

Limites de compactação do solo para *Ilex paraguariensis*

Soil compaction limits for *Ilex paraguariensis*

Límites de compactación del suelo para *Ilex paraguariensis*

Recebido: 19/03/2020 | Revisado: 20/03/2020 | Aceito:25/03/2020 | Publicado: 25/03/2020

Jhonatan Spliethoff

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4618-0305>

Universidade Estadual do Centro Oeste, Brasil

E-mail: jhonatanspliethoff@hotmail.com

Cristiano André Pott

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4630-2659>

Universidade Estadual do Centro Oeste, Brasil

E-mail: cpott@unicentro.br

Leandro Rampim

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8300-7424>

Universidade Estadual do Centro Oeste, Brasil

E-mail: rampimleandro@yahoo.com.br

Luciano Farinha Watzlawick

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9944-7408>

Universidade Estadual do Centro Oeste, Brasil

E-mail: farinha@unicentro.br

Sidnei Osmar Jadoski

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6064-2767>

Universidade Estadual do Centro Oeste, Brasil

E-mail: sjadoski@unicentro.br

Resumo

O objetivo do trabalho foi verificar o efeito de diferentes graus de compactação do solo no desenvolvimento cultura da erva-mate. O estudo foi conduzido em casa de vegetação da UNICENTRO em Guarapuava, PR. Para a implantação da cultura, foram confeccionados vasos com tubos de PVC de 0,15 m de diâmetro, subdivididos em anéis. O anel superior e o inferior apresentaram espessura de 0,20 m e foram submetidos ao grau de compactação (GC) de 75%, enquanto o anel intermediário apresentou espessura de 0,05 m, e recebeu os GC de

75, 80, 85, 90 e 95%. Verificou-se efeito negativo do crescimento das plantas de erva mate em função da compactação do solo, sendo o grau de compactação de 85% mais favorável para o desenvolvimento das plantas de erva mate.

Palavras-chave: Densidade do solo; Grau de compactação do solo; Qualidade física do solo.

Abstract

The objective of this work was to verify the effect of different soil compaction degree on the development of *Ilex paraguariensis*. The study was conducted in a greenhouse at UNICENTRO in Guarapuava, PR. For the culture implantation, pots of 0.15 m diameter were made with PVC tubes, subdivided into rings. The upper and lower ring presented thickness of 0.20 m and were subjected to soil compaction degree (GC) of 75%, while the intermediate ring presented thickness of 0.05 m, and received GC of 75, 80, 85, 90 and 95%. It was verified a negative effect of the mate herb growth due to soil compaction, being the soil compaction degree of 85% more favorable for the development of the *Ilex paraguariensis*.

Keywords: Soil bulk density; Soil compaction degree; Soil physic quality.

Resumen

El objetivo de este trabajo fue verificar el efecto de diferentes grados de compactación del suelo en el desarrollo de layerba mate. El estudio se realizó en un invernadero en UNICENTRO en Guarapuava, PR. Para la implantación del cultivo, se hicieron macetas con tubos de PVC de 0,15 mm de diámetro, divididos en anillos. El anillo superior e inferior tenía un grosor de 0,20 m y se sometieron a un grado de compactación (GC) del 75%, mientras que el anillo intermedio tenía un grosor de 0,05 m y recibió un GC del 75, 80, 85, 90 y 95%. Hubo un efecto negativo del crecimiento de las plantas de mate debido a la compactación del suelo, siendo el grado de compactación 85% más favorable para el desarrollo de las plantas de mate.

Palabras clave: Densidad del suelo; Densidad relativa; Calidad física del suelo.

1. Introdução

A erva-mate, após beneficiada, é consumida por milhões de pessoas na forma de chá, comumente chamado de chimarrão (Oliveira & Waquil, 2015). Além disso, esta cultura é utilizada na fabricação de diversos produtos cosméticos e farmacêuticos, já que possui atividades antioxidantes e anti-inflamatórias (Fayad et al., 2020; Prado Martin et al., 2013; Ribeiro et al., 2019), na alimentação animal (Migotto, 2015; Santos et al., 2019) e, além disso,

os resíduos dessa cultura ainda podem ser utilizados como matéria prima na indústria madeireira na fabricação de lâminas de MDP (Souza et al., 2019).

No entanto, o atual sistema agrícola de produção é marcado por intenso tráfego de máquinas e equipamentos, seja no plantio ou na colheita do produto e, em alguns casos, adiciona-se o pisoteio animal. A pressão mecânica causada por máquinas agrícolas sob o solo podem ocasionar sérios problemas de compactação do solo e redução na produção destas lavouras (Botta et al., 2016; Tuzzin de Moraes et al., 2016). De acordo com pesquisa realizada por Marques et al. (2019), as caívas (áreas de exploração florestal com criação de rebanhos animais) são as unidades da paisagem de exploração de erva mate mais comum, ocupando 66% da área cultivada do presente estudo. Diversos estudos evidenciam que o pastejo intenso de animais provoca a compactação do solo, aumentando a densidade do solo e diminuindo a macroporosidade e infiltração de água (Collares, Reinert, Reichert & Kaiser, 2011; Flores et al., 2007; Lanzasova et al., 2007).

Solos compactados apresentam maior densidade e redução da porosidade e infiltração de água (Mazurana, Levien, Müller & Conte, 2011). A densidade do solo é afetada por pressões que alteram a estrutura do solo e o arranjo dos poros, que influenciam a retenção de água pelo solo, a aeração, a disponibilidade de água para as plantas e a resistência do solo à penetração (Rienzi, Maggi, Scroffa, Lopez & Cabanella, 2016). Além disso, a compactação do solo tem efeito negativo sobre a fauna do solo (Orzech & Załuski, 2020).

Reichert et al. (2009) definiram limites dos atributos físicos para diversas culturas, destacando-se especialmente a densidade do solo, a densidade relativa, a macroporosidade e a resistência à penetração. Devido à dificuldade de se relacionar a produtividade das culturas com esses atributos físicos no campo, ensaios em casa de vegetação têm sido conduzidos utilizando-se tubos de PVC gerando uma camada compactada para simular a compactação do solo que ocorre no campo (Foloni, Calonego & Lima, 2003; Gonçalves et al., 2006; Müller, Ceccon & Rosolem, 2001; Silva, Alves, Mesquita & Leandro, 2012).

De acordo com Resende et al. (2000), a erva mate não é exigente em fertilidade, porém prefere solos permeáveis e com umidade adequada. Esse mesmo autor relata que vários atributos físicos do solo (densidade do solo, porosidade, textura, macroporosidade, estrutura, etc.) influenciam no desenvolvimento da erva mate. Considerando essa rusticidade da erva mate para a fertilidade do solo, muitos produtores e empresas implantam a cultura em áreas de reflorestamento, após a retirada do produto madeireiro de *Pinus* spp. e *Eucalyptus* spp. Destaca-se que em função das grandes máquinas utilizadas para a retirada desses produtos madeireiros, é muito comum encontrar problemas de ordem física do solo nessas áreas

(Andrade et al., 2017; Fernandes & Souza, 2003; Lopes, Oliveira, Rodrigues & Drinko, 2015; Szymczak et al., 2014). No entanto, ainda não se conhece os limites críticos de densidade do solo para o desenvolvimento da erva mate, sendo pertinente realizar esse estudo para verificar o impacto desses sistemas utilizados na produção dessa cultura.

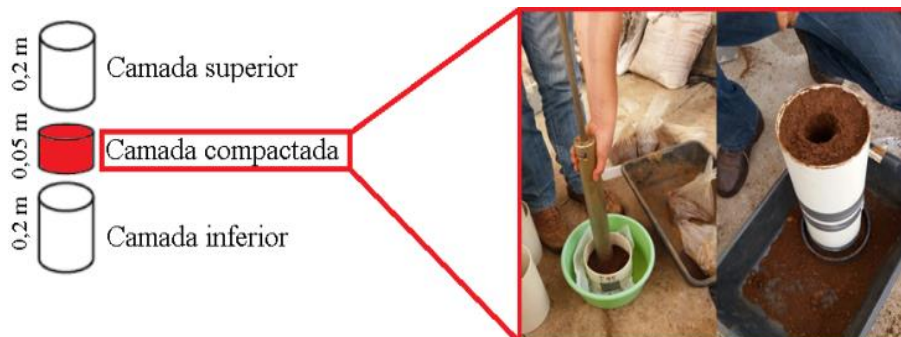
Nesse sentido, o objetivo desse trabalho foi avaliar a influência da compactação do solo no desenvolvimento e produtividade de *Ilex paraguariensis*.

2. Metodologia

O presente trabalho é uma pesquisa experimental qualitativa (Pereira, Shitsuka, Parreira, & Shitsuka, 2018) que foi conduzida em casa de vegetação do Grupo de Pesquisas Florestais e Forrageiras do Departamento de Agronomia da UNICENTRO, localizado no Campus Cedeteg em Guarapuava, município que se encontra na porção Centro-Sul do Estado do Paraná. A altitude da região onde foi conduzido o experimento é de aproximadamente 1041 metros mar e as coordenadas geográficas são: 25° 23'26" S e 51° 27'15" W.

Foi coletado solo na camada de 0-0,20 m de uma área classificada como Latossolo Bruno de textura muito argilosa(H. dos Santos et al., 2018). O delineamento utilizado foi inteiramente casualizado, com 5 tratamentos de grau de compactação do solo e 5 repetições. Foram confeccionados vasos para cultivo da erva mate com tubos de PVC de 0,15 m de diâmetro. Foram montadas colunas com três anéis de PVC sobrepostos (Figura 1). Os tubos das diferentes camadas foram unidos com fita adesiva.

Figura 1. Unidade experimental com as subdivisões da coluna de PVC, compactação do anel de 0,05 m e montagem completa do vaso.



Fonte: Autores.

Os tratamentos consistiram em diferentes níveis de compactação no anel intermediário da unidade experimental, sendo definidos os níveis de 75, 80, 85, 90 e 95% de grau de compactação (GC). O GC foi definido pela relação da densidade do solo pela densidade máxima obtida pelo ensaio de Proctor. Portanto, após coleta do solo, realizou-se o ensaio de Proctor (Klein, Madalosso, & Baseggio, 2013) para definir as densidades do solo nos diferentes tratamentos. Após, o solo correspondente a cada compactação, foi separado e pesado para gerar a camada compactada. Para tanto foi utilizado o soquete do Proctor, até que toda a quantidade de solo foi colocada no volume respectivo da camada compactada.

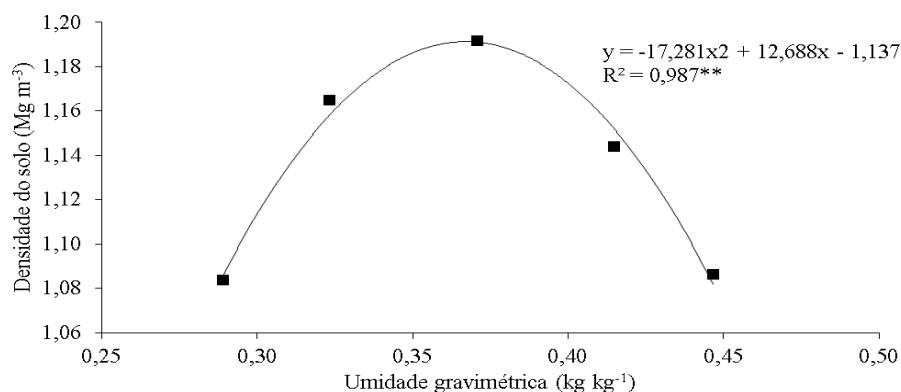
Após a confecção dos vasos e a compactação das camadas compactadas, foram plantadas as mudas de erva mate com altura de 0,15-0,20 m. As plantas foram cultivadas até 270 dias (9 meses) período em que mensalmente foi avaliado o incremento de altura das plantas. Aos 270 dias após o plantio foi avaliado a massa verde e a massa seca da parte aérea e também foram avaliados a massa verde e seca das raízes nas três camadas de solo (superior, compactada e inferior).

Os resultados foram analisados estatisticamente por meio de análise de variância e os tratamentos quantitativos foram analisados por meio de análise de regressão. Foi utilizado o software ASSISTAT (Silva & Azevedo, 2016) para auxílio nos cálculos estatísticos.

3. Resultados e discussão

Inicialmente realizou-se o ensaio de Proctor com o solo estudado para determinação do Grau de Compactação máximo. Na Figura 2 é apresentada a relação da umidade gravimétrica com a densidade do solo obtida com o ensaio de Proctor.

Figura 2. Resultados do ensaio de Proctor realizado com o solo de estudo.

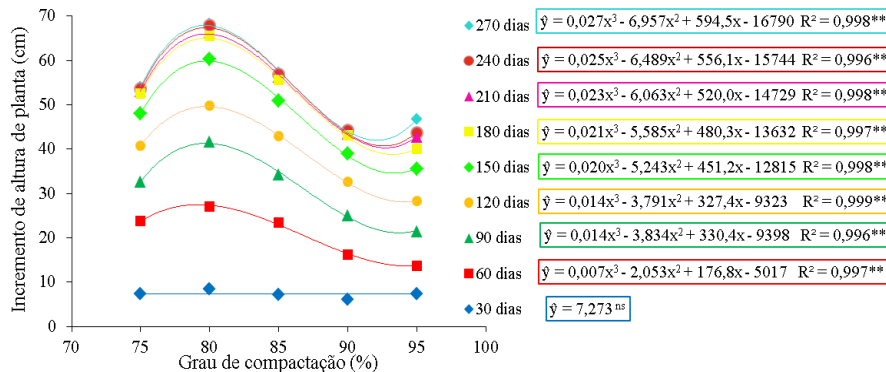


**Regressão significativa ($p < 0,01$). Fonte: Autores.

Com base na equação representada na Figura 2, verifica-se que a densidade máxima do solo estudado foi de $1,19 \text{ Mg m}^{-3}$ na umidade gravimétrica de $0,37 \text{ kg kg}^{-1}$.

Na figura 3, é apresentado o incremento de altura da erva mate em função do grau de compactação do solo.

Figura 3. Incremento de altura em função do grau de compactação do solo aos 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240 e 270 dias após o transplante das mudas de erva mate.

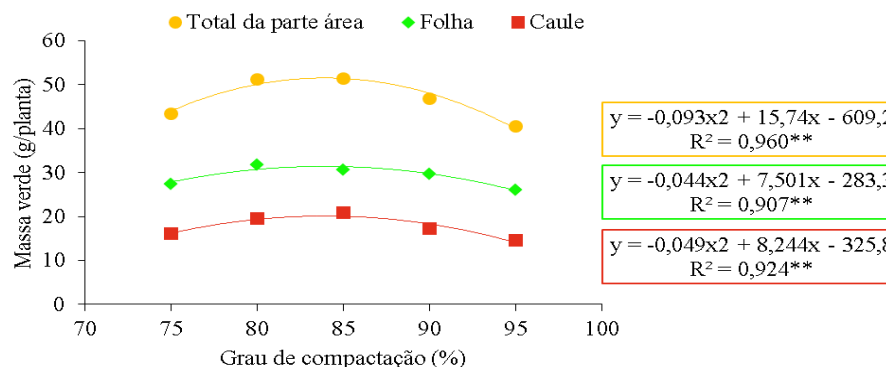


*Regressão significativa ($p < 0,05$). **Regressão significativa ($p < 0,01$).^{ns} não significativo ($p > 0,05$). Fonte: Autores.

Observa-se que, conforme Figura 3, houve efeito estatístico com resposta à equação de terceiro grau do incremento de altura em função do grau de compactação dos 60 até os 270 dias após o transplante. Além disso, verifica-se que o maior incremento de altura de planta foi para o grau de compactação de 80% da compactação máxima.

A produção de massa verde da parte aérea (folhas, caule e total) em função do grau de compactação também apresentou efeito significativo (Figura 4).

Figura 4. Relação da produção de massa verde da parte aérea das plantas de erva mate em função do grau de compactação do solo.

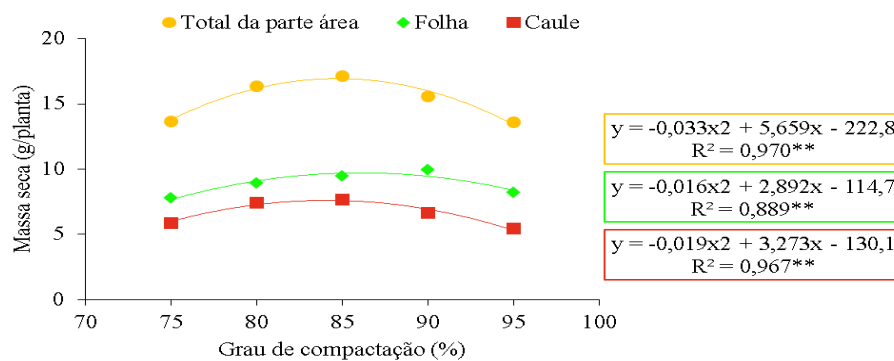


**Regressão significativa ($p < 0,01$). Fonte: Autores.

Observa-se que a massa verde de erva mate apresentou efeito quadrático para folha, caule e total da parte aérea. Em ambos os casos, a maior massa verde produzida foi no grau de compactação de 85%.

Na Figura 5 são apresentados os resultados de produção de massa seca da parte aérea da erva mate.

Figura 5. Relação da produção de massa seca da parte aérea das plantas de erva mate em função do grau de compactação do solo.

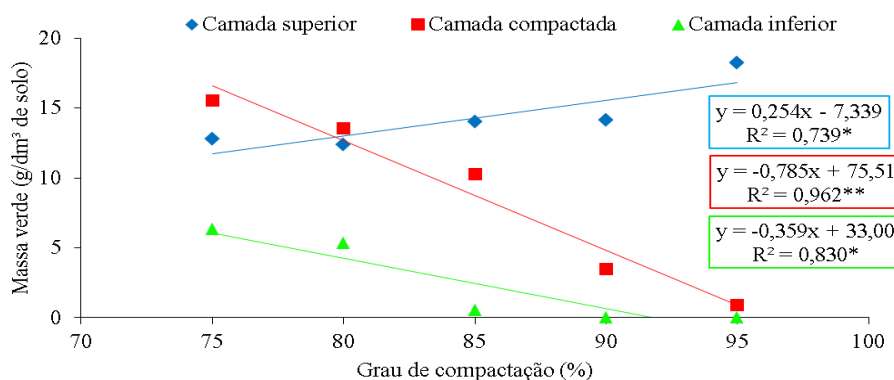


**Regressão significativa ($p < 0,01$). Fonte: Autores.

A produção de massa seca de folhas, caule e parte aérea total, também apresentaram efeito quadrático. O grau de compactação de 85% apresentou os maiores valores de massa seca para todas as variáveis.

A produção de massa verde de raízes foi distinta para as camadas avaliadas e para os intervalos de compactação estudados (Figura 6).

Figura 6. Relação da produção de massa verde de raízes de erva mate em função do grau de compactação do solo.

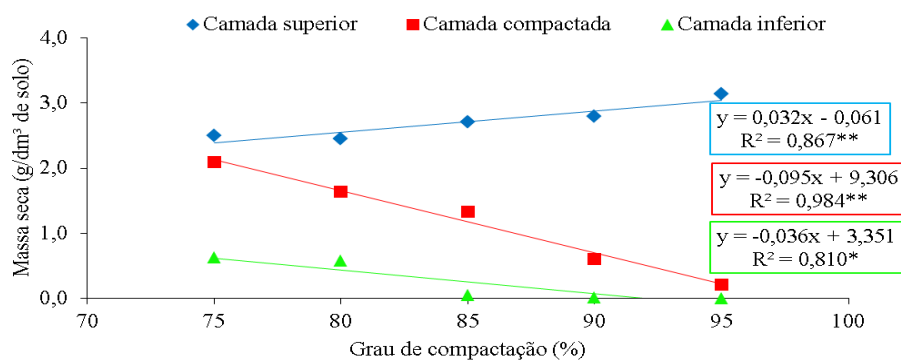


*Regressão significativa ($p < 0,05$). **Regressão significativa ($p < 0,01$). Fonte: Autores.

Observa-se que houve maior produção de massa verde de raízes em função do aumento do grau de compactação na camada superior. Isto ocorreu porque, com o aumento da dificuldade das raízes em penetrarem no solo pelo aumento da compactação, a distribuição das raízes foi direcionada para a camada superior. Nas demais camadas, camada compactada e inferior, observa-se efeito linear decrescente para a massa verde de raízes com o aumento do grau de compactação.

A massa seca de raízes apresentou comportamento semelhante ao da massa verde de raízes (Figura 7).

Figura 7. Relação da produção de massa seca de raízes de erva mate em função do grau de compactação do solo.



*Regressão significativa ($p < 0,05$). **Regressão significativa ($p < 0,01$). Fonte: Autores.

A compactação restringe o crescimento de raízes em profundidade, conforme a figura 7. O decréscimo de raízes em profundidade é linear com o aumento da compactação e as raízes tendem a se distribuir no terço superior, deixando a cultura propensa a estresse hídrico e perdas por estiagem.

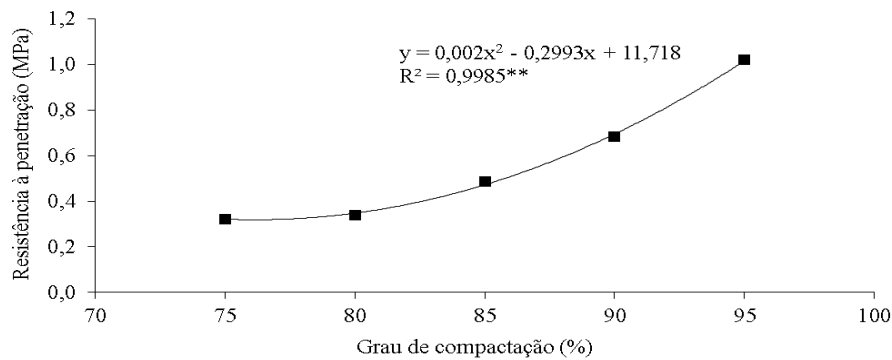
De forma geral, a estratégia de plantio adotada por produtores de erva mate contempla, geralmente, a abertura de cova superficial que, em casos de compactação, deve gerar problemas no estabelecimento e por consequência, aumento no tempo de retorno do investimento.

Assim, seria ideal considerar 85% como limite ótimo de compactação para a erva mate, pois neste valor obtiveram-se as maiores produções de parte aérea (folha, caule e total) e o crescimento de raízes não foi tão afetado.

Pensando em metodologias com praticidade no campo, a resistência à penetração talvez seja umas das mais simples e econômicas. Por isso, com base nos graus de

compactação estudados, elaborou-se a correlação entre a resistência à penetração e o grau de compactação (Figura 8).

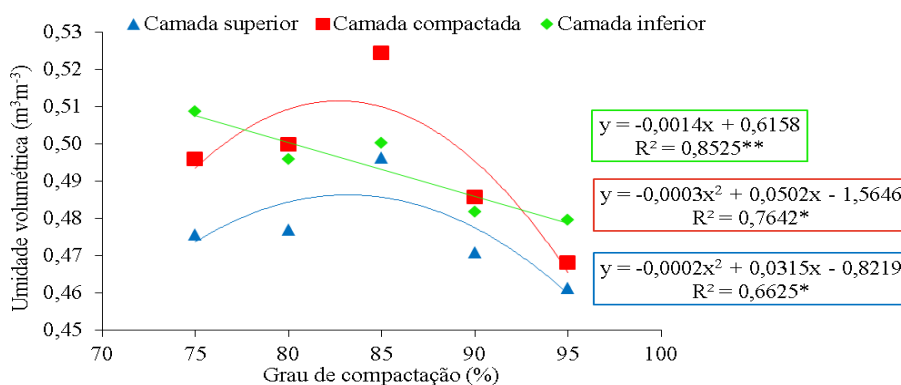
Figura 8. Resistência à penetração em diferentes graus de compactação do solo.



**Regressão significativa ($p < 0,01$). Fonte: Autores.

O aumento do grau de compactação implica no aumento da resistência à penetração de forma quadrática. Ao considerar o grau de compactação de 85%, que como visto anteriormente apresentou as melhores produções, segundo a equação da figura 8, o valor de 0,73 MPa seria considerado limitante para a produção de erva mate na umidade de $0,53 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Figura 9).

Figura 9. Umidade volumétrica em diferentes graus de compactação do solo realizada no momento da avaliação da resistência à penetração.



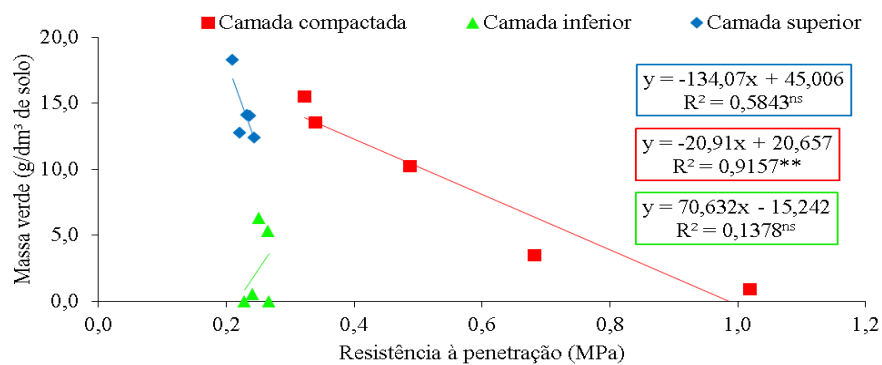
*Regressão significativa ($p < 0,05$). **Regressão significativa ($p < 0,01$). Fonte: Autores.

Na Figura 9, observa-se que a maior umidade do solo para as camadas compactadas apresentou comportamento crescente até 85% decaindo após esse intervalo. Indicando mais

uma vez, que este valor de 85% seria o intervalo mais adequado para a erva mate, pois apresenta o maior volume de água para a cultura em todas as camadas estudadas.

Ao correlacionar a massa verde de raízes com a resistência à penetração, verifica-se efeito linear significativo (Figura 10).

Figura 10. Massa verde de raízes em função da resistência à penetração do solo.

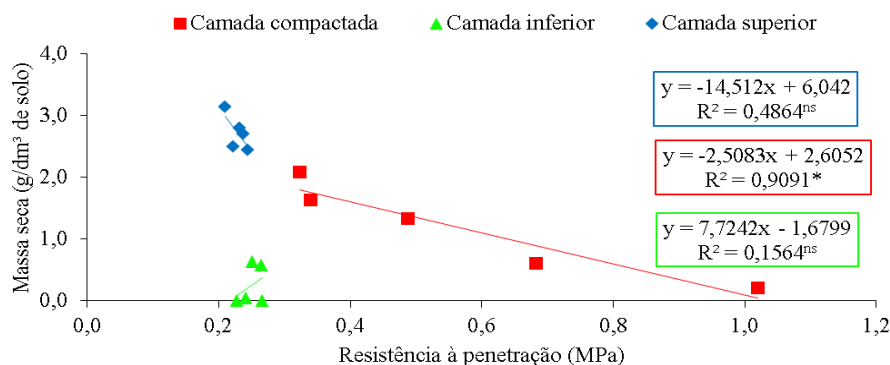


**Regressão significativa ($p < 0,01$).^{ns} não significativo ($p > 0,05$). Fonte: Autores.

A massa verde de raízes reduz significativamente com o aumento da resistência à penetração na camada compactada. Nas demais camadas, não houve interação entre a massa verde de raízes e a resistência à penetração.

A massa seca de raízes apresentou comportamento semelhante a massa verde de raízes com relação a resistência à penetração (Figura 11).

Figura 11. Massa seca de raízes em função da resistência à penetração do solo.



*Regressão significativa ($p < 0,05$).^{ns} não significativo ($p > 0,05$). Fonte: Autores.

O aumento da resistência à penetração, ocasionado pelo aumento da compactação, reduz significativamente de forma linear a massa seca de raízes, conforme figura 11. Nesse

sentido, a adoção da resistência à penetração como metodologia para determinar o impacto da compactação no crescimento de raízes é uma alternativa eficaz, mas que necessita dos valores de umidade do solo para não se cometer equívocos na interpretação dos resultados.

Como observado nos resultados acima, a compactação excessiva reduz o volume de solo explorado e afeta a produção de folhas e caules da erva mate. Isso ocorre porque nesta camada compactada há um impedimento físico que afeta o crescimento das raízes das plantas. Bergamin et al. (2010) estudando diferentes níveis de compactação em Latossolo Vermelho, observou que a compactação afetou negativamente o sistema radicular da cultura do milho, reduzindo até 86% do comprimento médio de raízes em plantio direto com tráfego intenso. Resultados semelhantes foram encontrados por Ribeiro et al. (2010) estudando a cultura da soja e do eucalipto em Latossolo Vermelho (densidade de $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$) e Latossolo Vermelho Amarelo (densidade de $1,70 \text{ Mg m}^{-3}$). Neste trabalho, os autores verificaram redução de 50% da parte área da soja no Latossolo Vermelho e 26% no Latossolo Vermelho Amarelo e para o eucalipto, esses valores foram de 52 e 32 %, respectivamente.

Diversos autores destacam o potencial da compactação em reduzir a produtividade de culturas anuais e perenes (Espessato et al., 2017; Grzesiak et al., 2016; Kormanek, Głab, Banach & Szewczyk, 2015). Em mudas de carvalho sésseis, por exemplo, Kormanek et al. (2015) verificaram que mudanças na densidade do solo na faixa de $0,81-1,32 \text{ Mg m}^{-3}$ afetaram significativamente o desenvolvimento do sistema radicular, a altura total e a massa seca das mudas de *Quercus petraea Liebl.*

No presente estudo, grau de compactação acima de 85 % reduziu a produção da parte área da erva mate, sendo que para essa cultura, tanto o caule quanto a folha são produtos industriais. Suzuki et al., (2007), ao estudarem o grau de compactação ótimo para a cultura da soja em Latossolo, verificaram que a melhor resposta da cultura foi com 86% de compactação. Para a cana de açúcar, Carolino de Sá et al. (2016) encontraram como limite crítico ao crescimento de raízes próximo a 88%.

A erva mate tem conquistado importância cada vez maior na indústria e na alimentação humana, haja vista que apresenta propriedades medicinais e benéficas aos humanos. Em revisão sistemática com metanálise, Luís et al. (2019) destacaram a capacidade anti-obesidade da erva mate em pacientes, observando redução do peso corporal, índice de massa corporal e circunferência da cintura dos pacientes. Também é relatado que a ingestão diária de erva mate reduz o colesterol total e reduz triglicérido (Avena et al., 2019). E como já destacado anteriormente, a erva mate possui diversas outras funções metabólicas e farmacêuticas (Fayad et al., 2020; Prado Martin et al., 2013; Ribeiro et al., 2019). Trabalhos

como este apontam os benefícios desta cultura nas mais variadas áreas do conhecimento e prospectam um aumento no consumo desta cultura.

Nesse sentido, é importante conhecer as limitações desta cultura, principalmente quando trata-se de manejo da cultura em solos compactados, já que este é um dos grandes problemas que a agricultura enfrenta (Hamza & Anderson, 2005; Kozłowski, 1999; Nawaz, Bourrié & Trolard, 2013). Portanto, saber que o grau de compactação ótimo para a erva mate é de 85%, faz com que técnicos e produtores tornem-se mais seguros nas tomadas de decisões de implantação, condução e manejo da cultura, tomado as devidas providências para que a cultura não sofra com a compactação demasiada do solo.

4. Considerações finais

O presente artigo traz contribuições inéditas sobre os limites de compactação para erva mate (*Ilex paraguariensis*). O conhecimento desses limites implica em toda a cadeia produtiva da erva mate, desde a implantação até seu processamento, contribuindo diretamente os produtores e processadores de erva mate.

Verificou-se efeito negativo do crescimento das plantas de erva mate em função da compactação do solo, sendo o grau de compactação de 85% mais favorável para o desenvolvimento da parte aérea das plantas de erva mate.

A massa de raiz decresce de forma linear na camada compactada a medida que aumenta-se o grau de compactação.

A erva mate tem conquistado grande importância nos últimos anos. Entretanto, as recomendações de manejo não seguem a mesma tendência e encontram-se defasadas na maior parte das vezes, pois muito pouco se sabe das interações e resposta da cultura aos diferentes tipos de solos e suas características físicas e químicas, sistemas de produção e condições ambientais.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

- Andrade, M. L. de C., Tassinari, D., Dias Junior, M. de S., Martins, R. P., Rocha, W. W., & Souza, Z. R. de. (2017). Soil compaction caused by harvest and logging operations in eucalyptus forests in coarse-textured soils from northeastern Brazil. *Ciênc. agrotec.*, 191–200.
- Avena, V., Messina, D., Corte, C., Mussi, J., Saez, A., Boarelli, P., & Elizalde, R. P. (2019). Association between consumption of yerba mate and lipid profile in overweight women. *Nutricion Hospitalaria*, 36(6), 1300–1306. <https://doi.org/10.20960/nh.02599>
- Bergamin, A. C., Vitorino, A. C. T., Franchini, J. C., de Souza, C. M. A., & de Souza, F. R. (2010). Induced compaction of a rhodic Acrustox as related to maize root growth. *Brazilian Society of Soil Science*, 34(3), 681–691. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832010000300009>
- Botta, G. F., Tolón-Becerra, A., Rivero, D., Laureda, D., Ramírez-Roman, M., Lastra-Bravo, X., ... Martiren, V. (2016). Compactación produced by combine harvest traffic: Effect on soil and soybean (*Glycine max* L.) yields under direct sowing in Argentinean Pampas. *European Journal of Agronomy*, 74, 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.12.011>
- Carolino de Sá, M. A., Junior, J. de D. G. dos S., Franz, C. A. B., & Rein, T. A. (2016). Soil physical quality and sugarcane yield with the use of inter-row chiseling. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 51(9), 1610–1622. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900061>
- Collares, G. L., Reinert, D. J., Reichert, J. M., & Kaiser, D. R. (2011). Surface compaction of oxisols with crops- dairy cattle production in northwest of Rio Grande do Sul, Brazil. *Ciencia Rural*, 41(2), 246–250. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782011000200011>
- Espessato, R. R., Leite, F., Guerreiro, J. C., Quiqui, E. M. Del, Azevedo, A. P. de, & Aleixo, E. V. (2017). Soybean development as a function of traffic of tractor with radial tires. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21(10), 726–730. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n10p726-730>
- Fayad, E., El-Sawalhi, S., Azizi, L., Beyrouthy, M., & Abdel-Massih, R. M. (2020). Yerba

Mate (*Ilex paraguariensis*) a potential food antibacterial agent and combination assays with different classes of antibiotics. *LWT*, 125, 109267. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109267>

Fernandes, H. C., & Souza, A. P. de. (2003). Compaction of a dark-red latosol caused by forwarder traffic. *Revista Árvore*, 27(3), 279–284. <https://doi.org/10.1590/s0100-67622003000300002>

Flores, J. P. C., Anghinoni, I., Cassol, L. C., De Faceio Carvalho, P. C., Dal Belo Leite, J. G., & Fraga, T. I. (2007). Soil physical attributes and soybean yield in an integrated livestock-crop system with different pasture heights in no-tillage. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 31(4), 771–780. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832007000400017>

Foloni, J. S. S., Calonego, J. C., & Lima, S. L. De. (2003). Effect of soil compaction on shoot and root growth of maize cultivars. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 38(8), 947–953. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2003000800007>

Gonçalves, W. G., Jimenez, R. L., Araújo Filho, J. V. De, Assis, R. L. De, Silva, G. P., & Pires, F. R. (2006). Root system of cover crops under soil compaction. *Engenharia Agrícola*, 26(1), 67–75. <https://doi.org/10.1590/s0100-69162006000100008>

Grzesiak, M. T., Janowiak, F., Szczyrek, P., Kaczanowska, K., Ostrowska, A., Rut, G., ... Grzesiak, S. (2016). Impact of soil compaction stress combined with drought or waterlogging on physiological and biochemical markers in two maize hybrids. *Acta Physiologiae Plantarum*, 38(5), 109. <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2128-4>

Hamza, M. A., & Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, 82(2), 121–145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>

Klein, V. A., Madalosso, T., & Baseggio, M. (2013). Proctor compaction test – methodology analysis and worksheet to calculate the maximum soil density and optimum moisture content. *Journal of Agroveterinary Sciences*, 12(2), 199–203. Recuperado de <http://www.revistas.udesc.br/index.php/agroveterinaria/article/view/5214/3391>

Kormanek, M., Głab, T., Banach, J., & Szewczyk, G. (2015). Effects of soil bulk density on sessile oak *Quercus petraea* Liebl. seedlings. *European Journal of Forest Research*, 134(6), 969–979. <https://doi.org/10.1007/s10342-015-0902-2>

Kozłowski, T. T. (1999). Soil compaction and growth of woody plants. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 14(6), 596–619. <https://doi.org/10.1080/02827589908540825>

Lanzanova, M. E., Da Silveira Nicoloso, R., Lovato, T., Eltz, F. L. F., Amado, T. J. C., & Reinert, D. J. (2007). Soil physical attributes in integrated cattle raising-crop production system under no-tillage. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 31(5), 1131–1140. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832007000500028>

Lopes, E. D. S., Oliveira, D. De, Rodrigues, C. K., & Drinko, C. H. (2015). Compaction of a Soil Subjected to the Traffic of Harvesters and Forwarders During Wood Harvesting. *Floresta e Ambiente*, 22(2), 223–230. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.046413>

Luís, Â. F. S., Domingues, F. da C., & Amaral, L. M. J. P. (2019). The anti-obesity potential of *ilex paraguariensis*: Results from a meta-analysis. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 55. <https://doi.org/10.1590/s2175-97902019000217615>

Marques, A. D. C., Reis, M. S. Dos, & Denardin, V. F. (2019). Yerba mate landscapes: forest use and socio-environmental conservation. *Ambiente & Sociedade*, 22. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc201702822vu201913ao>

Mazurana, M., Levien, R., Müller, J., & Conte, O. (2011). Soil tillage systems: changes in soil structure and crop response. *Brazilian Society of Soil Science*, 35(4), 1197–1206. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000400013>

Migotto, D. L. (2015). *Desempenho e digestibilidade de nutrientes para frangos de corte alimentados com rações contendo extrato de erva mate (Ilex paraguariensis)*. Universidade de Brasília, Brasília. <https://doi.org/10.26512/2015.06.D.18708>

Müller, M. M. L., Ceccon, G., & Rosolem, C. A. (2001). Influence of subsurface soil compaction on the growth of the aerial parts and roots of winter green manure species.

Revista Brasileira de Ciência do Solo, 25(3), 531–538. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832001000300002>

Nawaz, M. F., Bourrié, G., & Trolard, F. (2013). Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(2), 291–309. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>

Oliveira, S. V. De, & Waquil, P. D. (2015). Dynamics of production and commercialization of yerba mate in Rio Grande do Sul, Brazil. *Ciencia Rural*, 45(4), 750–756. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20140276>

Orzech, K., & Załuski, D. (2020). Effect of soil compaction and different soil tillage systems on chemical properties of soil and presence of earthworms in winter oilseed rape fields COSMOS-Camelina & crambe Oil crops as Sources for Medium-chain Oils for Specialty oleochemicals. *Article in Journal of Elementology*. <https://doi.org/10.5601/jelem.2019.24.2.1874>

Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J., & Shitsuka, R. (2018). *Metodologia da pesquisa científica* (1^o ed, Vol. 1). Santa Maria, RS: UFSM, NTE.

Prado Martin, J. G., Porto, E., de Alencar, S. M., da Glória, E. M., Corrêa, C. B., & Ribeiro Cabral, I. S. (2013). Actividad antimicrobiana de la yerba mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) contra patógenos alimentarios. *Revista Argentina de Microbiologia*, 45(2), 93–98. [https://doi.org/10.1016/S0325-7541\(13\)70006-3](https://doi.org/10.1016/S0325-7541(13)70006-3)

Reichert, J. M., Suzuki, L. E. A. S., Reinert, D. J., Horn, R., & Håkansson, I. (2009). Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research*, 102(2), 242–254. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2008.07.002>

Resende, M. D. V. de;, Sturion, J. A. ., Carvalho, A. P. de;, Simeão, R. M. ., & Fernandes, J. S. . (2000). *Programa de Melhoramento da Erva Mate coordenado pela Embrapa: resultados da avaliação genética de populações, progênes, indivíduos e clones*. (C. Técnica, Org.), Embrapa Florestas. Colombo: Embrapa Florestas.

Ribeiro, M. A. V., Novais, R. F., Faquin, V., Ferreira, M. M., Furtini Neto, A. E., Lima, J. M. de, & Villani, E. M. de A. (2010). Soybean and eucalyptus response to increased soil density and phosphorus doses. *Brazilian Society of Soil Science*, 34(4), 1157–1164. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000400015>

Ribeiro, V. R., Maciel, G. M., Fachi, M. M., Pontarolo, R., Fernandes, I. de A. A., Stafussa, A. P., & Haminiuk, C. W. I. (2019). Improvement of phenolic compound bioaccessibility from yerba mate (*Ilex paraguariensis*) extracts after biosorption on *Saccharomyces cerevisiae*. *Food Research International*, 126, 108623. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108623>

Rienzi, E. A., Maggi, A. E., Scroffa, M., Lopez, V. C., & Cabanella, P. (2016). Autoregressive state spatial modeling of soil bulk density and organic carbon in fields under different tillage system. *Soil & Tillage Research*, 159, 56–66. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.01.006>

Santos, H. dos, Jacomine, P., Anjos, L. dos, Oliveira, V. de, Lumbreras, J. F., Coelho, M., ... Cunha, T. J. F. (2018). *Brazilian system of soil classification - Embrapa*. (Embrapa, Org.) (5^o ed). Brasília, DF: Embrapa. Recuperado de <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1094003/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>

Santos, F. S., Zeoula, L. M., De Lima, L. S., De Marchi, F. E., Ítavo, L. C. V., Santos, N. W., ... Dos Santos, G. T. (2019). Effect of supplementation with Yerba Mate (*Ilex paraguariensis*) and vitamin E on milk lipoperoxidation in cows receiving diets containing ground soybean seeds. *Journal of Dairy Research*, 86(3), 279–282. <https://doi.org/10.1017/S0022029919000529>

Silva, S. de D. da., Alves, J. M., Mesquita, G. M., & Leandro, W. M. (2012). Effect of soil compaction in the air and root development of jatropha (*Jatropha curcas* L.) and crambe (*Crambe abyssinica* Hochst). *Global Science and Technology*, 5(2), 87–97. Recuperado de <https://repositorio.bc.ufg.br/xmlui/handle/ri/15171>

Silva, F.A.S., & Azevedo, C.A.V. (2016). The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. *African Journal of Agricultural Research*, 11(39):3733-3740. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x201600090006110.5897/AJAR2016.11522>

Souza, J. T. de, Talgatti, M., Silveira, A. G. da, Menezes, W. M. de, Haselein, C. R., & Santini, E. J. (2019). Mechanical properties of MDP produced with wood particles of *Ilex paraguariensis*, *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*. *Scientia Forestalis*, 47(122), 273–285. <https://doi.org/10.18671/scifor.v47n122.10>

Suzuki, L. E. A. S., Reichert, J. M., Reinert, D. J., & Lima, C. L. R. de. (2007). Relative compaction, physical properties and crop yield in Oxisol and Alfisol. *Pesq. agropec. bras*, 42(8), 1159–1167.

Szymczak, D. A., Brun, E. J., Reinert, D. J., Frigotto, T., Mazzalira, C. C., Dal'Col Lúcio, A., & Marafiga, J. (2014). Soil compaction caused by forest tractors in the *Pinus taeda* L. harvesting in the South-Western region of Paraná. *Revista Arvore*, 38(4), 641–648. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000400007>

Tuzzin de Moraes, M., Debiasi, H., Carlesso, R., Cezar Franchini, J., Rodrigues da Silva, V., & Bonini da Luz, F. (2016). Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. *Soil and Tillage Research*, 155, 351–362. <https://doi.org/10.1016/J.STILL.2015.07.015>

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Jhonatan Spliethoff – 40%

Cristiano André Pott – 30%

Leandro Rampim – 10%

Luciano Farinha Watzlawick – 10%

Sidnei Osmar Jadoski – 10%