	- *	4,5	4,2	3,6	ns	+ *	3,7	4,1	4,4	ns	ns	8,2	8,3	7,9	ns	+ *

¹ GC1: Grau de compactação um, 1060 kg m³; GC2: Grau de compactação dois, 1190 kg m³; e GC3: Grau de compactação três, 1290 kg m³; Contraste um (C1 = $\bar{y}_{GC2} + GC3$ vs \bar{y}_{GC1}); Contraste dois (C2 = \bar{y}_{GC3} vs \bar{y}_{GC2});

² *significativo ao nível de 5% de probabilidade e ns = não significativo ao nível de 5% de probabilidade (ANOVA), onde há possibilidade de efeito positivo significativo (+*), ou seja, aumento da média da variável em questão com a compactação, ou efeito negativo significativo (-*), com respectiva diminuição da média da variável com a compactação;

³ Matéria seca de folha (MSF), caule (MSC), parte aérea (MSPA), raiz fina (MSRF), raiz grossa (MSRG), matéria seca total (MST), partição de matéria seca de folha (PARTF), caule (PARTC), parte aérea (PARTPA), raiz fina (PARTRF), raiz grossa (PARTRG) e seca de raiz (PARTR).



Figura 4: Clones de eucalipto nos graus de compactação um (GC1, 1060 kg m³), dois (GC2, 1190 kg m³) e três (GC3, 1290 kg m³) (da esquerda para a direita), aos 60 dias de experimento



Figura 5: Clones de eucalipto nos graus de compactação um (GC1, 1060 kg m³), dois (GC2, 1190 kg m³) e três (GC3, 1290 kg m³) (da esquerda para a direita), aos 60 dias de experimento



Figura 5: Clones de eucalipto nos graus de compactação um (GC1, 1060 kg m³), dois (GC2, 1190 kg m³) e três (GC3, 1290 kg m³) (da esquerda para a direita), aos 60 dias de experimento

4.2. Morfologia radicular

O crescimento e desenvolvimento radicular dos clones foi avaliado por meio das variáveis: diâmetro médio radicular (Dmr), comprimento radicular (Lr), área superficial (As), volume radicular (Vr), número de pontas (Pt) e número de pontas por comprimento de raiz (Pt/L) (Tabela 6). Todas as variáveis associadas a morfologia radicular apresentaram diferenças significativas nos contrastes, sendo no geral, negativas, com exceção do Pt/L que se apresentou positiva para os clones 9 e 15 (Figura 6 e 7).

O comportamento dos clones 9 e 15 em relação as variáveis Pt e a relação Pt/L foi diferente dos demais, pois foram os únicos clones que apresentaram aumentos do Pt e de Pt/ L com a compactação, assim como aumento do Lr e As (clone 15). Os respectivos materiais genéticos conseguiram conviver melhor com a compactação, não apenas sobrevivendo ao estresse, mas modificando sua estrutura radicular. O raciocínio inverso, também pode ser associado ao clone 6, pois esse material genético apresentou grandes perdas com a compactação do solo, fato observado para quase todas as variáveis avaliadas, com exceção do Pt/L.

As variáveis mais sensíveis quanto a ocorrência de diferenças significativas dos contrastes foram, na sequência: Dmr, Pt, Lr, As e Vr. O Dmr da raiz diferenciou-se com o grau de compactação, com casos negativos (7 casos em 16) e positivos (2 casos em 16), sendo similares as situações para as demais variáveis. Os clones 4, 9, 13, 14 e 15 apresentaram incrementos em quase todas as variáveis avaliadas (exceção Vr). Tais incrementos foram, em média, da ordem de 0,41 mm a 0,58 mm (clones 4 e 13) para o Dmr; 9,17 cm à 16,99 cm (clones 14 e 15) para o Lr e 1,39 cm² à 2,07 cm² (clones 14 e 15) para a As e pt de 64,22 a 82,24.

Os clones 10, 11 e 16 foram os únicos que não apresentaram diferenças significativas em nenhuma variável morfológica de raízes avaliada. Tais resultados demonstram tolerância à compactação, sem alterações significativas de morfologia radicular. Os clones 1, 3, 7, 8 e 12 também se mostraram moderadamente tolerantes nesse sentido, contudo, apresentaram diferenças significativas para apenas uma variável, o que variou conforme cada caso: 1 (Dmr), 3 (Vr), 7 (Vr), 8 (Dmr) e 12 (Pt), demonstrando que mesmo com reduções pontuais em algumas variáveis em questão, conseguiram conviver com a compactação sem perdas significativas nas demais variáveis.

Tabela 6. Morfologia radicular de clones de eucalipto submetidos a três graus de compactação

Clone	Dmr (mm)					Lr (cm)					As (cm ²)				
	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2
1	0,47	0,63	0,44	ns	- *	13,17	13,27	12,66	ns	ns	1,35	1,64	2,06	ns	ns
2	0,64	0,61	0,43	ns	- *	20,03	19,03	11,44	ns	ns	2,56	2,23	1,44	- *	- *
3	0,39	0,42	0,37	ns	ns	17,10	19,50	15,93	ns	ns	2,49	2,51	2,64	ns	ns
4	0,40	0,61	0,55	+ *	ns	32,21	35,47	30,75	ns	ns	2,42	3,44	2,79	+ *	ns
5	0,52	0,47	0,37	- *	- *	18,09	22,92	15,00	ns	- *	2,20	2,26	1,80	ns	ns
6	0,59	0,45	0,44	- *	ns	21,49	18,49	7,81	- *	- *	2,81	2,32	1,56	- *	- *
7	0,50	0,40	0,39	ns	ns	17,17	17,99	15,63	ns	ns	2,01	2,25	1,84	ns	ns
8	0,52	0,39	0,35	- *	ns	20,12	22,01	27,63	ns	ns	1,93	1,90	1,90	ns	ns
9	0,57	0,58	0,41	ns	ns	22,56	23,86	18,03	ns	ns	2,68	2,58	2,58	ns	ns
10	0,39	0,53	0,40	ns	ns	18,62	16,90	12,94	ns	ns	1,20	1,31	1,60	ns	ns
11	0,47	0,41	0,50	ns	ns	23,92	22,63	20,78	ns	ns	1,87	2,03	1,56	ns	ns
12	0,46	0,43	0,43	ns	ns	18,33	16,84	11,49	ns	ns	2,18	2,13	1,48	ns	ns
13	0,42	0,77	0,38	+ *	- *	18,01	19,06	19,88	ns	ns	2,23	2,21	2,20	ns	ns
14	0,62	0,53	0,38	- *	ns	22,23	17,46	9,29	- *	+ *	2,42	1,88	1,15	- *	- *
15	0,44	0,45	0,39	ns	ns	9,06	23,44	9,61	+ *	- *	1,63	2,66	1,89	+ *	- *
16	0,40	0,37	0,34	ns	ns	15,26	19,41	21,50	ns	ns	1,71	2,02	2,02	ns	ns
	Vr (cm ³)					Pt (n°)					Pt/L (n° cm ⁻¹)				
1	0,018	0,019	0,021	ns	ns	46,17	67,07	55,74	ns	ns	3,41	5,39	4,14	ns	ns
2	0,025	0,020	0,016	ns	ns	65,87	66,04	40,41	ns	ns	3,45	3,69	3,46	ns	ns
3	0,025	0,025	0,018	- *	ns	65,78	73,67	82,23	ns	ns	3,81	4,74	4,19	ns	ns
4	0,023	0,029	0,023	ns	ns	108,67	145,19	117,48	ns	- *	3,43	4,09	3,81	ns	ns
5	0,022	0,024	0,013	ns	ns	63,77	58,62	64,50	ns	ns	3,58	2,90	4,33	ns	ns
6	0,026	0,021	0,017	ns	- *	75,69	72,04	26,85	- *	- *	3,51	3,88	3,61	ns	ns
7	0,016	0,015	0,021	- *	ns	56,74	63,25	44,84	ns	ns	3,31	3,50	2,86	ns	ns
8	0,026	0,017	0,015	ns	ns	70,60	78,75	73,15	ns	ns	3,24	4,60	2,90	ns	ns
9	0,024	0,023	0,023	- *	ns	85,15	117,68	101,43	+ *	ns	3,84	5,44	5,82	+ *	ns
10	0,015	0,020	0,016	ns	ns	38,49	36,88	47,22	ns	ns	2,50	2,53	3,80	ns	ns
11	0,015	0,017	0,019	ns	ns	50,18	42,15	61,81	ns	ns	2,05	2,03	2,99	ns	ns
12	0,021	0,025	0,014	ns	ns	77,84	71,75	43,87	ns	- *	4,22	4,30	3,81	ns	ns
13	0,022	0,019	0,020	ns	- *	74,60	80,10	82,16	ns	ns	4,11	4,29	4,13	ns	ns
14	0,024	0,017	0,018	ns	ns	92,83	32,46	46,12	- *	ns	4,06	3,56	2,60	ns	ns
15	0,019	0,024	0,017	- *	ns	43,30	100,88	63,05	+ *	- *	4,96	4,42	9,12	+ *	+ *
16	0,017	0,018	0,018	ns	ns	40,54	46,48	55,05	ns	ns	2,76	2,43	2,66	ns	ns

¹ GC1: Grau de compactação um, 1060 kg m³; GC2: Grau de compactação dois, 1190 kg m³; e GC3: Grau de compactação três, 1290 kg m³; Contraste um ($C1 = \bar{y}_{GC2} + \bar{y}_{GC3} vs \bar{y}_{GC1}$); Contraste dois ($C2 = \bar{y}_{GC3} vs \bar{y}_{GC2}$);

² *significativo ao nível de 5% de probabilidade e ns = não significativo ao nível de 5% de probabilidade (ANOVA), onde há possibilidade de efeito positivo significativo (+*), ou seja, aumento da média da variável em questão com a compactação, ou efeito negativo significativo (-*), com respectiva diminuição da média da variável com a compactação;

³ Diâmetro médio radicular (Dmr), comprimento radicular (Lr), área superficial (As), volume radicular (Vr), número de pontas (Pt) e número de pontas por comprimento de raiz (Pt/L).

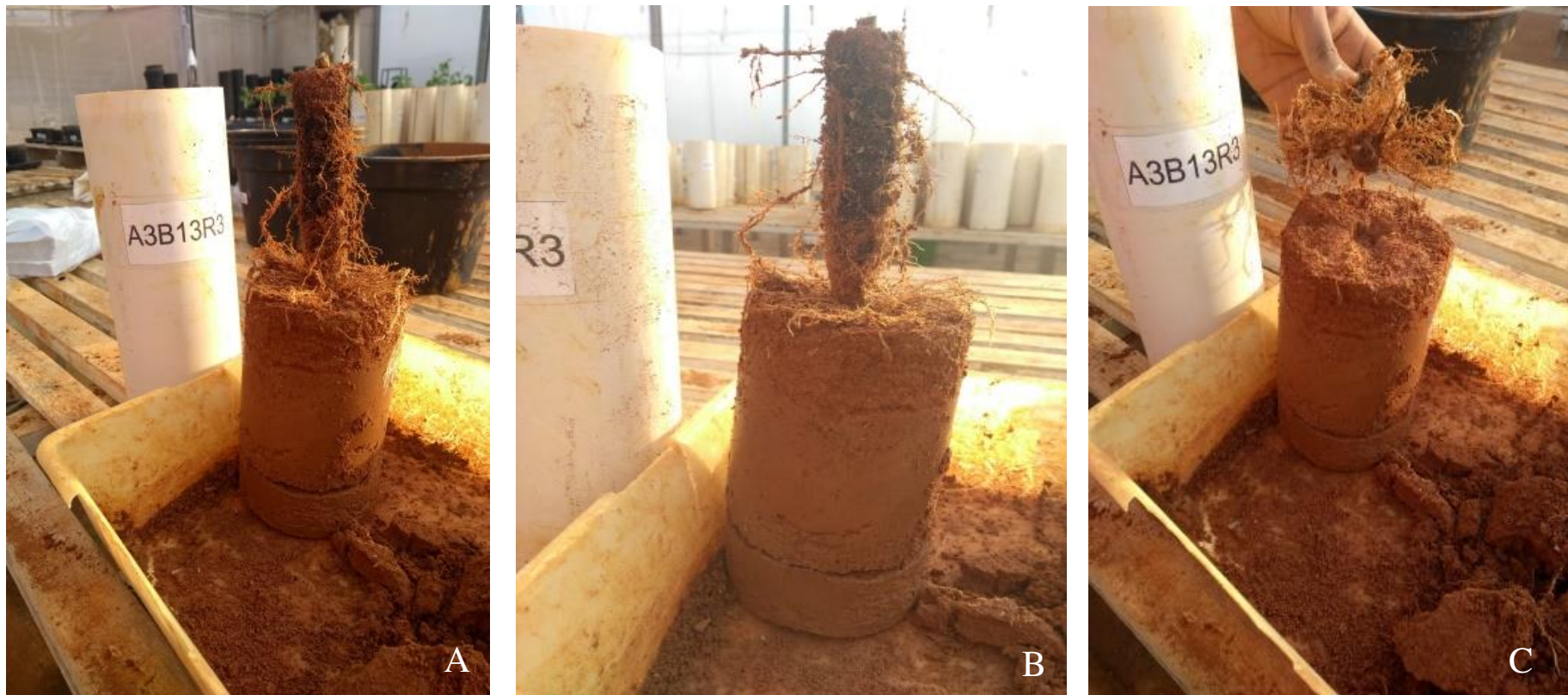


Figura 6. Crescimento radicular do clone 13: (A) Raízes que não penetraram a massa de solo compactado; (B) Crescimento lateral das raízes; (C) Baixa densidade radicular



Figura 7. Crescimento radicular do clone 4: (A) Raízes que penetraram a região central da massa de solo compactado; (B) Raízes com espessamento favorecido pela compactação; (C) Densidade radicular

4.3. Teores e conteúdo de nutrientes

Os clones de eucalipto, quando submetidos à diferentes graus de compactação apresentaram respostas diferenciadas de acordo com o compartimento da planta (folha, caule e raiz) analisado e o nutriente (macro e micronutrientes) em estudo. Contudo, conhecer o comportamento geral dos clones (teores totais da planta), demonstrou-se a melhor estratégia na compreensão do comportamento geral dos clones frente à compactação do solo (Tabela 7).

Os teores totais de nutrientes nos clones de eucalipto (tTN) foram afetados de forma discreta pela compactação. Contudo, observou-se reduções significativas de nutrientes na planta (30 casos), dos quais a maior parte para os micronutrientes (20 casos) e alguns para os macronutrientes (10 casos), especialmente para os teores de P, Mn, Cu e Zn. Ocorreram também incrementos nos teores totais de nutrientes (B e N) nas plantas em função da compactação (12 casos), assim como clones indiferentes a compactação (3, 11 e 16).

Os clones 1, 2, 4 e 8 aumentaram os teores médios de nitrogênio (TN) na planta com a compactação, da ordem de 23,90 g kg⁻¹ a 30,95 g kg⁻¹. Outro importante incremento observado foi relacionado ao TB nas plantas, onde os clones 2, 5, 7, 9, 10, 12 e 15 aumentaram tais teores com a compactação, de 79,24 g kg⁻¹ a 98,73 g kg⁻¹. Com destaque para os clones 1 e 8, pois foram os únicos que apresentaram reduções dos teores de macronutrientes com a compactação em todos os compartimentos avaliados.

Os teores de macronutrientes foram observados em maior proporção nas folhas, seguido do caule e raízes, com exceção dos teores de Ca (TCa) e P (TP), pois para esses nutrientes os maiores teores encontraram-se no caule. As diferenças significativas nos contrastes dos macronutrientes, no geral, foram negativas (35 casos).

A raiz foi o compartimento que apresentou o maior número de diferenças significativas negativas nos contrastes de teores de macronutrientes (21 casos), seguido das folhas (10 casos) e caule (4 casos), especialmente para o TP (9 casos) e TK (10 casos). Além de casos negativos, como já citado, houve casos de diferenças significativas positivas para teores de macronutrientes também, mesmo que em menor número (18 casos).

Tabela 7. Teor total de nutrientes (tTN) em clones de eucalipto submetidos a três graus de compactação do solo

Clone	Nitrogênio (g kg ⁻¹)					Fósforo (g kg ⁻¹)					Potássio (g kg ⁻¹)					Magnésio (g kg ⁻¹)					Cálcio (mg kg ⁻¹)				
	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2
1	27,26	23,51	30,09	ns	+	3,59	3,25	2,29	-*	-*	34,59	33,24	31,40	ns	ns	4,87	4,46	4,23	-*	ns	41,74	44,47	33,28	ns	-*
2	21,39	23,20	30,98	+	+	2,79	2,52	2,59	ns	ns	30,07	29,04	33,50	ns	ns	3,61	3,76	3,75	ns	ns	32,98	31,84	27,79	ns	ns
3	22,92	22,77	28,07	ns	ns	3,08	3,10	2,90	ns	ns	30,96	32,27	31,74	ns	ns	3,93	4,13	3,90	ns	ns	33,60	36,20	35,94	ns	ns
4	23,27	24,17	31,13	ns	+	2,89	2,74	2,57	ns	ns	29,29	32,63	32,27	ns	ns	4,20	4,04	4,50	ns	ns	32,97	33,95	35,12	ns	ns
5	24,28	25,13	27,37	ns	ns	2,95	2,74	2,95	ns	ns	28,77	30,51	29,43	ns	ns	3,66	3,73	3,62	ns	ns	30,09	31,17	31,85	ns	ns
6	24,71	24,94	27,06	ns	ns	2,90	2,57	2,80	ns	ns	28,16	30,09	31,98	ns	ns	3,10	3,14	3,34	ns	ns	29,43	28,18	32,82	ns	ns
7	24,09	23,37	29,28	ns	ns	3,05	2,92	3,00	ns	ns	30,65	28,76	31,69	ns	ns	3,78	4,05	3,75	ns	ns	32,97	33,44	35,24	ns	ns
8	23,71	26,47	31,59	+	+	4,06	3,13	2,90	-*	ns	35,05	30,89	32,68	ns	ns	4,35	4,23	4,32	ns	ns	38,99	35,63	35,71	ns	ns
9	32,08	24,13	26,92	-*	ns	3,04	2,57	2,48	-*	ns	32,58	29,39	30,90	ns	ns	3,62	3,81	4,29	ns	ns	29,99	31,00	36,61	ns	ns
10	23,60	23,74	26,55	ns	ns	3,56	3,14	2,89	-*	ns	31,39	30,68	29,95	ns	ns	4,12	3,90	4,14	ns	ns	34,99	31,49	33,79	ns	ns
11	22,47	25,39	25,75	ns	ns	2,79	2,90	2,68	ns	ns	30,91	30,71	31,65	ns	ns	3,50	3,58	3,40	ns	ns	32,16	31,57	31,58	ns	ns
12	27,17	24,48	29,73	ns	ns	2,76	2,93	2,89	ns	ns	26,87	29,35	31,45	ns	ns	3,83	3,85	4,10	ns	ns	30,17	36,36	32,04	ns	ns
13	25,51	25,33	26,68	ns	ns	2,89	3,01	3,15	ns	ns	30,73	29,75	34,61	ns	ns	3,97	3,91	4,20	ns	ns	34,06	30,70	36,13	ns	ns
14	30,69	25,80	25,78	ns	ns	3,14	3,05	3,14	ns	ns	36,53	32,20	31,23	-*	ns	4,49	4,16	4,20	ns	ns	35,55	39,65	34,96	ns	ns
15	23,08	26,85	26,22	ns	ns	3,04	2,84	3,23	ns	ns	28,75	30,17	33,55	ns	ns	3,86	3,79	4,02	ns	ns	30,28	32,53	29,42	ns	ns
16	29,15	371,16	30,19	ns	ns	2,73	2,93	2,98	ns	ns	34,70	33,13	33,71	ns	ns	3,11	3,47	3,76	ns	ns	27,83	30,13	34,18	ns	ns
	Enxofre (g kg ⁻¹)					Manganês (mg kg ⁻¹)					Boro (mg kg ⁻¹)					Cobre (mg kg ⁻¹)					Zinco (mg kg ⁻¹)				
1	3,96	3,35	2,72	-*	-*	548,23	426,27	462,91	-*	ns	88,31	84,96	89,96	ns	ns	106,67	78,04	82,23	-*	ns	246,16	149,63	154,17	-*	ns
2	2,49	2,72	2,55	ns	ns	436,23	332,43	317,22	-*	ns	72,98	86,29	90,72	+	ns	99,75	69,74	75,29	-*	ns	148,90	157,28	135,94	ns	ns
3	2,67	2,97	2,53	ns	ns	397,87	391,17	293,26	ns	ns	88,39	78,87	81,36	ns	ns	80,18	74,79	66,83	ns	ns	159,05	140,83	124,59	ns	ns
4	2,68	3,14	2,81	ns	ns	426,67	394,56	374,27	ns	ns	75,82	74,79	90,48	ns	ns	97,16	75,16	65,18	-*	ns	163,38	172,50	157,84	ns	ns
5	2,59	2,52	2,37	ns	ns	416,43	344,68	307,58	-*	ns	88,73	76,93	93,06	ns	+	103,22	74,01	69,06	-*	ns	150,31	130,83	169,61	ns	ns
6	2,69	2,25	2,85	ns	ns	365,70	265,28	265,77	-*	ns	85,60	93,36	90,65	ns	ns	98,36	70,94	68,11	-*	ns	187,82	123,24	154,68	-*	ns
7	2,77	2,63	3,19	ns	ns	391,21	361,40	325,28	ns	ns	80,56	88,14	100,56	+	ns	72,32	90,53	77,22	ns	ns	157,04	173,49	139,15	ns	ns
8	3,18	2,72	2,63	ns	ns	447,65	432,37	329,33	ns	ns	80,63	87,96	97,44	ns	ns	97,16	87,34	68,34	-*	ns	191,42	238,67	128,16	ns	-*
9	2,80	2,57	2,44	ns	ns	412,82	351,57	345,42	ns	ns	76,80	90,33	94,68	+	ns	78,95	86,69	62,42	ns	-*	167,66	175,68	108,01	ns	-*
10	2,97	2,43	2,65	ns	ns	416,96	399,14	393,07	ns	ns	79,30	71,61	100,68	ns	+	79,76	70,23	73,74	ns	ns	176,67	121,94	119,58	-*	ns
11	2,40	2,47	2,38	ns	ns	343,82	384,06	335,01	ns	ns	89,19	86,09	98,98	ns	ns	77,52	78,98	85,70	ns	ns	146,56	165,39	146,77	ns	ns
12	2,43	2,63	2,85	ns	ns	397,03	346,72	303,18	ns	ns	76,79	91,80	104,63	+	ns	86,53	68,95	70,08	ns	ns	174,40	142,77	100,59	-*	ns
13	2,49	2,77	2,95	ns	ns	407,06	403,71	406,03	ns	ns	93,80	74,88	89,79	ns	ns	89,45	82,49	69,51	ns	ns	158,78	184,03	118,01	ns	-*
14	3,37	3,24	2,82	ns	ns	376,84	318,46	367,96	ns	ns	90,21	74,79	87,69	ns	ns	82,75	78,32	90,94	ns	ns	182,41	170,18	148,72	ns	ns
15	3,02	2,68	2,83	ns	ns	421,47	366,72	378,38	ns	ns	79,50	72,30	106,80	ns	+	104,42	73,95	77,44	-*	ns	212,35	155,43	169,87	-*	ns
16	2,76	2,69	2,94	ns	ns	335,03	299,39	338,23	ns	ns	104,21	90,90	101,84	ns	ns	83,10	71,56	72,94	ns	ns	129,46	129,77	142,66	ns	ns

¹ GC1: Grau de compactação um, 1060 kg m³; GC2: Grau de compactação dois, 1190 kg m³; e GC3: Grau de compactação três, 1290 kg m³; Contraste um (C1 = $\bar{y}_{GC2} + GC3$ vs \bar{y}_{GC1}); Contraste dois (C2 = \bar{y}_{GC3} vs \bar{y}_{GC2}); ² *significativo ao nível de 5% de probabilidade e ns = não significativo ao nível de 5% de probabilidade (ANOVA), onde há possibilidade de efeito positivo significativo (+*), ou seja aumento da média da variável = em questão com a compactação, ou efeito negativo significativo (-*), com respectiva diminuição da média da variável com a compactação.

O comportamento observado para os teores de micronutrientes, foi similar ao já observado para os teores de macronutrientes, com grande número de casos significativos negativos (39), especialmente para os teores de TMn, TCu e TZn. Com exceção dos clones 3, 10 e 14, todos os demais clones avaliados reduziram os teores de micronutrientes nas raízes em função da compactação. No caule e folha, o número de casos significativos de micronutrientes foi menor, onde observou-se apenas 6 clones com reduções significativas negativas em função da compactação para o caule e 4 para as folhas (Tabela 8).

Observou-se também efeito significativo positivo dos contrastes para os teores de micronutrientes (14 casos). Destes, a maior parte esteve presente nas raízes (10 casos), exclusivamente para o TB (com exceção dos clones 1, 3, 6, 13 e 14). Enquanto no caule, foram 2 casos para o TB (clones 9 e 16) e 2 casos para o TCu (clones 11 e 13). Nas folhas, todavia, não houve efeito positivo para nenhum clone avaliado, essa variável mostrou-se pouco sensível a este tipo de avaliação.

Os teores de B (TB), Cu (TCu) e Zn (TZn) foram maiores nas raízes, seguido das folhas e caule, enquanto Mn (TMn) apresentou maiores proporções nas folhas, seguido do caule e raízes (Figura 9). Os teores de Fe (TFe), no entanto, foram avaliados somente nas folhas e no caule, já que a contaminação das raízes por óxidos de Fe existentes no solo, impossibilitaria um diagnóstico mais adequado do referido nutriente na planta (Tabela 9).

A compactação afetou igualmente o conteúdo de nutrientes da matéria seca dos clones, haja vista que se observou maior número de efeitos significativos negativos (92 casos) nos contrastes do conteúdo total de nutrientes na planta (cTNP) e parte aérea (cNTPA). Contudo, não houve efeito significativo para o nitrogênio (CN) em ambas os compartimentos. Assim como observou-se incremento exclusivamente para o boro (CB) tanto na parte aérea (423,53 mg a 507,17 mg), quanto no conteúdo total (501,25 mg a 605,66), respectivamente para o clone 10.

Já os clones 7, 11, 13 e 14 não apresentaram diferenças significativas nos contrastes avaliados (Tabela 8). Nas demais avaliações, observou-se que o fósforo (CP) foi o maior impactado pela compactação (9 casos em 16), com reduções de conteúdo da ordem de 28,19 mg a 22,21 mg em algumas situações (exceção dos clones 6, 7, 11, 13, 14, 15 e 16), os demais nutrientes que reduziram apresentam-se na tabela 9.

Tabela 8. Conteúdo total de nutrientes na planta (cTNP) de clones de eucalipto submetidos a três graus de compactação do solo

Clone	Nitrogênio (mg)				Fósforo (mg)				Potássio (mg)				Magnésio (mg)				Cálcio (mg)								
	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2
1	261.6	200.3	257.26	ns	ns	36.6	26.97	20.9	-*	-*	376.01	295.38	288.87	-*	ns	43.22	33.13	33.22	-*	ns	393.62	328.17	265.95	-*	ns
2	210.14	217.11	188.02	ns	ns	26.96	23.56	17.08	-*	-*	310.58	293.17	240.88	ns	ns	21.06	32.16	21.06	-*	-*	284.42	246.5	155.47	-*	-*
3	191.33	221.92	211.24	ns	ns	27.6	30.45	22.78	ns	-*	295.45	346.23	263.79	ns	-*	27.39	36.7	27.39	ns	-*	266.1	299.7	244.6	ns	ns
4	216.31	217.18	259.53	ns	ns	29.54	25.32	21.82	-*	ns	311.23	324.72	277.99	ns	ns	34.83	36.64	34.83	ns	ns	301.89	271.01	245.68	ns	ns
5	230.98	225.63	208.61	ns	ns	30.91	25.22	23.22	-*	ns	315.13	304.21	249.6	ns	ns	26.42	31.34	26.42	ns	ns	280.25	245.12	201.56	ns	ns
6	236.24	216.22	219.77	ns	ns	28.4	23.49	23.24	ns	ns	299.68	295.6	279.65	ns	ns	23.73	25.78	23.73	ns	ns	245.29	218.98	216.1	ns	ns
7	176.86	192.9	207.33	ns	ns	26.38	23.94	22.78	ns	ns	278.68	259.85	253.95	ns	ns	23.93	30.14	23.93	ns	ns	256.03	244.93	219.29	ns	ns
8	204.14	210.35	243.62	ns	ns	35.71	24.07	20.59	-*	ns	347.87	262.58	253.83	-*	ns	28.23	29.84	28.23	ns	ns	309.99	247.79	224.46	-*	ns
9	285.07	242.6	237.28	ns	ns	30.22	26.08	23.28	-*	ns	342.9	320.95	306.65	ns	ns	35.51	33.96	35.51	ns	ns	252.27	266.33	275.46	ns	ns
10	205.66	197.71	250.64	ns	ns	34.02	29.77	27.7	-*	ns	312.62	302.77	297.49	ns	ns	35.13	33.05	35.13	ns	ns	278.93	245.05	242.39	ns	ns
11	180.02	203.23	209.98	ns	ns	25.96	23.63	22.74	ns	ns	300.46	269.01	277.89	ns	ns	26.03	27.05	26.03	ns	ns	256.04	213.81	227.03	ns	ns
12	180.56	207.68	191.09	ns	ns	20.55	25.46	18.87	ns	-*	211.1	276.67	217.69	ns	ns	25.3	33.66	25.3	ns	-*	205.76	271.48	181.09	ns	-*
13	195.5	210.79	159.14	ns	ns	24.02	24.78	19.12	ns	ns	274.44	258.69	219.03	ns	ns	23.26	29.77	23.26	ns	ns	251.31	221.68	171.53	ns	ns
14	234.99	219.67	219.18	ns	ns	25.18	29.29	25.9	ns	ns	312.58	324.48	272.58	ns	ns	32.16	36.24	32.16	ns	ns	249.39	279.46	239.63	ns	ns
15	185.56	214.59	182.62	ns	ns	26.36	21.91	21.55	ns	ns	267.95	252.74	258.1	ns	ns	27.45	27.25	27.45	ns	ns	241.35	210.14	147.85	-*	ns
16	234.24	371.16	227.2	ns	ns	22.71	27.81	23.82	ns	ns	312.72	326.36	276	ns	ns	27.02	29.97	27.02	ns	ns	194.99	227.6	209.48	ns	ns
	Enxofre (mg)				Manganês (mg)				Boro (mg)				Cobre (mg)				Zinco (mg)								
1	34.18	24.34	20.86	-*	ns	6393.57	3933.94	4448.58	-*	ns	630.56	480.40	531.82	ns	ns	655.29	465.41	448.26	-*	ns	1023.1	630.17	706.1	-*	ns
2	22.06	21.52	13.83	ns	-*	4882.25	3700.49	2225.59	-*	-*	517.06	426.47	395.54	ns	ns	592.16	443.59	317.97	-*	-*	761.38	682.14	476.58	-*	-*
3	21.37	24.28	17.62	ns	-*	4067.88	4387.65	2595.54	ns	-*	560.76	494.99	422.15	ns	ns	457.48	475.72	338.74	ns	-*	664.94	667.85	487.57	ns	ns
4	22.91	25.43	20.09	ns	ns	4637.94	4085.14	3417.87	ns	ns	518.88	534.67	456.77	ns	ns	655.53	488.43	406.48	-*	ns	823.59	809.97	683.5	ns	ns
5	22.77	18.92	16.06	ns	ns	4675.06	3347.49	2632.76	-*	ns	554.29	519.54	435.74	ns	ns	563.69	395.49	350.85	-*	ns	675.15	547.26	601.88	ns	ns
6	23.21	16.56	19.83	ns	ns	3884.12	2642.23	2423.52	-*	ns	554.21	563.74	458.56	ns	ns	547.31	369.4	392.15	-*	ns	814.37	524.57	626.53	-*	ns
7	19.93	18.2	18.99	ns	ns	3558.57	3453.96	2803.87	ns	ns	436.68	461.51	432.67	ns	ns	396.11	414.78	385.45	ns	ns	577.25	618.25	491.49	ns	ns
8	25.18	17.83	17.8	-*	ns	4433.94	3817.58	2775	-*	ns	530.52	472.03	472.94	ns	ns	479.09	408.44	351.13	-*	ns	721.56	777.55	535.95	ns	-*
9	23.64	22.39	19.19	ns	ns	4537.04	4067.6	3606.26	ns	ns	485.31	539.78	508.95	ns	ns	465.99	507.67	421.09	ns	ns	732.24	772.07	526.8	ns	-*
10	23.95	19.01	22.22	ns	ns	4300.87	3979.87	4065.09	ns	ns	501.25	429.04	605.66	ns	+	453.77	410.91	416.15	ns	ns	702.57	516.86	527.79	-*	ns
11	19.22	16.99	18.5	ns	ns	3382.87	3277.69	3175.29	ns	ns	478.45	411.72	484.46	ns	ns	423.85	396.37	448.96	ns	ns	599.15	572.76	594.04	ns	ns
12	16.25	19.2	17.1	ns	ns	3510.11	3551.93	2162.24	ns	-*	436.91	531.54	394.27	ns	ns	416.83	416.82	345.21	ns	ns	673.46	663.72	402.27	ns	-*
13	18.11	18.93	16.99	ns	ns	3784.68	3579.31	2765.37	ns	ns	489.70	417.13	374.85	ns	ns	384.87	429.36	294.77	ns	-*	604.76	713.84	420.74	ns	-*
14	24.06	24.23	20.56	ns	ns	3256.07	3354.54	3446.58	ns	ns	479.76	421.06	474.09	ns	ns	401.3	450.42	463.52	ns	ns	632.07	637.08	559.5	ns	ns
15	18.58	17.06	18.95	ns	ns	3662.73	3114.45	3250.25	ns	ns	420.57	363.15	512.86	ns	ns	479.59	386.55	337.63	-*	ns	675.3	612.73	533.97	ns	ns
16	18.32	21.2	19.63	ns	ns	3133.94	3044.04	3047.79	ns	ns	465.09	449.22	537.00	ns	ns	389.74	424.73	402.46	ns	ns	481.9	506.07	568.89	ns	ns

¹ GC1: Grau de compactação um, 1060 kg m³; GC2: Grau de compactação dois, 1190 kg m³; e GC3: Grau de compactação três, 1290 kg m³; Contraste uno (C1 = $\bar{y}_{GC2} + GC3$ vs \bar{y}_{GC1}); Contraste dois (C2 = \bar{y}_{GC3} vs \bar{y}_{GC2}); ² *significativo ao nível de 5% de probabilidade e ns = não significativo ao nível de 5% de probabilidade (ANOVA), onde há possibilidade de efeito positivo significativo (+*), ou seja aumento da média da variável em questão com a compactação, ou efeito negativo significativo (-*), com respectiva diminuição da média da variável com a compactação.

Tabela 9. Conteúdo total de nutrientes na parte aérea (cTNPA) de clones de eucalipto submetidos a três graus de compactação do solo

Clone	Nitrogênio (mg)					Fósforo (mg)					Potássio (mg)					Magnésio (mg)					Cálcio (mg)				
	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2
1	250,30	191,65	240,47	ns	ns	35,89	26,04	20,04	-*	-*	371,21	288,76	281,14	-*	ns	40,87	30,27	30,02	-*	ns	379,15	302,56	244,31	-*	ns
2	197,07	203,31	173,87	ns	ns	26,13	22,62	16,33	-*	-*	302,71	285,77	235,95	ns	ns	30,28	29,20	18,80	-*	-*	264,55	221,31	140,42	-*	-*
3	177,58	209,23	197,28	ns	ns	26,72	29,43	22,03	ns	-*	288,40	338,48	258,47	ns	-*	29,31	33,62	25,04	ns	-*	245,55	275,36	226,80	ns	ns
4	194,18	195,97	241,52	ns	ns	28,12	23,80	20,81	-*	ns	300,52	313,27	269,42	ns	ns	34,58	33,30	31,43	ns	ns	271,43	235,58	213,51	ns	ns
5	216,98	213,72	195,92	ns	ns	30,08	24,45	22,51	-*	ns	308,25	298,99	245,39	ns	ns	31,36	29,31	24,49	ns	ns	264,58	229,20	181,53	-*	ns
6	217,30	199,91	204,84	ns	ns	27,33	22,59	22,36	ns	ns	292,04	289,34	273,27	ns	ns	27,19	23,53	21,21	ns	ns	222,36	200,13	192,27	ns	ns
7	163,20	181,29	196,44	ns	ns	25,58	23,12	22,05	ns	ns	272,89	254,03	248,95	ns	ns	23,44	27,42	22,06	ns	ns	240,40	226,41	201,25	ns	ns
8	189,73	197,09	227,85	ns	ns	34,35	23,12	19,83	-*	ns	340,64	255,98	248,02	-*	ns	32,00	26,78	25,25	-*	ns	288,74	228,79	205,47	-*	ns
9	261,34	226,92	221,62	ns	ns	29,25	25,16	22,44	-*	ns	335,62	313,32	300,46	ns	ns	29,58	30,59	32,53	ns	ns	231,59	244,97	248,35	ns	ns
10	192,53	182,65	239,21	ns	ns	33,21	28,83	26,90	-*	ns	306,94	296,45	292,63	ns	ns	33,06	30,61	32,87	ns	ns	259,95	223,72	221,51	ns	ns
11	168,13	191,04	198,01	ns	ns	25,38	22,90	22,14	ns	ns	295,67	263,56	272,24	ns	ns	26,46	24,98	24,12	ns	ns	241,24	197,26	210,69	ns	ns
12	154,44	188,91	176,78	ns	ns	19,54	24,29	18,13	ns	-*	202,46	269,57	212,76	ns	ns	23,84	31,02	23,28	ns	-*	184,92	242,28	165,06	ns	-*
13	181,63	197,72	148,04	ns	ns	23,15	23,79	18,52	ns	ns	269,07	251,71	214,83	ns	ns	26,77	26,91	21,14	ns	ns	233,29	201,23	154,08	ns	ns
14	218,56	204,24	206,38	ns	ns	24,26	28,40	24,91	ns	ns	305,31	317,92	265,64	ns	ns	29,99	33,88	29,43	ns	ns	231,41	251,30	217,90	ns	ns
15	173,59	197,43	170,58	ns	ns	25,47	20,90	20,78	ns	ns	261,68	245,49	253,39	ns	ns	24,11	24,11	25,14	ns	ns	227,96	189,08	130,64	-*	ns
16	218,41	371,16	210,60	ns	ns	21,91	27,11	22,92	ns	ns	307,32	321,58	270,20	ns	ns	20,75	28,24	24,62	ns	ns	179,17	212,46	185,42	ns	ns
	Enxofre (mg)					Manganês (mg)					Boro (mg)					Cobre (mg)					Zinco (mg)				
1	32,28	22,04	18,77	-*	ns	6324,70	3855,75	4353,68	-*	ns	560,56	390,06	417,33	-*	ns	561,55	390,87	333,11	-*	ns	723,82	415,54	446,77	-*	ns
2	20,03	19,04	12,21	ns	-*	4743,45	3625,53	2170,32	-*	-*	426,13	287,08	301,74	-*	ns	451,71	359,65	245,29	-*	-*	514,72	406,11	316,90	-*	ns
3	19,54	21,77	16,16	ns	ns	3996,32	4302,13	2536,08	ns	-*	460,12	398,84	335,16	ns	ns	359,41	388,46	273,93	ns	-*	402,01	453,05	326,73	ns	ns
4	19,74	21,89	17,56	ns	ns	4516,69	3949,45	3311,49	ns	ns	378,38	424,22	298,45	ns	ns	480,22	359,25	329,70	-*	ns	480,90	410,97	384,51	ns	ns
5	20,97	17,23	14,62	ns	ns	4564,46	3249,09	2566,49	-*	ns	452,77	455,29	329,82	ns	ns	434,27	321,77	288,12	-*	ns	455,34	388,30	356,38	ns	ns
6	20,69	14,47	17,60	ns	ns	3724,90	2577,75	2348,30	-*	ns	424,22	442,15	348,11	ns	ns	382,55	271,09	323,86	-*	ns	428,31	324,62	399,39	ns	ns
7	18,21	16,23	17,09	ns	ns	3477,78	3379,35	2757,07	ns	ns	355,68	363,50	341,60	ns	ns	326,77	305,85	327,36	ns	ns	366,54	362,33	346,42	ns	ns
8	22,89	15,68	16,12	-*	ns	4292,80	3676,48	2702,70	-*	ns	444,92	373,93	353,95	ns	ns	359,72	306,39	280,06	ns	ns	421,20	395,01	365,80	ns	ns
9	21,29	20,11	17,22	ns	ns	4443,01	3981,29	3536,52	ns	ns	384,31	413,83	379,49	ns	ns	357,20	380,26	364,18	ns	ns	442,93	453,82	368,86	ns	ns
10	22,08	17,23	20,74	ns	ns	4213,97	3883,86	3985,38	ns	ns	423,53	344,43	507,17	ns	+	374,47	327,98	349,10	ns	ns	458,25	324,99	388,21	ns	ns
11	17,95	15,27	17,23	ns	ns	3318,10	3143,83	3118,78	ns	ns	388,18	317,44	353,05	ns	ns	347,53	314,21	362,52	ns	ns	416,91	347,45	406,68	ns	ns
12	13,77	16,46	15,58	ns	ns	3408,25	3465,15	2113,29	ns	-*	328,39	388,98	260,46	ns	ns	280,34	323,98	289,77	ns	ns	313,51	390,87	289,75	ns	ns
13	16,53	16,36	15,72	ns	ns	3721,71	3469,48	2710,94	ns	ns	382,79	319,45	292,46	ns	ns	266,91	319,57	241,88	ns	ns	372,89	374,19	302,59	ns	ns
14	21,95	21,80	18,58	ns	ns	3157,42	3287,93	3369,71	ns	ns	381,68	338,54	365,87	ns	ns	306,32	366,24	360,81	ns	ns	363,11	389,27	330,58	ns	ns
15	16,15	14,32	17,28	ns	ns	3512,84	2975,57	3193,45	ns	ns	342,10	267,29	399,13	ns	ns	366,40	298,82	260,62	-*	ns	389,90	357,90	316,11	ns	ns
16	16,37	19,64	17,50	ns	ns	3071,47	2976,80	2987,71	ns	ns	340,61	357,48	422,23	ns	ns	297,59	366,70	334,42	ns	ns	308,79	350,85	370,82	ns	ns

¹ GC1: Grau de compactação um, 1060 kg m³; GC2: Grau de compactação dois, 1190 kg m³; e GC3: Grau de compactação três, 1290 kg m³; Contraste um (C1 = $\bar{y}_{GC2} + GC3$ vs \bar{y}_{GC1}); Contraste dois (C2 = \bar{y}_{GC3} vs \bar{y}_{GC2}); ² *significativo ao nível de 5% de probabilidade e ns = não significativo ao nível de 5% de probabilidade (ANOVA), onde há possibilidade de efeito positivo significativo (+*), ou seja aumento da média da variável em questão com a compactação, ou efeito negativo significativo (-*), com respectiva diminuição da média da variável com a compactação.

4.4. Eficiência nutricional

4.4.1. Eficiência de aquisição

A eficiência nutricional dos clones de eucalipto foi avaliada através da eficiência de aquisição (EA), translocação (ET) e utilização (EU) dos nutrientes pela planta em função da compactação (C1 e C2). O aumento de conteúdo de nutrientes da matéria seca da planta (cTNP) sem alocar recursos para produção de maior número de raízes absorventes (MSRF), representa a capacidade e eficiência de aquisição de nutrientes pelos clones, mesmo quando submetidos a estresses como a compactação (Tabela 10).

No geral, as diferenças observadas para a EA foram não significativas, com exceção dos clones 1, 5, 8 e 16, dos quais apresentaram principalmente reduções (13 casos) e incrementos (2 casos) significativos (C1 e C2). Exclusivamente para o conjunto de clones (1, 8 e 16) houve reduções significativas da EA dos nutrientes avaliados, assim como incrementos para os nutrientes B e Zn (Clone 5).

O clone 1 apresentou redução da EA em quase todos os nutrientes avaliados (exceção do N), tal comportamento, era esperado, pois o clone apresentou reduções da MST (25 g à 22,81 g) e MSRF (13,05 g à 10,82 g), assim como os teores de P, Mg, Ca, S, Mn, Cu e Zn. Logo, houve redução dos conteúdos de nutrientes para esse clone, afetando a EA de nutrientes.

Os clones 8 e 16 também apresentaram reduções significativas da EA dos nutrientes, especialmente para o N, P e K. As reduções de EA para o clone 8, são explicadas pelo decréscimo da MST (23,18 a 19,64 g), MSRF (12,82 g à 10,91 g), TP (4,06 g kg⁻¹ a 3,01 g kg⁻¹) e CP (35,71 mg à 22,33 mg). O clone 16, no entanto, não apresentou reduções de MST, teores e conteúdo de N, P e K, observou-se apenas redução da MSRF (13,28 g à 10,94 g), afetando de forma considerável a EA de nutrientes pelos clones.

O inverso foi observado para o clone 5, no qual apresentou incrementos da EA do B e Zn com a compactação, tal fato explicou-se pelo aumento do TB na planta (73,93 mg kg⁻¹ a 93 mg kg⁻¹) mesmo com as reduções da MST (26,07 g à 19,81 g) e dos conteúdos de P, Mn e Cu ocasionados pela compactação. Outro fato relevante, diz respeito ao relevante aumento da EA de N (201,0 mg g⁻¹ a 285, 58 mg g⁻¹), P (13,20 mg g⁻¹ a 18,04 mg g⁻¹), B (204,99 mg g⁻¹ a 328,58 mg g⁻¹) e Zn (324,96 mg g⁻¹ a 566,68 mg g⁻¹) nas plantas do clone 5, mesmo quando não significativo.

Tabela 10. Eficiência de aquisição de nutrientes (EA) de clones de eucalipto submetidos a três graus de compactação do solo

Clone	Nitrogênio (mg g ⁻¹)					Fósforo (mg g ⁻¹)					Potássio (mg g ⁻¹)					Magnésio (mg g ⁻¹)					Cálcio (mg g ⁻¹)				
	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2
1	253,79	174,59	198,85	ns	ns	25,40	14,89	9,38	-*	ns	240,97	140,42	136,35	-*	ns	24,10	12,36	12,24	-*	ns	265,95	169,34	128,06	-*	ns
2	147,07	170,89	215,27	ns	ns	11,99	10,66	10,80	ns	ns	116,73	121,89	147,53	ns	ns	10,18	11,33	11,55	ns	ns	127,81	119,03	121,06	ns	ns
3	148,32	152,11	200,33	ns	ns	14,24	12,62	11,96	ns	ns	125,04	127,28	128,52	ns	ns	10,86	11,20	11,29	ns	ns	129,49	127,96	152,19	ns	ns
4	136,14	143,54	209,06	ns	ns	12,65	10,70	9,07	ns	ns	119,07	119,21	118,88	ns	ns	11,82	11,44	12,75	ns	ns	123,31	115,69	117,70	ns	ns
5	222,93	201,00	285,58	ns	ns	19,70	13,20	18,04	ns	ns	175,32	143,56	174,26	ns	ns	15,52	12,45	15,51	ns	ns	176,22	137,90	165,39	ns	ns
6	175,41	155,15	233,16	ns	ns	14,10	9,86	13,53	ns	ns	124,07	116,14	160,89	ns	ns	11,03	8,76	11,46	ns	ns	119,11	101,07	146,28	ns	ns
7	166,51	179,61	257,15	ns	ns	17,26	13,63	16,81	ns	ns	143,41	120,22	167,87	ns	ns	12,56	12,52	14,40	ns	ns	164,89	128,20	170,11	ns	ns
8	184,00	196,92	249,76	ns	ns	20,46	13,14	12,17	-*	ns	160,06	119,92	139,67	ns	ns	14,19	11,97	13,48	ns	ns	187,73	132,27	151,58	ns	ns
9	251,56	180,24	214,59	ns	ns	15,16	11,48	11,33	ns	ns	159,05	127,57	151,39	ns	ns	12,43	11,50	14,68	ns	ns	143,68	128,23	164,57	ns	ns
10	178,54	175,96	232,99	ns	ns	17,02	15,25	12,83	ns	ns	145,48	143,14	144,55	ns	ns	13,19	13,01	13,91	ns	ns	153,21	135,88	135,07	ns	ns
11	191,55	209,32	262,77	ns	ns	18,02	13,40	16,03	ns	ns	175,53	134,99	180,48	ns	ns	13,07	11,05	13,96	ns	ns	175,53	133,92	178,28	ns	ns
12	151,57	152,85	178,02	ns	ns	10,18	10,99	9,40	ns	ns	90,57	105,63	100,46	ns	ns	9,64	10,51	10,43	ns	ns	102,84	119,93	101,32	ns	ns
13	160,63	196,98	260,50	ns	ns	12,11	12,91	14,67	ns	ns	118,87	124,41	156,56	ns	ns	10,80	11,59	14,12	ns	ns	129,37	127,46	176,40	ns	ns
14	197,68	200,62	185,58	ns	ns	11,69	15,27	11,07	ns	ns	131,46	154,03	112,89	ns	ns	12,19	14,81	11,89	ns	ns	132,52	164,26	127,72	ns	ns
15	160,09	166,50	177,51	ns	ns	15,05	9,29	10,32	ns	ns	133,11	100,24	98,61	ns	ns	11,71	9,07	9,15	ns	ns	144,08	107,22	89,30	ns	ns
16	247,15	371,16	239,87	ns	-*	13,36	21,13	11,94	ns	-*	179,67	266,76	155,77	ns	-*	10,13	17,93	11,08	ns	ns	123,19	205,41	135,07	ns	ns
	Enxofre (mg g ⁻¹)					Manganês (mg g ⁻¹)					Boro (mg g ⁻¹)					Cobre (mg g ⁻¹)					Zinco (mg g ⁻¹)				
1	21,07	9,78	8,16	-*	ns	3310,83	1357,50	1452,03	-*	ns	359,01	225,07	223,41	-*	ns	490,91	253,15	238,96	-*	ns	722,59	353,76	385,58	-*	ns
2	7,23	8,30	7,68	ns	ns	1330,57	1111,90	1116,69	ns	ns	177,12	215,95	235,35	ns	ns	287,36	222,55	247,33	ns	ns	363,72	381,97	398,78	ns	ns
3	8,34	8,31	8,00	ns	ns	1365,67	1356,97	928,44	ns	ns	217,65	185,84	200,02	ns	ns	238,41	203,03	208,33	ns	ns	354,00	300,54	317,91	ns	ns
4	8,01	8,79	8,43	ns	ns	1363,03	1261,14	1032,89	ns	ns	194,31	202,94	227,65	ns	ns	299,81	217,26	197,25	ns	ns	397,20	405,02	381,94	ns	ns
5	10,81	8,46	10,83	ns	ns	1966,54	1399,71	1432,11	ns	ns	282,65	205,00	328,58	ns	+	386,61	222,80	316,91	ns	ns	458,32	324,96	566,68	ns	+
6	8,49	5,99	10,24	ns	ns	1362,45	862,06	1003,48	ns	ns	237,92	210,89	269,57	ns	ns	283,51	182,76	267,33	ns	ns	463,44	274,12	463,24	ns	ns
7	8,98	8,19	10,93	ns	ns	1566,68	1271,22	1265,66	ns	ns	227,10	228,32	279,79	ns	ns	247,33	251,24	325,04	ns	ns	397,74	406,27	407,23	ns	ns
8	10,75	8,07	8,30	ns	ns	1766,39	1375,87	1079,43	ns	ns	223,03	220,03	256,43	ns	ns	298,12	265,67	225,13	ns	ns	469,46	551,10	372,88	ns	ns
9	9,24	7,67	8,22	ns	ns	1724,32	1405,84	1265,17	ns	ns	226,69	249,92	267,58	ns	ns	268,07	238,08	258,62	ns	ns	459,52	408,91	315,22	ns	ns
10	10,08	8,37	9,40	ns	ns	1586,80	1493,74	1582,17	ns	ns	215,02	210,23	276,39	ns	ns	262,50	243,70	247,57	ns	ns	432,56	324,77	336,64	ns	ns
11	9,51	7,42	9,34	ns	ns	1585,45	1205,75	1413,51	ns	ns	287,56	224,47	303,72	ns	ns	314,52	236,19	364,65	ns	ns	455,87	393,75	491,87	ns	ns
12	6,51	6,93	7,13	ns	ns	1173,47	1013,05	804,09	ns	ns	189,84	207,54	208,16	ns	ns	243,52	191,87	193,08	ns	ns	428,58	321,18	236,16	ns	ns
13	7,30	8,53	10,54	ns	ns	1334,48	1282,30	1469,50	ns	ns	212,66	211,61	268,58	ns	ns	225,12	270,15	277,31	ns	ns	354,90	473,44	421,48	ns	ns
14	9,47	11,18	8,15	ns	ns	1142,23	1326,55	1124,91	ns	ns	192,02	209,35	204,34	ns	ns	214,72	257,96	265,63	ns	ns	381,15	392,41	350,39	ns	ns
15	9,17	6,40	6,70	ns	ns	1626,81	1101,26	951,38	ns	ns	187,87	166,26	219,08	ns	ns	282,04	184,63	195,12	ns	ns	426,36	326,41	349,17	ns	ns
16	9,63	14,19	9,50	ns	ns	1499,80	1922,37	1179,34	ns	ns	262,20	376,19	287,56	ns	ns	265,08	374,98	255,50	ns	ns	356,07	482,62	404,12	ns	ns

¹ GC1: Grau de compactação um, 1060 kg m³; GC2: Grau de compactação dois, 1190 kg m³; e GC3: Grau de compactação três, 1290 kg m³; Contraste um (C1 = $\bar{y}_{GC2} + GC3$ vs \bar{y}_{GC1}); Contraste dois (C2 = \bar{y}_{GC3} vs \bar{y}_{GC2}); ² *significativo ao nível de 5% de probabilidade e ns = não significativo ao nível de 5% de probabilidade (ANOVA), onde há possibilidade de efeito positivo significativo (+*), ou seja aumento da média da variável em questão com a compactação, ou efeito negativo significativo (-*), com respectiva diminuição da média da variável com a compactação.

4.4.2. Eficiência de translocação

O clone eficiente além de absorver os nutrientes (EA) da solução do solo, deve transferir esses íons dentro da planta, desta forma a ET relaciona o conteúdo total de nutriente na parte aérea (cTNPA) em relação ao total (cTNP). Os clones 3, 10, 14 foram os únicos que não apresentaram efeitos significativos para nenhum dos nutrientes avaliados quanto a ET, não sendo afetados pela compactação, em termos de absorção de nutrientes pela planta.

No geral, observou-se maior sensibilidade da ET em demonstrar o comportamento dos clones frente à compactação, quando comparada ao EA, já que ela apresentou maior número de diferenças significativas (33 casos) nas situações referentes a compactação. Diferentemente da EA, as diferenças apresentadas na ET foram no geral positivas (18 casos), além das negativas comumente presentes (15 casos). Com exceção dos clones 3, 10 e 14, todos os demais apresentaram alterações da ET com a compactação para pelo menos um nutriente avaliado (Tabela 11).

Os clones 1, 2, 4, 5, 8, 15 e 16 apresentaram reduções significativas da ET com a compactação. Contudo, o clone 1 destacou-se, pois apresentou reduções significativas da ET em quase todos os nutrientes (P, K, Mg, Ca, S, B e Cu), como já observado para a EA. Houve reduções dos conteúdos de nutrientes (P, K, Mg, Ca, S, B e Cu) da parte aérea e total como consequência da compactação. Observou-se também que especificamente para os nutrientes K, Ca e B, houve aumento do conteúdo dos respectivos nutrientes na raiz do clone em função da compactação. Essa alocação de nutrientes nas raízes, diminuiu a transferência destes para a parte aérea, o que consequente influenciou a ET do clone.

Os incrementos na ET em função compactação, foram observados para os clones 6, 8, 9, 11, 12, 13, 15 e 16. No entanto, merece destaque o clone 12, pois este apresentou aumento da ET em quase todos os nutrientes (N, K, Mg, S, Cu e Zn) avaliados. O peculiar observado para o respectivo clone é que não houve aumentos expressivos de conteúdo total de nutriente nas plantas destes clones (cTNP), nem especificamente na parte aérea (cTNPA). Ocorreram apenas translocação de nutrientes das raízes (redução dos teores de K, Mg, Cu e Zn nas raízes) para a parte aérea (aumento dos teores de K, Mg e S no caule), assim como aumento do teor total de Zn (tTN) nas plantas.

Tabela 11. Eficiência de translocação de nutrientes (ET) de clones de eucalipto submetidos a três graus de compactação do solo

Clone	Nitrogênio (mg mg ⁻¹)					Fósforo (mg mg ⁻¹)					Potássio (mg mg ⁻¹)					Magnésio (mg mg ⁻¹)					Cálcio (mg mg ⁻¹)				
	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2
1	0,95	0,95	0,93	ns	ns	0,98	0,96	0,96	- *	ns	0,99	0,98	0,97	- *	ns	0,94	0,91	0,9	- *	ns	0,96	0,92	0,91	- *	ns
2	0,94	0,94	0,92	ns	ns	0,97	0,96	0,95	- *	ns	0,97	0,97	0,98	ns	ns	0,92	0,91	0,89	ns	ns	0,93	0,9	0,9	ns	ns
3	0,93	0,94	0,93	ns	ns	0,97	0,97	0,97	ns	ns	0,98	0,98	0,98	ns	ns	0,91	0,92	0,91	ns	ns	0,92	0,92	0,93	ns	ns
4	0,9	0,9	0,93	ns	ns	0,95	0,94	0,95	ns	ns	0,97	0,96	0,97	ns	ns	0,9	0,91	0,9	ns	ns	0,9	0,87	0,87	ns	ns
5	0,94	0,95	0,94	ns	ns	0,97	0,97	0,97	ns	ns	0,98	0,98	0,98	ns	ns	0,93	0,93	0,93	ns	ns	0,94	0,93	0,9	ns	ns
6	0,92	0,93	0,93	ns	ns	0,96	0,96	0,96	ns	ns	0,97	0,98	0,98	ns	ns	0,93	0,91	0,89	ns	ns	0,91	0,91	0,89	ns	ns
7	0,92	0,94	0,95	ns	ns	0,97	0,97	0,97	ns	ns	0,98	0,98	0,98	ns	ns	0,9	0,91	0,92	ns	ns	0,94	0,92	0,91	ns	ns
8	0,93	0,94	0,94	ns	ns	0,96	0,96	0,96	ns	ns	0,98	0,97	0,98	ns	ns	0,91	0,9	0,89	ns	ns	0,93	0,92	0,91	ns	ns
9	0,92	0,93	0,93	ns	ns	0,97	0,96	0,96	ns	ns	0,98	0,98	0,98	ns	ns	0,92	0,9	0,91	ns	ns	0,92	0,92	0,9	ns	ns
10	0,93	0,92	0,95	ns	ns	0,98	0,97	0,97	ns	ns	0,98	0,98	0,98	ns	ns	0,93	0,92	0,93	ns	ns	0,93	0,91	0,91	ns	ns
11	0,93	0,94	0,94	ns	ns	0,98	0,97	0,97	ns	ns	0,98	0,98	0,98	ns	ns	0,93	0,92	0,93	ns	ns	0,94	0,92	0,93	ns	ns
12	0,85	0,91	0,92	+ *	ns	0,95	0,95	0,96	ns	ns	0,96	0,97	0,98	+ *	ns	0,88	0,92	0,92	+ *	ns	0,89	0,89	0,91	ns	ns
13	0,93	0,94	0,93	ns	ns	0,96	0,96	0,97	ns	ns	0,98	0,97	0,98	ns	ns	0,91	0,9	0,91	ns	ns	0,93	0,91	0,9	ns	ns
14	0,93	0,93	0,94	ns	ns	0,96	0,97	0,96	ns	ns	0,98	0,98	0,97	ns	ns	0,92	0,94	0,91	ns	ns	0,93	0,9	0,91	ns	ns
15	0,93	0,92	0,93	ns	ns	0,97	0,95	0,97	ns	ns	0,98	0,97	0,98	ns	+ *	0,9	0,89	0,91	ns	ns	0,94	0,9	0,87	- *	ns
16	0,92	0,95	0,92	ns	ns	0,96	0,97	0,96	ns	ns	0,98	0,98	0,98	ns	ns	0,91	0,94	0,91	ns	- *	0,92	0,93	0,88	ns	- *
	Enxofre (mg mg ⁻¹)					Manganês (mg mg ⁻¹)					Boro (mg mg ⁻¹)					Cobre (mg mg ⁻¹)					Zinco (mg mg ⁻¹)				
1	0,94	0,90	0,90	- *	ns	0,99	0,98	0,98	ns	ns	0,88	0,80	0,77	- *	ns	0,86	0,84	0,75	ns	- *	0,71	0,66	0,63	ns	ns
2	0,91	0,88	0,88	ns	ns	0,97	0,98	0,98	ns	ns	0,82	0,67	0,74	- *	ns	0,76	0,81	0,77	ns	ns	0,67	0,61	0,67	ns	ns
3	0,91	0,89	0,92	ns	ns	0,98	0,98	0,98	ns	ns	0,81	0,8	0,79	ns	ns	0,78	0,81	0,81	ns	ns	0,61	0,68	0,68	ns	ns
4	0,86	0,86	0,88	ns	ns	0,97	0,97	0,97	ns	ns	0,74	0,79	0,66	ns	- *	0,73	0,74	0,82	ns	ns	0,62	0,51	0,56	ns	ns
5	0,92	0,91	0,91	ns	ns	0,98	0,97	0,97	ns	ns	0,81	0,87	0,75	ns	- *	0,77	0,81	0,82	ns	ns	0,69	0,71	0,61	ns	ns
6	0,89	0,88	0,89	ns	ns	0,96	0,98	0,97	+ *	ns	0,76	0,77	0,76	ns	ns	0,71	0,74	0,82	ns	ns	0,54	0,63	0,65	ns	ns
7	0,90	0,89	0,90	ns	ns	0,98	0,98	0,98	ns	ns	0,81	0,79	0,78	ns	ns	0,83	0,74	0,85	ns	+ *	0,64	0,59	0,69	ns	ns
8	0,91	0,88	0,90	ns	ns	0,97	0,96	0,97	ns	ns	0,84	0,79	0,73	- *	ns	0,75	0,75	0,8	ns	ns	0,58	0,54	0,68	ns	+ *
9	0,90	0,90	0,89	ns	ns	0,98	0,98	0,98	ns	ns	0,79	0,77	0,74	ns	ns	0,77	0,75	0,86	ns	+ *	0,61	0,60	0,70	ns	ns
10	0,92	0,91	0,93	ns	ns	0,98	0,97	0,98	ns	ns	0,84	0,8	0,82	ns	ns	0,82	0,8	0,84	ns	ns	0,65	0,64	0,73	ns	ns
11	0,93	0,90	0,93	ns	ns	0,98	0,95	0,98	ns	+ *	0,81	0,76	0,72	ns	ns	0,82	0,8	0,81	ns	ns	0,69	0,61	0,69	ns	ns
12	0,83	0,86	0,91	+ *	+ *	0,97	0,97	0,98	ns	ns	0,72	0,73	0,66	ns	ns	0,66	0,78	0,84	+ *	ns	0,45	0,61	0,72	+ *	ns
13	0,91	0,86	0,92	ns	+ *	0,98	0,97	0,98	ns	ns	0,78	0,77	0,76	ns	ns	0,69	0,74	0,81	+ *	ns	0,62	0,54	0,72	ns	+ *
14	0,91	0,90	0,90	ns	ns	0,97	0,98	0,98	ns	ns	0,79	0,8	0,77	ns	ns	0,76	0,82	0,78	ns	ns	0,56	0,61	0,60	ns	ns
15	0,87	0,84	0,91	ns	+ *	0,96	0,95	0,98	ns	+ *	0,81	0,73	0,77	ns	ns	0,76	0,77	0,78	ns	ns	0,57	0,58	0,60	ns	ns
16	0,89	0,92	0,89	ns	ns	0,98	0,98	0,98	ns	ns	0,73	0,8	0,78	ns	ns	0,76	0,86	0,83	+ *	ns	0,64	0,71	0,65	ns	ns

¹ GC1: Grau de compactação um, 1060 kg m³; GC2: Grau de compactação dois, 1190 kg m³; e GC3: Grau de compactação três, 1290 kg m³; Contraste um (C1 = $\bar{y}_{GC2} + GC3$ vs \bar{y}_{GC1}); Contraste dois (C2 = \bar{y}_{GC3} vs \bar{y}_{GC2}); ² *significativo ao nível de 5% de probabilidade e ns = não significativo ao nível de 5% de probabilidade (ANOVA), onde há possibilidade de efeito positivo significativo (+*), ou seja aumento da média da variável em questão com a compactação, ou efeito negativo significativo (-*), com respectiva diminuição da média da variável com a compactação.

4.4.3. Eficiência de utilização

Os clones foram avaliados ainda pela sua capacidade de redistribuir e reutilizar os nutrientes, usado na produção de biomassa (MST). Logo, o clone que possui a capacidade de absorver (EA), transferir (ET) e empregar tais nutrientes na produção de matéria seca (EU), mesmo em solo compactado, foi considerado apto a conviver em solos com restrições físicas, tais como a compactação.

A compactação do solo afetou de forma negativa a EU de nutrientes das plantas avaliadas ao longo deste estudo (Tabela 12). A redução da eficiência nutricional em função da compactação ocorreu para quase todos os clones, exceto clone 10. Quando significativos, os efeitos foram, no geral, negativos (47 casos) e em maior número de clones para a EU, seguido, em ordem decrescente, de ET e EA e poucas exceções positivas (3 casos).

Os clones foram afetados de forma negativa pela compactação para quase todos os clones (exceção 7 e 10), as reduções de EU foram observadas para todos os nutrientes também, sem exceção. Contudo, os clones 2, 6, 12 e 13 apresentaram o maior número de casos significativos (N, P, K, Mg, S, B, Cu e Zn). A produção de matéria seca (MST), teores e conteúdo de nutrientes destes clones reduziram-se com a compactação, principalmente para os clones 13, 2 e 12. As reduções da MST foram da ordem de 22,67 g a 16,52 g (clone 13), 24,75 g à 16,85 g (clone 2) e 21,02 g à 14,88 g (clone 12).

Observou-se importantes reduções ao longo deste estudo (dados já mostrados) para os clones 13, 2 e 12. Das quais, as mais importantes foram relacionadas à produção de matéria seca, o qual impactou de forma considerável outras variáveis em estudo (Dc, MST, IQD, Dmr, As), e conseqüentemente os teores e conteúdos (P, Mg, Ca, S, Mn, Cu e Zn) de nutrientes presentes na matéria seca total dos clones (cTNP).

Os clones 13, 2, 12 não apresentaram diferenças significativas na EA, ou seja, foram capazes de absorver os nutrientes requeridos pelos clones sem reduções, e apresentaram ainda, em algumas circunstâncias, translocação de nutrientes na planta (clone 13 e 12), especialmente para o S, Cu e Zn. Contudo, mesmo absorvendo e transferindo os nutrientes, não houve eficiência em reutilizar tais nutrientes, na produção de matéria seca, quando submetidos à compactação.

Tabela 12. Eficiência de utilização de nutrientes (EU) de clones de eucalipto submetidos a três graus de compactação do solo

Clone	Nitrogênio (g ² mg ⁻¹)					Fósforo (g ² mg ⁻¹)					Potássio (g ² mg ⁻¹)					Magnésio (g ² mg ⁻¹)					Cálcio (g ² mg ⁻¹)				
	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2	GC1	GC2	GC3	C1	C2
1	4.11	3.03	3.09	-*	ns	19.62	19.40	28.22	ns	+	2.11	1.90	2.22	ns	ns	22.72	17.04	19.52	ns	ns	1.66	1.45	2.07	ns	ns
2	3.69	3.59	2.07	-*	-*	26.85	27.32	19.24	ns	-*	2.41	2.44	1.60	-*	-*	23.43	22.43	15.32	ns	-*	2.29	2.47	1.96	ns	ns
3	3.51	3.85	2.24	ns	-*	22.44	23.65	19.20	ns	ns	2.16	2.19	1.91	ns	ns	21.10	22.37	16.68	ns	ns	2.04	2.23	1.69	ns	ns
4	4.02	3.70	2.55	-*	-*	26.97	26.30	24.73	ns	ns	2.74	2.34	2.18	-*	ns	22.50	20.49	15.72	ns	ns	2.40	2.33	1.93	ns	ns
5	4.12	3.06	2.30	-*	ns	24.55	23.28	19.35	ns	ns	2.47	2.14	2.14	ns	ns	25.54	20.80	17.29	-*	ns	2.53	2.35	2.05	ns	ns
6	3.69	3.06	2.62	-*	ns	26.72	25.36	22.25	ns	ns	2.69	2.33	1.94	-*	ns	25.00	25.14	21.56	ns	ns	2.88	2.65	2.13	ns	ns
7	3.37	3.11	2.86	ns	ns	20.91	21.50	17.83	ns	ns	2.03	2.11	1.71	ns	ns	21.56	18.73	18.42	ns	ns	2.02	2.07	1.94	ns	ns
8	3.13	2.40	2.01	-*	ns	17.12	19.40	21.32	ns	ns	1.90	1.93	1.85	ns	ns	18.59	16.93	14.20	ns	ns	1.89	1.77	1.77	ns	ns
9	3.46	3.72	2.81	ns	ns	24.75	28.30	25.95	ns	ns	2.30	2.51	2.25	ns	ns	24.98	24.83	18.24	ns	-*	2.57	2.67	2.12	ns	ns
10	3.65	3.42	2.79	ns	ns	18.29	20.72	21.07	ns	ns	2.11	2.25	2.14	ns	ns	20.54	21.05	18.38	ns	ns	2.03	2.29	2.22	ns	ns
11	3.52	2.58	2.60	-*	ns	23.50	20.14	23.27	ns	ns	2.14	1.92	2.13	ns	ns	23.14	19.51	21.56	ns	ns	2.14	2.06	2.07	ns	ns
12	2.88	3.01	1.82	ns	-*	21.18	23.14	16.83	ns	-*	2.18	2.44	1.75	ns	-*	17.74	18.89	11.95	ns	-*	1.91	2.02	1.61	ns	ns
13	2.99	2.92	1.84	ns	-*	20.16	21.21	14.51	ns	-*	2.07	2.21	1.47	ns	-*	18.59	19.44	11.40	ns	-*	1.78	2.06	1.44	ns	ns
14	2.38	3.12	2.55	ns	ns	18.03	21.00	19.05	ns	ns	1.61	2.05	1.95	ns	ns	14.69	18.17	15.35	ns	ns	1.74	2.12	1.87	ns	ns
15	3.63	2.47	1.88	-*	ns	21.19	20.71	15.96	ns	ns	2.13	2.01	1.64	ns	ns	22.25	18.04	13.44	ns	ns	2.37	2.08	4.22	ns	+
16	2.99	2.82	2.56	ns	ns	21.02	21.51	19.48	ns	ns	1.81	2.00	1.92	ns	ns	26.85	22.61	21.71	ns	ns	2.35	2.45	2.10	ns	ns
	Enxofre (g ² mg ⁻¹)					Manganês (g ² mg ⁻¹)					Boro (g ² mg ⁻¹)					Cobre (g ² mg ⁻¹)					Zinco (g ² mg ⁻¹)				
1	24.36	21.41	28.62	ns	ns	0.17	0.18	0.19	ns	ns	1.77	1.15	1.39	-*	ns	1.06	1.02	1.33	ns	+	0.85	0.95	1.03	ns	ns
2	32.96	31.98	24.23	ns	ns	0.19	0.26	0.19	ns	ns	1.84	1.82	1.08	ns	-*	1.21	1.43	1.01	ns	-*	1.03	1.24	0.79	ns	-*
3	26.62	30.14	23.55	ns	ns	0.20	0.20	0.22	ns	ns	1.38	1.61	1.22	ns	ns	1.27	1.46	1.25	ns	ns	1.14	1.26	0.99	ns	ns
4	33.07	27.91	24.55	ns	ns	0.30	0.22	0.20	-*	ns	1.76	1.28	1.49	ns	ns	1.21	1.38	1.22	ns	ns	1.25	1.23	0.97	ns	ns
5	38.94	32.89	25.95	-*	ns	0.21	0.18	0.22	ns	ns	1.85	1.55	1.20	-*	ns	1.39	1.53	1.24	ns	ns	1.32	1.29	0.98	ns	ns
6	33.34	37.03	26.06	ns	-*	0.21	0.27	0.26	ns	ns	1.53	1.44	1.19	ns	ns	1.51	1.74	1.27	ns	-*	1.36	1.43	0.94	ns	-*
7	30.34	27.89	23.48	ns	ns	0.18	0.19	0.21	ns	ns	1.36	1.23	1.21	ns	ns	1.26	1.28	1.08	ns	ns	1.10	1.11	1.04	ns	ns
8	24.43	26.68	22.88	ns	ns	0.15	0.16	0.20	ns	ns	1.61	1.14	1.07	-*	ns	1.32	1.22	1.12	ns	ns	1.15	0.89	0.86	ns	ns
9	34.56	37.23	33.08	ns	ns	0.20	0.23	0.24	ns	ns	1.69	1.50	1.42	ns	ns	1.55	1.56	1.41	ns	ns	1.24	1.29	1.28	ns	ns
10	26.40	31.92	27.09	ns	ns	0.18	0.20	0.18	ns	ns	1.47	1.57	1.25	ns	ns	1.30	1.41	1.35	ns	ns	1.16	1.46	1.26	ns	ns
11	33.62	30.87	32.44	ns	ns	0.21	0.19	0.25	ns	ns	1.38	1.38	1.53	ns	ns	1.35	1.18	1.07	ns	ns	1.10	1.06	1.00	ns	ns
12	28.53	30.15	17.55	ns	-*	0.18	0.23	0.19	ns	ns	1.29	1.35	0.99	ns	ns	1.06	1.36	0.84	ns	-*	0.97	1.10	0.80	ns	ns
13	28.53	27.57	14.95	ns	-*	0.19	0.19	0.13	ns	ns	1.27	1.36	0.88	ns	-*	1.39	1.21	0.83	-*	-*	1.00	1.01	0.63	ns	-*
14	20.54	26.52	22.83	ns	ns	0.16	0.23	0.19	ns	ns	1.61	1.72	1.25	ns	-*	1.17	1.39	1.06	ns	-*	1.03	1.33	1.09	ns	ns
15	32.12	27.84	18.57	ns	-*	0.15	0.16	0.16	ns	ns	1.64	1.37	0.91	-*	ns	1.29	1.19	1.03	ns	ns	1.17	0.96	0.78	ns	ns
16	27.76	28.89	23.82	ns	ns	0.19	0.22	0.21	ns	ns	1.59	1.40	0.97	-*	ns	1.33	1.35	1.06	ns	ns	1.26	1.39	0.98	ns	-*

¹ GC1: Grau de compactação um, 1060 kg m³; GC2: Grau de compactação dois, 1190 kg m³; e GC3: Grau de compactação três, 1290 kg m³; Contraste um (C1 = $\bar{y}_{GC2} + GC3$ vs \bar{y}_{GC1}); Contraste dois (C2 = \bar{y}_{GC3} vs \bar{y}_{GC2});

² *significativo ao nível de 5% de probabilidade e ns = não significativo ao nível de 5% de probabilidade (ANOVA), onde há possibilidade de efeito positivo significativo (+*), ou seja, aumento da média da variável em questão com a compactação, ou efeito negativo significativo (-*), com respectiva diminuição da média da variável com a compactação.

4.5. Classificação de clones

4.5.1. Classificação com base no crescimento e produção

A abordagem proposta no presente estudo possibilitou a escolha de variáveis de fácil obtenção para classificação de clones, como por exemplo, as relacionadas ao crescimento, como diâmetro do coleto (Dc e TCR Dc), produção de matéria seca (MSF, MSRG, MSPA, MST) e desenvolvimento dos clones (AFE). As respectivas variáveis representaram o comportamento médio dos clones dentro dos grupos classificatórios, com concordância geral de (40%) na classificação (Tabela 13).

A classificação realizada para as variáveis já mencionadas, mostrou que as melhores respostas ao crescimento, desenvolvimento e produção de matéria seca foram observadas para os clones do grupo 1 (clones 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 14, 15 e 16), pois esses materiais foram tolerantes à compactação, convivendo a restrição sem perder altura e ganhos da matéria seca. Em segundo lugar está o grupo 2, composto pelos clones 2, 5, 12 e 13, nos quais apresentaram moderada tolerância a compactação. Os clones mais sensíveis à compactação foram: os clones 2 (grupo 3), 1 e 6 (grupo 4), pois esses apresentaram reduções significativas com a compactação, com os piores desempenhos de crescimento e produção.

Tabela 13. Classificação de clones utilizando variáveis¹ de crescimento e produção de matéria seca

Clone	Dc	TCRDc	MSRG	MSF	MST	MSPA	AFE	Grupo
1	1	1	4	4	4	4	3	4
2	3	4	1	3	3	3	3	3
3	1	1	1	2	2	2	1	1
4	1	1	2	1	4	4	1	1
5	1	1	2	2	3	3	2	2
6	1	4	2	4	4	4	2	4
7	1	1	1	2	1	1	2	1
8	1	1	1	4	4	4	1	1
9	1	1	1	2	1	1	4	1
10	1	1	1	1	1	1	4	1
11	4	4	2	1	1	1	1	1
12	1	1	4	2	2	2	3	2
13	3	2	4	2	2	3	2	2
14	4	4	1	1	1	1	2	1
15	1	1	4	1	4	4	1	1
16	1	1	1	2	1	2	4	1

¹ Dc (diâmetro do coleto (mm), F = 1,86), TCRDc (taxa de crescimento relativo do diâmetro do coleto (mm dia⁻¹, F = 1,87), MSRG (matéria seca de raiz grossa (g), F = 2,91), MSF (matéria seca de folha (g), F = 3,81), MST (matéria seca total (g), F = 4,25), MSPA (matéria seca da parte aérea (g), F = 4,49), AFE (área foliar específica (cm² g⁻¹), F = 7,99).

4.5.2. Classificação com base na eficiência nutricional

A segunda classificação realizada em grupos, nesse caso, para as variáveis nutricionais, mostrou que as maiores respostas foram observadas para variáveis relacionadas à translocação (ETB, ETK, ETCa e ETCu) e utilização de nutrientes (EUN, EUP, EUK, EUMg e EUB) pelos clones. As respectivas variáveis representaram o comportamento médio dos clones dentro dos grupos classificatórios, com concordância geral de (53%) na classificação (Tabela 14).

As melhores respostas à eficiência nutricional foram observadas para os clones do grupo 1 (clones 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 14 e 16), pois esses materiais foram tolerantes à compactação, conviveram com as restrições físicas sem perdas de eficiência ao transferir e utilizar os nutrientes. Em segundo lugar está o grupo 2, composto pelos clones 2, 12 e 13, nos quais apresentaram moderada tolerância à compactação. Os clones mais afetados pela compactação foram os clones 2, 12 e 13 (grupo 2) e 1 e 15 (grupo 4), pois apresentaram reduções significativas com a compactação, com os piores desempenhos no quesito eficiência nutricional, mostrando-se sensíveis à compactação.

Tabela 14. Classificação de clones utilizando variáveis¹ de eficiência nutricional

Clone	ETB	ETK	ETCa	ETCu	EUN	EUP	EUK	EUMg	EUB	Grupo
1	4	4	4	2	4	2	1	1	4	4
2	4	1	1	1	3	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1
4	2	1	1	1	3	1	4	1	1	1
5	2	1	1	1	4	1	1	4	4	1
6	1	1	1	1	4	1	4	1	1	1
7	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1
8	2	1	1	1	4	1	1	1	4	1
9	1	1	1	2	1	1	1	2	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	4	1	1	1	1	1
12	1	4	1	4	2	2	2	2	1	2
13	1	1	1	4	2	2	2	2	2	2
14	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1
15	1	4	4	1	4	1	1	4	4	4
16	1	1	2	4	1	1	1	1	4	1

¹ ETB (eficiência de translocação de boro (mg mg^{-1}), $F = 1,99$), ETK (eficiência de translocação de potássio (mg mg^{-1}), $F = 1,93$), ETCa (eficiência de translocação de cálcio (mg mg^{-1}), $F = 1,98$), ETCu (eficiência de translocação de cobre (mg mg^{-1}), $F = 2,06$), EUN (eficiência de utilização de nitrogênio, $F = 3,80$), EUP (eficiência de utilização de fósforo ($\text{g}^2 \text{mg}^{-1}$), $F = 2,40$), EUK (eficiência de utilização de potássio ($\text{g}^2 \text{mg}^{-1}$), $F = 2,50$), EUMg (eficiência de utilização de magnésio ($\text{g}^2 \text{mg}^{-1}$), $F = 2,27$), EUB (eficiência de utilização de boro ($\text{g}^2 \text{mg}^{-1}$), $F = 2,38$).

4.5.3. Classificação geral de clones

O índice kappa de Fleiss (Kf) é influenciado pela prevalência (superioridade a um dado ou outro) e pelo viés (tendência), o que pode levar ao paradoxo de alta concordância entre as observações, mas baixo kappa, como observado no presente estudo, pois ambas as classificações realizadas obtiveram os mesmos coeficientes Kappa (Kf =0,11), mesmo quando a classificação com base nas variáveis nutricionais apresentou maior similaridade e maior concordância geral. Neste sentido, o Kappa de Randolph (Kr) apresentou valores proporcionais ao nível de similaridade dentro e entre as classificações, onde mostrou melhor desempenho geral quando comparado ao Kf (Tabela 15).

No geral, observou-se que os clones 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 14 e 16, podem ser recomendados para futuros testes em campo, para avaliar-se a tolerância de clones a compactação, pois tais clones apresentaram tolerância à compactação do solo, com os melhores desempenhos na classificação geral de clones (concordância geral de 75%). Os clones 2, 5, 6 e 15 foram os únicos que apresentaram discordâncias na classificação geral de clones, todos os demais clones foram classificados no mesmo grupo, quando avaliados do ponto de vista de crescimento e produção (classificação 1) ou nutrição (classificação 2).

Tabela 15. Concordância de classificações de clones de eucalipto

Clone	Classificação ¹	Classificação ²	Classificação geral ³
1	4	4	4
2	3	2	2;3
3	1	1	1
4	1	1	1
5	2	1	1;2
6	4	1	1;4
7	1	1	1
8	1	1	1
9	1	1	1
10	1	1	1
11	1	1	1
12	2	2	2
13	2	2	2
14	1	1	1
15	1	4	1;4
16	1	1	1
Kappa Fleiss (p > 0,05)	0.11	0.11	0.32
Kappa Randolph (p > 0,05)	0.20	0.37	0.67
Concordância geral	40%	53%	75%

¹ Classificação com base em variáveis de crescimento e produção de matéria seca; ² Classificação com base em variáveis de eficiência nutricional; ³ Teste de concordância (Kappa) entre as classificações de clones (classificação 1 e classificação 2).

5. DISCUSSÃO

5.1. Produção e desenvolvimento de clones

A compactação do solo afetou de forma significativa a produção de matéria seca dos clones, conforme já observado em outros estudos (ELOY et al., 2013; RICHART et al., 2016; SILVA et al., 2006), tanto para a cultura do eucalipto (EDUARDO et al., 2016; RICHART et al., 2016; TEIXEIRA; GONÇALVES; JÚNIOR, 2006; WILLIAMSON; NEILSEN, 2003), quanto para outras culturas, como o arroz (BEUTLER, CENTURION, 2004), soja (MORAES et al., 2020), trigo, cevada, centeio, triticale, milho (SZATANIK-KLOC et al., 2018), capim (GLAB, 2014) e carvalho vermelho (CAMBI et al., 2017).

No presente estudo, a matéria seca de parte aérea e total apresentaram reduções significativas e descreveram melhor o comportamento da planta frente as mudas impostas pela compactação. As restrições físicas do solo foram relacionadas as mudanças na estrutura e funcionamento dos clones, pois plantas sob compactação apresentam cutículas e epiderme mais delgadas nas folhas, resultado da menor espessura do mesófilo e das proporções de parênquima paliçádico, tecido condutores e de sustentação da planta, com maiores espaços intercelulares para aquisição de forma mais eficiente da radiação solar (BERLYN; CHO, 2000).

Observou-se aumento da produção e partição matéria seca de caule, essa mudança no metabolismo de uso dos carboidratos pela planta é proporcionado pela impedância oriunda da compactação, como observado por Atwell (1993). A maior ou menor proporção de um determinado compartimento reflete estratégias usadas pelas plantas para desenvolver-se em um ambiente adverso, o que demonstra a eficiência de uso e alocação de carbono ao longo do ciclo vegetativo da planta (PIMENTEL, 1998; SILVA et al., 2015; WALTER; ROSA; STRECK, 2015).

A compactação do solo favoreceu o ganho de matéria seca de raiz grossa, o que pode ser explicado pelas mudanças estruturais, em nível celular, que ocorrem nas plantas, havendo ganhos expressivos de matéria seca com a compactação (GOSS et al., 1993; O'TOOLE; BLAND, 1987; SZATANIK-KLOC et al., 2018). Além das alterações a nível de matéria seca, houve também modificação da morfologia radicular dos clones com a compactação, situação semelhante ao abordados por Moraes et al., (2020) quando se avaliou o crescimento radicular de soja em Latossolo compactado.

A partição de raízes, tanto grossas quanto finas, foi responsável por aproximadamente 10% da matéria seca total das plantas, contudo, alguns clones modificaram essas proporções, com aumentos do percentual de raízes. As proporções de raízes são importantes na avaliação dos efeitos da compactação do solo, pois a maior ou menor distribuição do carbono assimilado entre os compartimentos mostram as estratégias para convivência com a compactação (COSTA et al., 2012; GOSS et al., 1993; OLIVEIRA et al., 2006; STAHL et al., 2013).

O metabolismo de carboidratos da raiz (e parte aérea) também é alterado pela impedância, de maneira a produzir um equilíbrio favorável de biomassa acima e abaixo do solo e impedir a privação de carboidratos nos tecidos em crescimento (ATWELL, 1993). A quantidade de biomassa abaixo do solo reflete a estratégia usada pela planta para guardar água e conviver na condição estressante até que a favorável emerja (VALDÉS-RODRÍGUEZ et al., 2018). O crescimento e a atividade radicular apresentam custos metabólicos para as plantas, pois aumentar o diâmetro das raízes gera custo adicional de C, dos quais precisam de fontes de fotoassimilados para manter o equilíbrio fonte-dreno (O'TOOLE; BLAND, 1987). A melhor alternativa disponível para as plantas é aumentar a área foliar para assim compensar o uso de carboidratos na planta (VALDÉS-RODRÍGUEZ et al., 2018).

Nesse sentido, o índice de qualidade de Dickson, uma variável integradora de outras, apesar de ser uma indicadora da qualidade das mudas em fase de viveiro (ELOY et al., 2013; MARANA et al., 2008), também não foi sensível à compactação, contudo, apresentou valores positivos em alguns casos, demonstrando a capacidade adaptativa de clones mesmo em restrições físicas do solo, como a compactação.

O aumento da área foliar específica de alguns clones, foi uma das estratégias utilizadas pelas plantas, para conviver com a compactação, semelhante a outras culturas sobre estresse (VALDÉS-RODRÍGUEZ et al., 2018; AZZI et al., 2017). Nessas condições é comum as plantas investirem em maiores proporções de fotoassimilados e outros recursos para o aumento da área foliar, visando aumentar a captação de luz solar e consequentemente maior eficiência fotossintética, em função do estresse físico do solo (GOBBI et al., 2011; LAMBERS; CHAPIM III; PONS, 1998).

O aumento da AFE dos clones pode ser explicado especificamente pela respiração, já que é um processo de transformação dos carboidratos produzidos na

fotossíntese, resultando na liberação de energia, a qual é utilizada para a manutenção dos processos fisiológicos das plantas (LUNT, 1976). Portanto, é de se esperar que, na medida em que a planta cresça, ocorra um aumento no processo respiratório, e, conseqüentemente, a fotossíntese bruta terá que ser maior para atender às necessidades metabólicas (CLARKSON, 1985) diminuindo a espessura das folhas e aumentando a área foliar para manter os processos fisiológicos.

5.2. Desenvolvimento de raízes em solo compactado

A compactação do solo reduz razoavelmente o volume de macroporos, espaço esse que tem o potencial de aerar o solo e conduzir a água até as raízes das plantas. Em estudo realizado por Colombi et al. (2017) foi observado a estreita relação entre macroporos e crescimento das raízes, influenciando a fertilidade, o crescimento e a produtividade das plantas. As respostas morfológicas radiculares à compactação do presente estudo envolveram a alteração da forma e tamanho das raízes dos clones, desfavorecendo assim a aquisição de água e nutrientes pelas plantas, confirmando o observado em estudos já desenvolvidos nessa temática (AGUILERA ESTEBAN et al., 2019; ALAMEDA; ANTEN; VILLAR, 2012; COLOMBI et al., 2018; MORAES et al., 2020; VALDÉS-RODRÍGUEZ et al., 2018).

Houve alterações do diâmetro, comprimento, área superficial, volume, número de pontas e relação número de pontas por comprimento de raízes dos clones com a compactação, conforme observado por outros estudos (COLOMBI et al., 2018; GOSS et al., 1993; O'TOOLE; BLAND, 1987). Essas mudanças enfrentadas no ambiente de aquisição de água e nutrientes pelas plantas, modificam a estrutura radicular, demonstrando então a importância da avaliação de forma específica cada variável (BELL et al., 1993; VALDÉS-RODRÍGUEZ et al., 2018).

Observou-se alguns clones com aumento do diâmetros radicular em função da compactação, os quais seguem o padrão descrito por diversos trabalhos realizados (COLOMBI et al., 2017; SALEEM et al., 2018; SILVA et al., 2002; SZATANIK-KLOC et al., 2018), em situações semelhantes de avaliação de raízes sob estresses de solo. O diâmetro médio radicular é um importante indicador da regulação do estresse hídrico e do potencial de crescimento radicular. É considerado um indicador da influência e das respostas às condições físicas e químicas do solo mostrando que o encurtamento e espessamento das raízes, juntamente com o aumento da área do cilindro vascular e diminuição do córtex, são as causas da baixa aquisição de

nutrientes pelas plantas (LIPIEC et al., 2012; SALEEM et al., 2018; SZATANIK-KLOC et al., 2018).

O espessamento radicular é uma estratégia utilizada pela planta para armazenar água abaixo do solo e manter a sua atividade metabólica mesmo em condições de estresse, pois essa manutenção está em função do aumento dos raios do xilema e menor resistência axial ao fluxo de água (GOWDA et al., 2011; LIAO et al., 2018; VALDÉS-RODRÍGUEZ et al., 2018). As células corticais tendem a se tornar mais largas e mais curtas, causando espessamento do eixo radicular, enquanto os volumes radiculares e as pressões osmóticas mudam como resultado (ATWELL, 1993).

Observou-se na literatura existente, que algumas espécies conseguem manter a estrutura e morfologia radicular, mesmo em condições de estresses causados por mudanças de ordem física ou química dos solos. Para isso, a planta modifica a arquitetura das raízes, com disposição horizontal e em profundidade, para explorar maior massa de solo e absorver água e nutrientes (COLOMBI et al., 2018; VALDÉS-RODRÍGUEZ et al., 2018). Essa modificação da morfologia radicular em função da compactação altera a aquisição de água e nutrientes (GOSS et al., 1993; SZATANIK-KLOC et al., 2018; TOMAZ et al., 2003).

A redução do comprimento radicular é comumente reportado na literatura, com valores que variam de 12 a 80% (SZATANIK-KLOC et al., 2018). Os comprimentos radiculares para o eucalipto e vários cereais (trigo, cevada, centeio e milho) foram de 23 a 40 cm em solo compactado (LIPIEC et al., 2012). A modificação do cilindro vascular das plantas, na forma de achatamentos, pode ultrapassar as barreiras físicas impostas pela compactação e é a forma encontrada pela planta para crescer no solo compactado, pois a forma cilíndrica não permite o acesso a poros afetados pela compactação (LIPIEC et al., 2012).

5.3. Eficiência nutricional de clones de eucalipto

A distribuição dos teores de macronutrientes entre os compartimentos de planta no presente estudo, mostrou-se muito similar ao observado por Arias et al. (2011), quando avaliou-se os nutrientes N, P, K, Mg e Ca em diferentes espécies. Os valores observados de teor de Ca na planta, mostram que 30% estão localizados nas folhas, 40% no caule e 30% nas raízes. A maior presença de Ca no caule deve-se ao fato do mesmo ser um importante elemento estrutural das plantas, participando ativamente da divisão celular e formação da parede celular (WHITE et al., 2002).

A compactação do solo afeta de forma considerável a quantidade de clorofila das plantas de diferentes espécies, fato esse atribuído a diminuição da aquisição de nutrientes transportados por fluxo de massa no solo, principalmente o P e K, estão envolvidos na fotossíntese (AZZI et al., 2017; CAMBI et al., 2017). Juntamente com o déficit de nutrientes essenciais as plantas, está a água, que também tem sua aquisição afetada pela compactação (BETIOLI JÚNIOR et al., 2012). Desta forma, as plantas precisam de estratégias para realizar a fotossíntese e produzir biomassa. A principal estratégia observada é o aumento da AFE, torna-se uma alternativa fisiológica de reposição de clorofila pelas plantas, em virtude do estresse sofrido com a compactação, como observado também por Azzi et al. (2017).

Houve aumento dos teores de N nos clones de eucalipto, assim como nenhuma resposta quanto aos conteúdos de nutrientes na parte área ou total de matéria seca. O fato é que o nitrogênio é requerido em grandes quantidades pelo eucalipto, entretanto, as repostas à aplicação desse nutriente são divergentes, conforme estudos desenvolvidos por Ferreira et al., (2015) a absorção destes nutrientes pelas plantas apresenta diferenças substâncias entre genótipos e ambientes. No geral, as plantações de eucalipto apresentam grande impacto no estoque de carbono orgânico do solo, acidez e estado de nutrientes do solo, exceto o estoque total de N no solo (GUEDES; OLSSON; KARLTUN, 2016).

O aumento do conteúdo de B na planta, em todos os compartimentos, pode estar relacionado a diminuição da aquisição de água pelas plantas, conforme estudo desenvolvido por Mattiello et al. (2009). Já em estudo desenvolvido por José et al., (2009) sobre a mobilidade B em clones de eucalipto, constatou-se que os clones menos sensíveis à deficiência de B, aparentemente, apresentaram maior habilidade de translocar B, previamente absorvido via sistema radicular, para tecidos jovens quando este micronutriente se tornou limitante na solução. Assim, as evidências indicam que o B é relativamente móvel no eucalipto, essa maior mobilidade é devida à presença de um composto orgânico, como o manitol, que complexa o B para sua translocação.

As diferenças de concentração de nutrientes entre os compartimentos e dentro dos compartimentos da planta é decorrente do ciclo bioquímico que envolve transferência “interna” do nutriente móvel no floema (ABICHEQUER; BOHNEN, 1998; MELO et al., 1995; TOMAZ et al., 2006). A eficiência nutricional representada pela eficiência de aquisição, reflete os aumentos de matéria seca em

função da disponibilidade do nutriente, o que o classifica como mais apropriado para avaliar a eficiência de materiais genéticos, já que explica como a planta utiliza o nutriente para produzir biomassa.

A eficiência de aquisição de nutrientes foi pouco afetada pela compactação, houve poucos casos de clones que tiveram sua aquisição alterada com a compactação. Contudo, alguns clones apresentaram reduções em quase todos os nutrientes avaliados (Exceção N). Essa redução pode estar relacionada à diminuição do comprimento radicular, e outras alterações fisiológicas ocasionadas pela compactação, alterando assim a aquisição de nutrientes pelas plantas, já que o N, Ca, Mg, S e micronutrientes são transportados preferencialmente por fluxo de massa, sofrendo influência do comprimento radicular na aquisição de nutrientes (GOSS et al., 1993). Os valores observados para a eficiência de aquisição de nutrientes neste estudo assemelham-se aos obtidos por Pinto et al. (2011) ao avaliarem a eficiência de clones de eucalipto na fase de mudas em solução nutritiva, ambos resultados próximos aos apresentados em outros estudos da área (LIMA et al., 2005; POZZA et al., 2009; FONTES et al., 2013).

No geral a eficiência de translocação apresentou maior número de interações significativas quando se avaliou os clones em solo compactado que a eficiência de aquisição. As transferências de nutrientes das raízes para a parte aérea pelos clones, apresentou declínio com o aumento de densidade do solo. Com exceção do B e Zn em um clone específico (5), todos os demais nutrientes foram afetados. Onde os valores médios de eficiência de translocação observados mostram-se superiores aos encontrados por Pinto et al. (2011). A translocação de nutrientes realizada pelas plantas fornece cerca de 30% das necessidades anuais de N e P a partir dos dois anos de idade, e cerca de 50% das exigências de K, segundo estudo desenvolvido por LACLAU et al. (2003).

A eficiência de utilização de nutrientes foi a mais sensível em termos de diferenças significativas entre todas as eficiências avaliadas, e apresentou grande número de reduções com a compactação. Avaliar a eficiência de utilização do nutriente absorvido pela planta é tão importante quanto à de aquisição dos nutrientes, conforme estudo desenvolvido por Pozza et al. (2009), contudo a sensibilidade da eficiência de utilização mostrou-se maior no presente estudo.

Alguns clones não apresentaram reduções na aquisição de nutrientes, ou seja, foram capazes de absorver os nutrientes requeridos e apresentaram ainda, em

algumas circunstâncias, a translocação de nutrientes na planta especialmente para o S, Cu e Zn. Contudo, mesmo absorvendo e transferindo os nutrientes, não houve eficiência em reutilizar tais nutrientes, na produção de matéria seca, quando submetidos à compactação. A compactação reduziu significativamente a matéria seca das folhas, raízes e toda a planta, bem como a eficiência nutricional da maioria dos clones, conforme estudo existentes (LIMA et al., 2005; POZZA et al., 2009; PINTO et al., 2011; FONTES et al., 2013).

As plantas mantêm a eficiência nutricional em condições de estresse por meio de adaptações, com sistemas radiculares mais extensos, aumento nas taxas de aquisição por unidade de comprimento de raiz, ou seja, maior influxo de nutrientes, espessamento do sistema radicular e aumento da área foliar (ABICHEQUER; BOHNEN, 1998; CAMARGO et al., 2008; COLOMBI et al., 2018; ROZANE et al., 2010).

5.4. Seleção e classificação de clones de eucalipto

Os fatores mais importantes no processo seletivo para um genótipo são características da madeira, nível de produtividade, suscetibilidade a pragas e doenças, tolerância à seca, especialmente em regiões tropicais e tolerância à geada em regiões subtropicais conforme Gonçalves et al. (2013). A tolerância de genótipos à estresses físicos, especialmente impedâncias, não é comumente apresentado em periódicos científicos como fator importante na seleção de clones (ATWELL, 1993). Plantações clonais com híbridos interespecíficos têm sido fundamentais para a adaptação do eucalipto em regiões sob estresse hídrico e nutricional, a seleção de materiais adaptados à essas determinadas restrições têm sido a melhor alternativa às condições de campo da atualidade (BOTREL et al., 2010; CHAVES et al., 2004; PROTÁSIO et al., 2013).

Os clones de eucalipto comportam-se de forma diferenciada quanto à produção de matéria seca e eficiência nutricional em condições de restrições físicas no presente estudo, no qual houve clones tolerantes e mais sensíveis a compactação, conforme trabalho desenvolvido por Stahl et al. (2013). Esse comportamento é extremamente interessante para a seleção de genótipos, pois saber quais clone convivam melhor em solos de distintas características físicas e relevante (ZANI FILHO et al., 2016).

Em estudo de seleção de clones quanto ao déficit hídrico desenvolvido por Müller et al., (2017) avaliou-se a eficiência de crescimento e uso pelos nutrientes,

onde os clones foram agrupados como tolerantes à seca; como moderadamente tolerante; e como sensíveis à seca. Esse tipo de estudo é necessário, pois assim é possível utilizar clones para cada região de interesse, conforme as características do ambiente e do material genético. Curiosamente, sob estresse hídrico, os clones tolerantes à seca geralmente tinham um comportamento específico quanto a eficiência nutricional, pois apresentaram alta eficiência de absorção, mas baixo teor de nutrientes (eficiência de uso), enquanto os clones sensíveis tinham baixa eficiência de absorção e baixa eficiência de utilização para formação de raízes e alta eficiência de absorção para formação de folhas.

A classificação de clones realizada no presente estudo apresentou baixos valores de concordância dentro dos grupos classificatórios de acordo com o índice de concordância Kappa de Fleiss, no entanto, quando utilizou o Kappa de Randolph, os valores foram superiores e mais concordantes com os dados apresentados. Essa divergência está em função da escolha de teste, e qual deve ser empregada para cada tipo de dado.

O índice de concordância Kappa de Fleiss é amplamente usado de concordância entre avaliadores para variáveis com categorias nominais, e não é apropriado para situações em que as distribuições não são fixas (FLEISS, 1981). Diferentemente do kappa multi-avaliador de Fleiss, os valores de Kappa de Randolph não variam em função da simetria das distribuições marginais; eles variam em função do número de categorias de classificação usadas. Recomenda-se o multi-avaliador livre como uma alternativa ao kappa de Fleiss quando os avaliadores não sabem a priori como os casos devem ser distribuídos em categorias (RANDOLPH, 2005).

Quando variedades marginais fixas de kappa (por exemplo, kappa de Cohen, pi de Scott e kappa de Fleiss) são usadas em estudos de concordância com margem livre, o valor da kappa pode variar significativamente, pois as proporções da concordância geral, número de avaliadores, categorias e casos são mantidos constantes (LANDIS; KOCH, 1977). O valor das versões marginal-fixa do kappa pode dobrar ou reduzir pela metade, dependendo das características das distribuições marginais. Atribuiu-se esse comportamento a dois aspectos: prevalência, definida como “as verdadeiras proporções de casos de vários tipos em uma população” e viés, definido como “o viés de um avaliador em relação a outro” na atribuição de casos (RANDOLPH, 2005).

6. CONCLUSÕES

Ao selecionar variáveis para classificar clones superiores, sejam no sentido da tolerância a compactação do solo ou simplesmente maior eficiência no uso de recursos do sítio, observou-se que a massa de matéria seca de parte aérea apresentou resultados satisfatórios, sendo por tanto uma variável de fácil obtenção e uso.

Do ponto de vista nutricional, na análise mais refinada de avaliação das eficiências nutricionais, observou-se que a eficiência de utilização, e promissora nesse âmbito, especialmente para os nutrientes K e N.

A classificação realizada em grupos mostrou que as melhores respostas ao crescimento e produção de matéria seca foram observadas para os clones do grupo 1 (clones 7, 8, 9, 10, 11, 14 e 16). A segunda classificação realizada com as variáveis nutricionais mostra que as melhores respostas a convivência com a compactação foram do grupo 2 (clones 3 e 12).

Portanto, independente da forma de classificação de clones, observou-se que os clones 3, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14 e 16, podem ser recomendados para futuros testes em campo para avaliar-se a tolerância de clones a compactação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABICHEQUER, A. D.; BOHNEN, H. Eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 1, p. 21–26, 1998.

ABRAF. **Anuário estatístico da associação brasileira de florestas plantadas** Brasília-DF, 2013.

AGHERKAKLI, B.; NAJAFI, A.; SADEGHI, S. H. Ground based operation effects on soil disturbance by steel tracked skidder in a steep slope of forest. **Journal of Forest Science**, v. 56, n. 6, p. 278–284, 2010.

AGUILERA ESTEBAN, D. A. et al. Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. **Soil and Tillage Research**, v. 187, n. June 2018, p. 60–71, 2019.

ALAMEDA, D.; ANTEN, N. P. R.; VILLAR, R. Soil compaction effects on growth and root traits of tobacco depend on light, water regime and mechanical stress. **Soil and Tillage Research**, v. 120, p. 121–129, 2012.

ALMEIDA, B. G. et al. **Padronização de métodos para análise granulométrica no Brasil**. Rio de Janeiro, 2012.

ALVAREZ V., V. H. et al. **Métodos de análises de enxofre em solos e plantas**. Universidade Federal de Viçosa, 2001.

ARIAS, D. et al. Productivity, aboveground biomass, nutrient uptake and carbon content in fast-growing tree plantations of native and introduced species in the Southern Region of Costa Rica. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 5, p. 1779–1788, maio 2011.

ATWELL, B. J. Response of roots to mechanical impedance. **Environmental and Experimental Botany**, v. 33, n. 1, p. 27–40, 1993.

AZZI, V. et al. Lactuca sativa growth in compacted and non-compacted semi-arid alkaline soil under phosphate fertilizer treatment and cadmium contamination. **Soil and Tillage Research**, v. 165, p. 1–10, 2017.

BALBINO, L. C. et al. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura - pecuária - floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuária**

Brasileira, v. 46, n. 10, p. i–ix, 2011.

BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K. Plant nutrient efficiency: towards the second paradigm. In: SIQUEIRA, J. O. et al. (Eds.). **Soil fertility, soil biology and plant nutrition interrelationships**. Lavras- Minas Gerais: Brazilian Soil Science, p. 183–204. 1999.

BALLONI, E. A.; SIMÕES, J. W. O espaçamento de plantio e suas implicações silviculturais. **IPEF**, v. 1, p. 1–16, 1980.

BATISTA, R. O.; NETO, A. E. F.; DECCETTI, S. F. C. Eficiência nutricional em clones de cedro-australiano. **Scientia Forestalis**, v. 43, p. 647–655, 2015.

BELL, D. T. et al. Comparisons of growth of *Eucalyptus camaldulensis* from seeds and tissue culture: root, shoot and leaf morphology of 9-month-old plants grown in deep sand and sand over clay. **Forest Ecology and Management**, v. 57, n. 1–4, p. 125–139, 1 mar. 1993.

BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas**. Jaboticabal-SP, 1988.

BERISSO, F. E. et al. Persistent effects of subsoil compaction on pore size distribution and gas transport in a loamy soil. **Soil and Tillage Research**, v. 122, p. 42–51, 2012.

BERLYN, G. P.; CHO, J. Light, moisture, and nutrient use by plants. In: ASHTON, M. S.; MONTAGNINI, F. (Eds.). **The silvicultural basis for agroforestry systems**. [s.l.] Boca Raton: CRC Press, p. 9–39, 2000.

BETIOLI JÚNIOR, E. et al. Intervalo Hídrico Ótimo e Grau de Compactação de um Latossolo Vermelho Após 30 Anos Sob Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 3, p. 971–982, 2012.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Matéria seca e altura das plantas de soja e arroz em função do grau de compactação e do teor de água de dois latossolos. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 1, p. 142–149, 2004.

BEYLICH, A. et al. Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils. **Soil and Tillage Research**, v. 109, n. 2, p. 133–143, 2010.

BLAKE, G. R. ; HARTGE, K. H. Bulk density: Methods of soil analysis. In:

- BOHM, W. (Ed.). **Methods of studying root systems**. Springer-Verlag, New York. p. 194. 1979.
- BOTREL, M. C. G. et al. Seleção de clones de Eucalyptus para biomassa florestal e qualidade da madeira. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, n. 86, p. 237–245, 2010.
- BREMNER, J. M. Nitrogen total. In: SPARKS, D. L. et al. (Eds.). **Methods of soil analysis**. Madison, Wis. (USA): Soil Science Society of América and American Society of Agronomy, p. 1085–1121, 1996.
- CAMARGO, M. L. P. DE et al. Considerações sobre eficiência nutricional em Eucalyptus. **Científica**, v. 32, n. 2, p. 191–196, 2008.
- CAMBI, M. et al. Compaction by a forest machine affects soil quality and Quercus robur L. seedling performance in an experimental field. **Forest Ecology and Management**, v. 384, p. 406–414, 2017.
- CAPELLE, R. Microdosage colorimétrique du bore en milieu aqueux, au moyen de réactifs à groupement azoïque ou imine dérivés des acides H et K. **Analytica Chimica Acta**, v. 24, p. 555–572, 1961.
- CARTER, M. R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. **Can. J. Soil Sci.**, v. 70, p. 425–433, 1990.
- CASTRO, A. F. N. M. et al. Análise multivariada para seleção de clones de eucalipto destinados à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 6, p. 627–635, 2013.
- CHAVES, J. H. et al. Seleção precoce de clones de eucalipto para ambientes com disponibilidade diferenciada de água no solo: relações hídricas de plantas em tubetes. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, v. 28, p. 333–341, 2004.
- CLARKSON, D. T. Adaptações morfológicas e fisiológicas das plantas a ambientes de baixa fertilidade. In: ROSAND, P. C. (Ed.). **Reciclagem de nutrientes e agricultura de baixos insumos nos trópicos**. Ilhéus-Bahia. p. 45–75. 1985.
- CLARKSON, D. T.; HANSON, J. B. The mineral nutrition of higher plants. **Plant Phys.**, v. 31, p. 239–298, 1980.
- COHEN, J. A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, n. 1, p. 37–46, 2 abr. 1960.

- COLOMBI, T. et al. Artificial macropores attract crop roots and enhance plant productivity on compacted soils. **Science of the Total Environment**, v. 574, p. 1283–1293, 2017.
- COLOMBI, T. et al. Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – A vicious circle. **Science of the Total Environment**, v. 626, p. 1026–1035, 2018.
- COSTA, M. A. T. et al. Resistência do solo à penetração e produção de raízes e de forragem em diferentes níveis de intensificação do pastejo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 36, n. 3, p. 993–1004, 2012.
- CUNHA, E. DE Q. et al. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo sob produção orgânica impactados por sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 1, p. 56–63, 2012.
- DA SILVA, R. F. et al. Análise conjunta de atributos físicos e biológicos do solo sob sistema de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1277–1283, 2011.
- DEDECEK, R. A.; GAVA, J. L. Influência da compactação do solo na produtividade da rebrota de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p. 383–390, 2005.
- DEFELIPO, B. V.; RIBEIRO, A. C. **Análises químicas do solo: metodologias**. Viçosa, MG. 1981.
- DEXTER, A. R. Dexter, A. R. (2004). Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tith and hard-setting. **Geoderma**, 120 (3–4), 215–225, 2004.
- DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Qualidade appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **Forestry chronicle**, v. 36, p. 10–13, 1960.
- DO VALE, F. R. et al. Crescimento radicular de espécies florestais em solo ácido. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 31, n. 9, p. 609–616, 1 set. 1996.
- EDUARDO, L. et al. Structural recovery in three selected forest soils after compaction by forest machines in Lower Saxony, Germany. **Soil and Tillage Research**, v. 143, n. 1, p. 204–212, 1 dez. 2016.
- ELOY, E. et al. Avaliação da qualidade de mudas de eucalyptus grandis utilizando

- parâmetros morfológicos. **FLORESTA**, v. 43, n. 3, p. 373–384, 2013.
- EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de solo**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Documentos / Embrapa Solos, 2011.
- FAQUIN, V. **Nutrição Mineral de Plantas**. Universidade Federal de Lavras - Lavras-MG. 2005.
- FERNANDES, H. C.; SOUZA, A. P. DE. Compactação de um latossolo vermelho causada pelo tráfego do “forwarder”. **Revista Árvore**, v. 27, n. 3, p. 279–284, 2003.
- FLEISS, J. L. Statistical Methods for Rates and Proportions. **Technometrics**, v. 46, n. 2, p. 263–264, 2004.
- FOELKEL, C. Eucalyptus Newsletter nº 45 – Fevereiro de 2014 Autoria : Celso Foelkel. 2014.
- FOELKEL, C. E. B. Eucalipto no Brasil, história de pioneirismo. **Revista Visão Agrícola**, v. 3, p. 66–69, 2005.
- GLAB, T. Effect of soil compaction and N fertilization on soil pore characteristics and physical quality of sandy loam soil under red clover/grass sward. **Soil and Tillage Research**, v. 144, p. 8–19, 2014.
- GŁAB, T.; GONDEK, K. The influence of soil compaction and N fertilization on physico-chemical properties of Mollic Fluvisol soil under red clover/grass mixture. **Geoderma**, v. 226–227, n. 1, p. 204–212, 2014.
- GOBBI, K. F. et al. Área foliar específica e anatomia foliar quantitativa do capim-braquiária e do amendoim-forrageiro submetidos a sombreamento. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, n. 7, p. 1436–1444, 2011.
- GODOY, S. G. DE et al. Atributos físicos, químicos e biológicos do solo impactado por cultivos sucessivos de arroz TT - Physical, chemical and biological soil attributes as impacted by successive rice crops. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 62, p. 1278–1285, 2013.
- GOMES, J. M. et al. Parâmetros morfológicos na avaliação de qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v. 26, n. 6, p. 655–664, 2002.
- GONÇALVES, J. L. DE M. et al. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest**

Ecology and Management, v. 301, p. 6–27, 2013.

GOSS, M. J. et al. Root growth and distribution in relation to nutrient availability and uptake. **European Journal of Agronomy**, v. 2, n. 2, p. 57–67, 1 jan. 1993.

GOWDA, V. R. P. et al. Root biology and genetic improvement for drought avoidance in rice. **Field Crops Research**, v. 122, n. 1, p. 1–13, 2011.

GUEDES, B. S.; OLSSON, B. A.; KARLTUN, E. Effects of 34-year-old *Pinus taeda* and *Eucalyptus grandis* plantations on soil carbon and nutrient status in former miombo forest soils. **Global Ecology and conservation**, v. 8, p. 190–202, 2016.

HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of an arable soil. **Soil and Tillage Research**, v. 16, p. 105–120, 1990.

HILLEL, D. Environmental Soil Physics. **Academic Press San Diego CA**, p. 771, 1998.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An introduction to geotechnical engineering**. Prentice- ed. Englewood Cliffs - New Jersey, 1981.

IBÁ. Relatório Anual. **Indústria Brasileira de Árvores**, p. 80, 2017.

JAAFARI, A.; NAJAFI, A.; ZENNER, E. K. Ground-based skidder traffic changes chemical soil properties in a mountainous Oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) forest in Iran. **Journal of Terramechanics**, v. 55, p. 39–46, 2014.

JAKOBSEN, B. F.; GREACEN, E. L. Compaction of sandy forest soils by forwarder operations. **Soil and Tillage Research**, v. 5, n. 1, p. 55–70, 1985.

JESUS, G. L. DE et al. 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**, v. 39, n. 4, p. 1190–1203, 2015.

JOHNSON, C. M.; ULRICH, A. **Analytical Methods for Use in Plant Analysis**. Volume 766 ed. California, 1959.

JUNIOR, M. S. D. Compactação do solo. In: NOVAIS, R. F.; V., V. H. A.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Eds.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Sociedade ed. Viçosa- MG. p. 55–94, 2000.

LACLAU, J.-P. et al. Nutrient dynamics throughout the rotation of *Eucalyptus* clonal stands in Congo. **Annals of botany**, v. 91, n. 7, p. 879–92, jun. 2003.

- LAMBERS, H.; CHAPIM III, F. S.; PONS, T. L. **Plant physiological ecology**. New York: Springer, 1998.
- LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159, 1977.
- LI-COR. **LI-3100 Area Meter Service Manual** Lincoln, Nebraska-USA, 1995.
- LIAO, R. et al. Physiological regulation mechanism of multi-chemicals on water transport and use efficiency in soil-maize system. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 1289–1297, 2018.
- LIPIEC, J. et al. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. **Soil and Tillage Research**, v. 121, p. 74–81, 2012.
- LUNT, G. G. **Fisiologia vegetal**. v. 4, 200 p. 1976.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba, São Paulo: POTAFOS, 1997.
- MARANA, J. P. et al. Índices de qualidade e crescimento de mudas de café produzidas em tubetes. **Ciência Rural**, v. 38, n. 1, p. 39–45, 2008.
- MATTIELLO, E. M. et al. Transporte de boro no solo e sua absorção por eucalipto. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, v. 33, p. 1281–1290, 2009.
- MELO, V. D. F. et al. Balanço nutricional, eficiência de utilização e avaliação da fertilidade do solo em p, k, ca e mg em plantios de eucalipto no rio grande do sul. **Ipef**, v. 48/49, p. 8–17, 1995.
- MILDE, G. A.; DEDECEK, R. A.; GAVA, J. L. Unidades de colheita: estratégia para evitar a compactação dos solos florestais. **Revista Árvore**, v. 34, n. 6, p. 1075–1083, 2010.
- MORA, A. L.; GARCIA, C. H. **A cultura do eucalipto no Brasil**. São Paulo. 2000.
- MORAES, M. T. DE et al. Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 200, n. March 2019, 2020.
- MOURA, P. M. DE et al. Efeito da compactação em dois solos de classes texturais diferentes na cultura do rabanete. **Revista Caatinga**, v. 5, p. 107–112, 2008.

MÜLLER, C. et al. Nutritional efficiency of eucalyptus clones under water stress. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 41, 2017.

NADERI-BOLDAJI, M.; KELLER, T. Degree of soil compactness is highly correlated with the soil physical quality index S. **Soil and Tillage Research**, v. 159, p. 41–46, 2016.

NAGHDI, R.; SOLGI, A.; ILSTEDT, U. Soil chemical and physical properties after skidding by rubber-tired skidder in Hyrcanian forest, Iran. **Geoderma**, v. 265, p. 12–18, 2016.

NESPER, M. et al. Pasture degradation decreases organic P content of tropical soils due to soil structural decline. **Geoderma**, v. 257–258, n. 257–258, p. 123–133, nov. 2015.

NOVAIS, R. F. DE; NEVES, J. C. LIMA; BARROS, N. F. DE. Ensaio em ambiente controlado. In: OLIVEIRA, A. J. DE et al. (Eds.). **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília-DF: Documentos Embrapa, p. 392, 1991.

O'TOOLE, J. C.; BLAND, W. L. Genotypic Variation in Crop Plant Root Systems. **Advances in Agronomy**, v. 41, p. 91–145, 1 jan. 1987.

O cultivo do eucalipto no Brasil: histórico e perspectivas O eucalipto: origem e aplicações. p. 7–8, 1868.

OLIVEIRA, R. B. DE et al. **Comportamento do sistema radicular de Eucalyptus em três diferentes densidades do solo**. IX Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e V Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba. **Anais...**2006

OLIVEIRA, R. K. DE et al. Emeryy-based sustainability assessment of a loblolly pine (*Pinus taeda*) production system in southern Brazil. **Ecological Indicators**, v. 93, p. 481–489, 2018.

PIMENTEL, C. **Metabolismo de carbono na agricultura tropical**. 1. ed. Seropédica-RJ: EDUR: Editora Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1998.

PINTO, S. I. DO C. et al. Eficiência nutricional de clones de eucalipto na fase de mudas cultivados em solução nutritiva. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 523–533, 2011.

- POZZA, A. A. A. et al. Suprimento do silicato de cálcio e a eficiência nutricional de variedades de cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1705–1714, dez. 2009.
- PROTÁSIO, T. D. P. et al. Seleção de Clones de Eucalyptus para a produção de carvão vegetal e bioenergia por meio de técnicas univariadas e multivariadas. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 97, p. 15–28, 2013.
- RANDOLPH, J. J. **Free-Marginal Multirater Kappa (multirater κ free): An Alternative to Fleiss' Fixed-Marginal Multirater Kappa** Online Submission. 2005.
- RAPER, R. L. Agricultural traffic impacts on soil. **Journal of Terramechanics**, v. 42, n. 3–4, p. 259–280, 2005.
- REICHERT, J. M. et al. Ground-based harvesting operations of Pinus taeda affects structure and pore functioning of clay and sandy clay soils. **Geoderma**, v. 331, n. December 2017, p. 38–49, 2018.
- REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e Florestais: Identificação, Efeitos, Limites Críticos e Mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. (Eds.). . **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa- MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 5 p. 49–134, 2007.
- REZENDE, J. B.; PEREIRA, J. R.; BOTELHO, D. DE O. Expansão da cultura do eucalipto nos municípios mineiros e gestão territorial. **CERNE**, p. 1–7, jan. 2013.
- RICHART, A. et al. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 26, n. 3, p. 321–344, 2005.
- RICHART, A. et al. Compactação do Solo: Causas e Efeitos. **Soil and Tillage Research**, v. 143, n. 1, p. 1–11, 2016.
- ROSADO, A. M. et al. Seleção simultânea de clones de eucalipto de acordo com produtividade , estabilidade e adaptabilidade. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 47, n. 1, p. 964–971, 2012.
- ROSIM, C. C. Eficiência de utilização de nutrientes em híbridos interespecíficos de eucalipto. p. 40, 2013.

ROZANE, D. E. et al. Estoque de carbono e estabilidade de agregados de um latossolo vermelho distrófico, sob diferentes manejos. **Bioscience Journal**, v. 26, n. 1, p. 24–32, 2010.

SALEEM, M. et al. Impact of root system architecture on rhizosphere and root microbiome. **Rhizosphere**, v. 6, n. October 2017, p. 47–51, 2018.

SHAHGHOLI, G.; ABUALI, M. Measuring soil compaction and soil behavior under the tractor tire using strain transducer. **Journal of Terramechanics**, v. 59, p. 19–25, 2015.

SIDDIQUI, M. Y.; GLASS, A. D. M. Utilization index; a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal Plant Nutrition**, v. 4, p. 289–302, 1981.

SILVA, A. et al. Translocação de nutrientes em folhas de *Hevea brasiliensis* (clone) e em acículas de *Pinus oocarpa*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 3, p. 377–384, 2006.

SILVA, C. R. A. et al. Desenvolvimento biométrico de mudas de eucalipto sob diferentes lâminas de irrigação na fase de crescimento. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 84, p. 381–390, 2015.

SILVA, S. R. et al. Eficiência nutricional de potássio e crescimento de eucalipto influenciados pela compactação do solo. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, v. 26, n. 4, p. 1001–1010, 2002.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 1, p. 191–199, 2000.

SILVEIRA, R. L. V. DE A. et al. Sintomas de deficiência de macronutrientes e de boro em clones híbridos de *eucalyptus grandis* com *eucalyptus urophylla*. **CERNE**, v. 8, p. 107–116, 2002.

SIMIONI, F. J. et al. Forest biomass chain of production: Challenges of small-scale forest production in southern Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 889–898, 2018.

STAHL, J. et al. Produção de massa seca e eficiência nutricional de clones de *eucalyptus dunnii* e *eucalyptus benthamii* em função da adição de doses de fósforo ao

solo. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 2, p. 287–295, 2013.

STAT SOFT., I. **STATISTICA (data analysis software system)** Stat Soft Inc., , 2007. Disponível em: <www.statsoft.com>

SUZUKI, L. E. A. S. et al. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 8, p. 1159–1167, 2007.

SWIADER, J. M.; CHYAN, Y.; FREIJI, F. G. Genotypic differences in nitrate uptake and utilization efficiency in pumpkin hybrids 1. **Journal of Plant Nutrition**, v. 17, n. 10, p. 1687–1699, set. 1994.

SZATANIK-KLOC, A. et al. Soil compaction-induced changes of physicochemical properties of cereal roots. **Soil & Tillage Research**, v. 175, n. May 2017, p. 226–233, 2018.

TEIXEIRA, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; JÚNIOR, J. C. A. Crescimento e partição de matéria seca de mudas de eucalipto em função da adubação potássica e água do solo. **Revista Ceres**, v. 53, p. 662–671, 2006.

TOMAZ, M. A. et al. Eficiência de absorção, translocação e uso de cálcio, magnésio e enxofre por mudas enxertadas de *Coffea arabica*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, p. 885–892, 2003.

TOMAZ, M. A. et al. Absorção, translocação e utilização de zinco, Cobre e manganês for mudas enxertadas de *Coffea arabica*. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 30, n. 2, p. 377–384, 2006.

TORMENA, C. A. et al. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 4, p. 795–801, 2002.

TORRES, J. L. R. et al. Atributos Físicos De Um Latossolo Vermelho Cultivado Com Plantas De Cobertura, Em Semeadura Direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 428–437, 2015.

UNEP, U. N. E. P. A compilation of global environmental alert service Bulletins- Emerging environmental issues. **Division of Early Warning and Assessment**, p. 170, 1 dez. 2012.

- VALDÉS-RODRÍGUEZ, O. A. et al. Above- and below-ground biomass and allometry of *Moringa oleifera* and *Ricinus communis* grown in a compacted clayey soil. **Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants**, v. 241, n. January, p. 35–45, 2018.
- VELLINI, A. L. T. T. et al. Respostas fisiológicas de diferentes clones de eucalipto sob diferentes regimes de irrigação. **Revista Árvore**, v. 32, p. 651–663, 2008.
- WALTER, L. C.; ROSA, H. T.; STRECK, N. A. Mecanismos de aclimação das plantas à elevada concentração de CO². **Ciência Rural**, v. 45, n. 9, p. 1564–1571, 2015.
- WANG, T. et al. Soil organic carbon and total nitrogen stocks under different land uses in a hilly ecological restoration area of North China. **Soil and Tillage Research**, v. 163, p. 176–184, 2016.
- WATTS, C. W. et al. An assessment of the vulnerability of soil structure to destabilisation during tillage. Part I. A laboratory test. **Soil and Tillage Research**, v. 37, n. 2–3, p. 161–174, 1996.
- WHITE, P. J. et al. Genes for calcium-permeable channels in the plasma membrane of plant root cells. **Biochimica et Biophysica Acta - Biomembranes**, v. 1564, n. 2, p. 299–309, 2002.
- WILLIAMSON, J. R.; NEILSEN, W. A. The effect of soil compaction, profile disturbance and fertilizer application on the growth of eucalypt seedlings in two glasshouse studies. **Soil and Tillage Research**, v. 71, n. 2, p. 95–107, jan. 2003.
- WINCKLER, M. V. et al. Índice de eficiência de macronutrientes em espécies arbóreas – floresta ombrófila mista montana / Paraná. **Semina**, v. 27, n. 3, p. 321–332, 2006.
- YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communication in Soil Science and Plant Analyses.**, v. 19, p. 1467 – 1476, 1988.
- ZANI FILHO, J. et al. Caracterização e gênese do caráter coeso em latossolos amarelos e argissolos dos tabuleiros costeiros do estado de alagoas. **Soil and Tillage Research**, v. 143, n. 1, p. 14–33, 2016.

APÊNDICES

APÊNDICE A. Resumo da análise de variância para as variáveis, altura (H), diâmetro do coleto (Dc), taxa de crescimento absoluto da altura (TCAH) e diâmetro (TCADc), taxa de crescimento relativo de altura (TCRH) e diâmetro (TCRDc) de clones de eucalipto submetidos a diferentes graus de compactação

Fonte de variação	Grau de liberdade	Quadrado médio					
		H (cm)	Dc (mm)	TCAH (cm/dia ⁻¹)	TCADc (mm/dia ⁻¹)	TCRH (cm/dia ⁻¹)	TCDC (mm/dia ⁻¹)
Clone	15	143,4112**	2,4921**	0,0350**	0,0006**	0,0000**	0,0000**
Grau de compactação	2	95,4553 ^{ns}	6,2493**	0,0233 ^{ns}	0,0015**	0,0000 ^{ns}	0,0000**
Clone x Grau de Compactação	30	46,8162 ^{ns}	0,6153 ^{ns}	0,0114 ^{ns}	0,0002 ^{ns}	0,0000 ^{ns}	0,0000 ^{ns}
Resíduo	144	41,4160	0,5204	0,0101	0,0001	0,0000	0,0000

** significativo ao nível de 1% de probabilidade, * significativo ao nível de 5% de probabilidade e ns = não significativo para o teste F.

APÊNDICE B. Resumo da análise de variância para as variáveis, área foliar, diâmetro médio de raiz (Dmr), comprimento de raiz (Lr), área superficial de raiz (As) e volume de raiz (Vr) de clones de eucalipto submetidos a diferentes graus de compactação

Fonte de variação	Grau de liberdade	Quadrado médio				
		AFE (cm ² g ⁻¹)	Dmr (mm)	Lr (cm)	As (cm ²)	Vr (cm ³)
Clone	15	5643,1110**	0,0355**	266,5743**	1,6605**	0,0001**
Grau de compactação	2	17294,2996**	0,1543**	127,8332*	0,4186 ^{ns}	0,0002**
Clone x Grau de Compactação	30	3462,2131**	0,0270**	63,2721**	0,5590**	0,0000*
Resíduo	144	541,6129	0,0110	30,5090	0,2700	0,0000

** significativo ao nível de 1% de probabilidade, * significativo ao nível de 5% de probabilidade e ns = não significativo para o teste F.

APÊNDICE C. Resumo da análise de variância para as variáveis, matéria seca de folha (MSF), matéria seca de caule (MSC), matéria seca da parte aérea (MSPA), matéria seca de raiz fina (MSRF), matéria seca de raiz grossa (MSRG), matéria seca de raiz (MSR) e matéria seca total (MST) de clones de eucalipto submetidos a diferentes graus de compactação

Fonte de variação	Grau de liberdade	Quadrado médio						
		MSF (g)	MSC (g)	MSPA (g)	MSRF (g)	MSRG (g)	MSR (g)	MST (g)
Clone	15	8,7835**	9,4222**	28,6163**	0,3564**	0,3519**	1,1148**	32,1387**
Grau de compactação	2	56,5315**	54,4536**	202,4806**	0,8544**	0,0504 ^{ns}	0,5093 ^{ns}	222,4890**
Clone x Grau de Compactação	30	4,6721**	2,8560**	10,5704**	0,0813 ^{ns}	0,1343**	0,2188 ^{ns}	11,4544**
Resíduo	144	2,0783	1,5454	5,0277	0,1049	0,0443	0,1731	5,8031

** significativo ao nível de 1% de probabilidade, * significativo ao nível de 5% de probabilidade e ns = não significativo para o teste F.

APÊNDICE D. Resumo da análise de variância para as variáveis, partição para folha (PARTF), partição para caule (PARTC), partição para parte aérea (PARTPA), partição para raiz fina (PARTRF), partição para raiz grossa (PARTRG) de clones de eucalipto submetidos a diferentes graus de compactação

Fontes de variação	Grau de liberdade	Quadrado médio					
		PARTF (%)	PARTC (%)	PARTPA (%)	PARTRF (%)	PARTRG (%)	PARTR (%)
Clone	15	54,8166**	55,1090**	19,3474**	5,7978**	7,0787**	19,3474**
Grau de compactação	2	92,6702**	139,0540**	12,0942*	0,7420 ^{ns}	16,5286**	12,0942*
Clone x Grau de Compactação	30	26,3925**	27,1589**	4,4920*	1,2705 ^{ns}	3,3849**	4,4920*
Resíduo	144	13,6335	11,3978	2,8370	1,6577	1,0780	2,8370

** significativo ao nível de 1% de probabilidade, * significativo ao nível de 5% de probabilidade e ns = não significativo para o teste F.

APÊNDICE E. Resumo da análise de variância para as variáveis teor (g/kg) de nitrogênio (TN), fósforo (TP), potássio (TK), magnésio (TMg), cálcio (TCa), enxofre (TS), manganês (TMn), boro (TB), cobre (TCu) e zinco (TZn) de clones de eucalipto submetidos a diferentes graus de compactação.

Fontes de variação	Grau de liberdade	Quadrado médio									
		TN	TP	TK	TMg	TCa	TS	TMn	TB	TCu	TZn
Clone	15	21,0 ^{ns}	0,461 ^{**}	21,7*	1,452 ^{**}	86,7 ^{**}	0,655 ^{**}	19945 ^{**}	233*	219 ^{ns}	3034*
Grau de compactação	2	228,0 ^{**}	1,008 ^{**}	22,8 ^{ns}	0,190 ^{ns}	7,8 ^{ns}	0,230 ^{ns}	66447 ^{**}	2803 ^{**}	4761 ^{**}	18001 ^{**}
Clone x Grau de Compactação	30	21,5 ^{ns}	0,264*	12,5 ^{ns}	0,142 ^{ns}	28,6 ^{ns}	0,284 ^{ns}	3730 ^{ns}	228*	345*	2654*
Resíduo	144	18,4	0,148	12,2	0,189	25,1	0,189	5555	128	204	1637

** significativo ao nível de 1% de probabilidade, * significativo ao nível de 5% de probabilidade e ns = não significativo para o teste F.

APÊNDICE F. Resumo da análise de variância para as variáveis conteúdo (mg) de nitrogênio (CN), fósforo (CP), potássio (CK), magnésio (CMg), cálcio (CCa), enxofre (CS), manganês (CMn), boro (CB), cobre (CCu) e zinco (CZn) de clones de eucalipto submetidos a diferentes graus de compactação

Fontes de variação	Grau de liberdade	Quadrado médio									
		CN	CP	CK	CMg	CCa	CS	CMn	CB	CCu	CZn
Clone	15	4665 ^{**}	64,1 ^{**}	7353 ^{**}	161,2 ^{**}	11957 ^{**}	65,77 ^{**}	3,020965E+06 ^{**}	15338 ^{ns}	20551 ^{**}	62291 ^{**}
Grau de compactação	2	117 ^{ns}	578,7 ^{**}	27413 ^{**}	255,9 ^{**}	42419 ^{**}	192,75 ^{**}	1,862081E+07 ^{**}	25488 ^{ns}	168739 ^{**}	373275 ^{**}
Clone x Grau de Compactação	30	1703 ^{ns}	34,5 ^{**}	2024 ^{ns}	37,7 ^{ns}	3024 ^{ns}	27,66 ^{ns}	1,043992E+06 ^{ns}	12245 ^{ns}	14377 ^{**}	31248*
Resíduo	144	2126	17,6	1885	25,5	2420	19,44	7,03E+05	12679	5532	19536

** significativo ao nível de 1% de probabilidade, * significativo ao nível de 5% de probabilidade e ns = não significativo para o teste F.

APÊNDICE G. Resumo da análise de variância para as variáveis eficiência de aquisição (mg/g) de nitrogênio (EAN), fósforo (EAP), potássio (EAK), magnésio (EAMg), cálcio (EACa), enxofre (EAS), manganês (EAMn), boro (EAB), cobre (EACu) e zinco (EAZn) de clones de eucalipto submetidos a diferentes graus de compactação

Fontes de variação	Grau de liberdade	Quadrado médio									
		EAN	EAP	EAK	EAMg	EACa	EAS	EAMn	EAB	EACu	EAZn
Clone	15	1877,74**	35875,46**	38290**	29684,58**	38678*	15604,13**	358105**	106380**	13036**	308545**
Grau de compactação	2	3,00**	57,44**	7500**	32,58**	5357*	26,24**	743588**	13018**	14207**	374291**
Clone x Grau de Compactação	30	7,40**	170,06**	1913 ^{ns}	10,55 ^{ns}	3778 ^{ns}	21,60 ^{ns}	2954873**	17053*	40535**	97335*
Resíduo	144	1,105	33,58	2869	22,34	3090	19,30	350003	4900	11052	774533

** significativo ao nível de 1% de probabilidade, * significativo ao nível de 5% de probabilidade e ns = não significativo para o teste F.

APÊNDICE H. Resumo da análise de variância para as variáveis eficiência de translocação (mg/mg) de nitrogênio (ETN), fósforo (ETP), potássio (ETK), magnésio (ETMg), cálcio (ETCa), enxofre (ETS), manganês (ETMn), boro (ETB), cobre (ETCu) e zinco (ETZn) de clones de eucalipto submetidos a diferentes graus de compactação.

Fontes de variação	Grau de liberdade	Quadrado médio									
		ETN	ETP	ETK	ETMg	ETCa	ETS	ETMn	ETB	ETCu	ETZn
Clone	15	0,0019**	0,0005**	0,0002**	0,0013**	0,0021**	0,0035**	0,0003**	0,0117**	0,0068 ^{ns}	0,01562*
Grau de compactação	2	0,0023**	0,0003 ^{ns}	0,0000 ^{ns}	0,0003**	0,0100**	0,0057**	0,0004 ^{ns}	0,0315**	0,0344**	0,044**
Clone x Grau de Compactação	30	0,0007 ^{ns}	0,0001 ^{ns}	0,0001**	0,0007**	0,0007 ^{ns}	0,0013 ^{ns}	0,0002 ^{ns}	0,0051 ^{ns}	0,0070*	0,012**
Resíduo	144	0,0005	0,0001	0,0000	0,0005	0,0006	0,0010	0,0001	0,0034	0,0042	0,00784

** significativo ao nível de 1% de probabilidade, * significativo ao nível de 5% de probabilidade e ns = não significativo para o teste F.