







ARTIGO ORIGINAL

Atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico sob diferentes usos do solo e floresta nativa

Physical attributes of a dystrophic Red-Yellow Oxisol under different land uses and native forest

André Ribeiro Silveira¹ , Moacir de Souza Dias Junior¹ , Wellington Willian Rocha² ,
Ângelo Márcio Pinto Leite² , Vanessa Lopes de Faria¹ , Josiel de Jesus Santos¹ 

¹Universidade Federal de Lavras – UFLA, Lavras, MG, Brasil

²Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM, Diamantina, MG, Brasil

Como citar: Silveira, A. B., Dias Junior, M. S., Rocha, W. W., Leite, A. M. P., Faria, V. L., & Santos, J. J. (2023). Atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico sob diferentes usos do solo e floresta nativa. *Scientia Forestalis*, 51, e3992. <https://doi.org/10.18671/scifor.v51.24>

Resumo

Os atributos físicos de um solo são importantes para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas e florestais, tornando-se necessário para tal um monitoramento de sua qualidade. Nos últimos anos, a deterioração da qualidade do solo tem sido um assunto de suma importância na ciência do solo, na medida em que a retirada da cobertura vegetal e o uso intensivo da mecanização em todas as operações de cultivo podem resultar na diminuição da sua capacidade produtiva. Nesse sentido, objetivou-se com esse trabalho analisar os atributos físicos de um Latossolo Vermelho – Amarelo distrófico submetido à diversas alternativas de uso do solo e sob floresta nativa. A coleta das amostras e ensaios de campo foram constituídas de amostras indeformadas e deformadas no plantio de eucalipto (PE), cerrado (CE), integração lavoura, pecuária e floresta (ILPF), plantio convencional de milho (PCM), pastagem extensiva (PEX) e floresta nativa (FN). Foram realizados ensaios de *Proctor Normal* para avaliar a densidade máxima e umidade ótima de compactação, resistência do solo à penetração e velocidade de infiltração básica (VIB). As alternativas de usos CE e PEX foram as que apresentaram maiores densidades do solo, tendo a FN apresentado a menor densidade, devido a maior presença de matéria orgânica neste ambiente, gerando uma diminuição na pressão de carga aplicada na estrutura do solo. As alternativas CE e PEX apresentaram também os menores valores de Umidade Ótima (Uot), dado seu estado de consolidação pelo não revolvimento do solo e pisoteio de animais, bem como os maiores valores de Grau de Compactação (GC), indicando uma maior alteração estrutural do solo quando comparados com a FN. Todos os sistemas apresentaram valores de Velocidade de Infiltração Básica (VIB) inferiores ao da FN, indicando, que a atividade antrópica interferiu na estrutura do solo.

Palavras-chave: Solo; Compactação; Propriedades físicas.

Abstract

The physical attributes of a soil are important for the sustainability of agricultural and forestry systems, making it necessary to monitor its quality. In recent years, the deterioration of soil quality has been a subject of paramount importance in soil science, as the removal of vegetation cover and the intensive use of mechanization in all cultivation operations can result in a decrease in soil quality productive capacity. In this sense, the aim of this work was to analyze the physical attributes of a dystrophic Red-Yellow Oxisol subjected to different land use alternatives and under native forest. Sample collection and field trials were made up of undisturbed and deformed samples from eucalyptus plantation (PE), cerrado (CE), integrated crop, livestock and forest (ILPF), conventional corn plantation (PCM), extensive pasture (PEX) and native forest (FN). Normal Proctor tests were carried out to evaluate the maximum density and optimum compaction moisture, soil resistance to penetration and basic infiltration velocity (VIB). The

Fonte de financiamento: Nenhuma.

Conflito de interesse: Nada a declarar.

Autor correspondente: andre.silveira2@estudante.ufla.br

Recebido: 20 fevereiro 2023.

Aceito: 6 agosto 2023.

Editor: Mauro Valdir Schumacher.



Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o artigo científico seja corretamente citado.

alternative uses CE and PEX were the ones that resulted in the highest soil densities; with the NF having the lowest density, due to the greater presence of organic matter in this environment, generating a decrease in the pressure load applied to the soil structure. The CE and PEX alternatives also presented the lowest Optimal Humidity (Uot) values, given their state of consolidation due to non-returning of the soil and trampling by animals, as well as the highest Compaction Degree (GC), indicating a greater structural alteration of the soil when compared to the FN. All systems showed values of Basic Infiltration Rate (VIB) lower than the NF, indicating that anthropic activity interfered in the soil structure.

Keywords: Soil; Compaction; Physical properties.

INTRODUÇÃO

A compactação do solo ocorre principalmente em sistemas de cultivos inadequados, sendo eles agrícolas ou florestais (Somasundaram et al., 2018) e em plantios de sistemas convencionais, pois há intenso tráfego de máquinas. As máquinas utilizadas são, em sua maioria, pesadas e de grande porte (Ferreira et al., 2021; Trentin et al., 2018), o que afeta a estrutura do solo e tem um efeito direto no rendimento das culturas (Lima et al., 2018; Marins et al., 2018; Reichert et al., 2009).

A alteração da qualidade física do solo tem sido um tópico de discussão importante na ciência do solo. No plantio convencional a retirada da cobertura vegetal e o uso desenfreado da mecanização em todas as operações de cultivo (semeadura, tratos culturais e colheita) podem ocasionar a diminuição da capacidade produtiva do solo (Moraes et al., 2016; Trentin et al., 2018). O solo compactado prejudica o crescimento e desenvolvimento das plantas e raízes, pois a porosidade e condutividade hidráulica do solo é reduzida (Reichardt e Timm, 2020), além de ocorrer o aumento na resistência à penetração (Souza et al., 2015). Os atributos morfológicos e fisiológicos da planta são afetados pelos atributos físicos do solo, como a redução no crescimento e altura, proporcionando um sistema radicular mais superficial (Shah et al., 2017) e uma menor absorção de água e nutrientes, diminuindo assim o rendimento das culturas (Colombi & Keller, 2019; Moraes et al., 2020; Rivera et al., 2019).

Neste sentido, o monitoramento da qualidade física do solo é de suma importância. As propriedades físicas são influenciadas pelo manejo do solo e podem ser usadas como indicadores de compactação, tais como valores da densidade do solo (Moraes et al., 2016; Reichert et al., 2009; Trentin et al., 2018), porosidade do solo, dentre outros (Barbosa et al., 2019; Moraes et al., 2016).

O grau de compactação representa a relação entre a densidade do solo e a densidade máxima, obtida pelo teste de *Proctor* (Stancati et al., 1992), sendo considerado um indicador útil da condição física do solo, pois é uma forma de normalizar sua densidade em relação à textura (Koureh et al., 2020; Oliveira et al., 2016; Rossetti & Centurion, 2015; Suzuki et al., 2007). O crescimento da raiz é restrito quando a densidade do solo excede a sua densidade máxima (Keller & Håkansson, 2010). O grau de compactação, como a tensão matricial da água, está relacionada com a porosidade e os limites de resistência à penetração, o que torna estes parâmetros úteis aos estudos sobre compactação do solo (Håkansson & Lipiec, 2000). Já a taxa de infiltração é determinada, geralmente, a partir de dados de campo, sendo os principais métodos utilizados: infiltrômetro de anel, permeâmetro de disco, alagamento de bacias ou sulcos e aspersão (simulação de chuva) (Lili et al., 2008).

Diante do exposto, objetivou-se com esse trabalho analisar os atributos físicos de um Latossolo Vermelho – Amarelo distrófico submetido à diversas alternativas de uso do solo e sob floresta nativa, uma vez que, essas análises irão direcionar à redução dos impactos causados pela ação antrópica.

MATERIAL E MÉTODOS

A coleta das amostras e ensaios de campo ocorreram na Fazenda Experimental da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) situada em Curvelo, MG.

As áreas do estudo encontram-se a uma altitude média de 700 m, com temperatura anual variando entre 18° e 36° C e precipitação média anual de 1709,4 mm (Figura 1). O relevo é

suave ondulado em grandes extensões com declividade média de 6%. O solo da área de estudo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média, com horizonte A moderado (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2017).

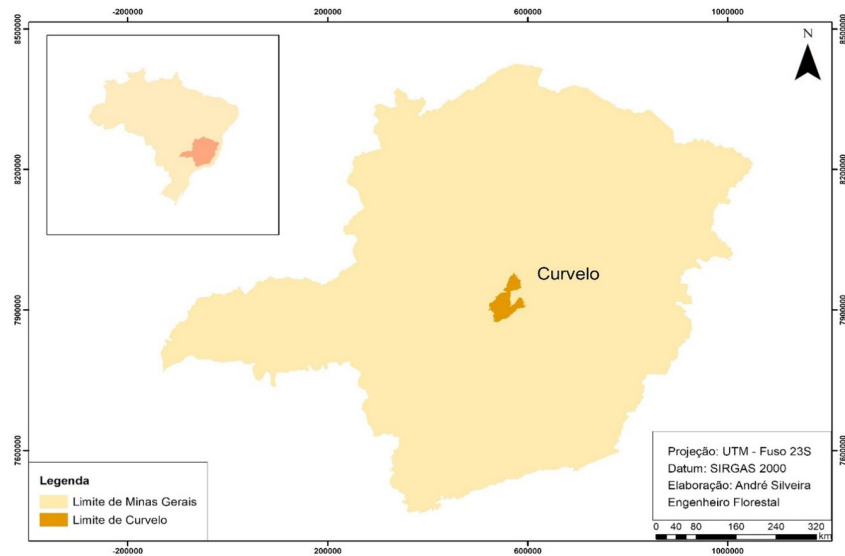


Figura 1. Localização da área de estudo.

Na área em estudo encontram-se as seguintes alternativas de uso do solo: Plantio de eucalipto (PE), Cerrado (CE), Integração Lavoura Floresta (ILPF), Plantio convencional de milho (PCM), Pastagem extensiva (PEX) e Floresta nativa (FN). Cada área de estudo é de aproximadamente dois hectares (ha). Os sistemas de plantio de eucalipto e de milho estão estabelecidos na área há sete anos, o cerrado sofreu pisoteio anteriormente durante um longo período e hoje se encontra em recuperação há mais de um ano.

O experimento foi constituído das seguintes avaliações: ensaio de *Proctor normal* para se avaliar a densidade máxima e umidade ótima de compactação, resistência do solo à penetração e velocidade de infiltração básica (VIB). Por serem ferramentadas distintas de avaliações do solo, cada uma teve sua metodologia, buscando representar de maneira mais precisa e coesa cada um de seus resultados.

Para a obtenção da curva de compactação do solo foram coletadas amostras deformadas na camada 0-20 cm em cada área de estudo, no qual compactaram-se cinco corpos de prova com umidades crescentes. A compactação dos corpos de prova se deu em três camadas, as quais receberam 25 golpes do martelo usado no ensaio de *Proctor normal* (Stancati et al., 1981), determinando-se em seguida, a densidade do solo. Para cada corpo de prova, uma amostra de solo foi coletada para a determinação da umidade. Com os valores da umidade e da densidade do solo plotaram-se os pontos, obtendo-se por intermédio do *software Excel for Windows*, as equações de regressão que melhor se ajustaram aos pontos determinados. No ponto máximo da função obtiveram-se a densidade do solo máxima (D_{smax}) e a umidade ótima (U_{ot}) de compactação por intermédio das expressões $D_{smax} = -b/2a$ e $U_{ot} = -(b^2 - 4ac)/4a$ (Iezzi et al., 1978), em que a, b e c são os coeficientes de ajustes das equações.

Para a obtenção das curvas de compactação os valores da densidade do solo (D_s) e da umidade (U), obtidos por intermédio do ensaio de *Proctor normal*, foram plotados nos eixos das ordenadas e das abcissas, respectivamente. Em seguida, foi ajustada uma equação do segundo grau do tipo $D_s = a U^2 + b U + c$, em que a, b e c são os parâmetros ajustados.

Os graus de compactação foram obtidos pela divisão dos valores de densidade do solo pelos valores da densidade máxima obtido no ensaio de *Proctor normal*, multiplicados por 100.

Para o ensaio da resistência do solo à penetração utilizou-se um penetrômetro de molas da marca ELE *International*, equipamento portátil de avaliação de perfis de solos. Foram

coletadas amostras indeformadas de solo com o auxílio de uma amostrador do tipo Uhland, com anéis de 2,2 cm de altura com 6 cm de diâmetro. Para cada área de estudo, coletou-se 30 anéis na profundidade de 5-10 cm, totalizando 180 amostras. Coletaram-se também amostras deformadas de solos na profundidade de 0-20 cm para sua caracterização, consistindo em análise granulométrica pelo método da pipeta (Day, 1965; Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2017), e teor de matéria orgânica (Raij & Quaggio, 1983).

Após a coleta, as amostras indeformadas foram embaladas em filme plástico e posteriormente parafinadas e identificadas. A utilização do filme plástico e a parafina garantiram que a estrutura da amostra fosse preservada até o laboratório. O volume da amostra é correspondente ao volume do anel, sendo necessário para o seu preparo retirar as partes excedentes das superfícies, ou seja, realizar a toaleta de cada uma das amostras.

Depois de preparadas, as amostras indeformadas de solos foram saturadas com água destilada por 48 horas. Os ensaios de resistência à penetração ocorreram após a saturação das amostras e consistiu em medir a resistência do solo dentro do anel, usando o penetrômetro e pesando-se as amostras logo em seguida. Esse procedimento foi repetido até que o solo se encontrasse com um valor de umidade que não permitisse mais a leitura da resistência à penetração, sendo então, as amostras levadas à estufa a 105°C por 24h para secagem. Com os valores das massas dos solos úmidos e secos calculou-se as umidades correspondentes aos valores das resistências à penetração. De posse das informações de resistência à penetração *versus* umidade obteve-se os modelos matemáticos para avaliação da compactação ou não do solo, referentes às alternativas de uso estudadas. Os modelos gerados foram do tipo exponenciais e comparados estatisticamente segundo procedimentos descritos por Snedecor & Cochran (1989).

O ensaio de VIB foi conduzido segundo Bernardo (2006), o qual consiste na avaliação da infiltração de água no solo com o uso de dois anéis concêntricos chamados de anéis infiltrômetros. O valor da VIB de cada solo correspondeu à infiltração de água medida por um determinado tempo, sendo o valor adotado, aquele que apresentou três leituras iguais e consecutivas. Foram realizadas três repetições para cada área de estudo.

Para a determinação da capacidade de campo (cc) foram coletas 10 amostras indeformadas em cada uma das áreas de estudo, totalizando 60 amostras. Essas amostras foram saturadas com água destilada por 48 horas e, em seguida, equilibradas na unidade de sucção (Funil de *Buchner*) na tensão de -10kPa, correspondendo à capacidade de campo para cada alternativa de uso do solo (Silva, 2007). Após foram calculadas as médias de cada uma das áreas estudadas, para a definição das suas respectivas capacidades de campo.

Uma vez conhecidas as umidades na capacidade de campo e as equações de r_p x umidade, foi possível a obtenção dos valores de r_p para cada alternativa estudada.

RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta a análise textural e os resultados de matéria orgânica do Latossolo Vermelho – Amarelo distrófico para diferentes alternativas de uso do solo e sob floresta nativa. Os usos de solo Cerrado (CE) e Pastagem extensiva (PEX) foram as situações que apresentaram maiores densidades do solo (Tabela 2). Pela Tabela 2, pode-se observar ainda os resultados de Densidade máxima, Umidade ótima de compactação, Umidade na capacidade de campo, Grau de compactação e Velocidade de infiltração básica. A FN foi a situação que apresentou a menor densidade do solo, e possuiu uma maior quantidade de matéria orgânica - MO (Tabela 1). O menor conteúdo de matéria orgânica pode ser observado no plantio convencional. O plantio convencional de milho (PCM) foi o que apresentou menores valores de densidade do solo. Quando comparado ao CE e PEX as áreas de Plantio de eucalipto (PE) e Integração Lavoura Pecuária Floresta (ILPF) também apresentam menores valores de densidade do solo.

Tabela 1. Análise textural e de matéria orgânica do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVAd) extraído na Fazenda Experimental da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), submetido a diferentes usos do solo e sob floresta nativa na profundidade de 0-20 cm.

Sistemas	Argila (%)	Areia (%)	Silte (%)	MO (%)
	----- g kg ⁻¹ -----			
Plantio de eucalipto	26,0	57,0	17,0	1,9
Cerrado	26,1	57,9	16,0	1,8
Integração lavoura-Floresta	25,6	57,1	17,3	2,0
Plantio convencional de milho	26,0	56,7	17,3	1,6
Pastagem extensiva	26,0	56,9	17,1	1,8
Floresta nativa	26,2	57,8	16,0	3,8

Tabela 2. Médias de densidade e densidade máxima do solo (Dsmax), umidade ótima de compactação (Uot), umidades na capacidade de campo (Ucc), grau de compactação (GC) e velocidade de infiltração básica (VIB) para as diferentes alternativas de uso do solo estudados.

Usos do solo	Densidade do solo (Mg m ⁻³)	Dsmax (Mg m ⁻³)	Uot (kg kg ⁻¹)	Ucc (kg kg ⁻¹)	Grau de compactação (%)	VIB (mm h ⁻¹)
PE	1,20	1,62	0,28	0,31	74,1	32b
ILPF	1,18	1,60	0,28	0,32	73,7	30b
CE	1,39	1,79	0,24	0,30	78,1	20c
PCM	1,15	1,53	0,26	0,30	75,2	28b
PEX	1,35	1,72	0,24	0,30	78,5	20c
FN	1,01	1,4	0,28	0,33	72,1	40a

Dsmax - Densidade máxima do solo, Ucc - Umidade correspondente à capacidade de campo, Uot - Umidade ótima, VIB- velocidade de infiltração básica, (Médias seguidas da mesma letra na vertical não diferem estatisticamente entre si pelo teste de "Scott-Knot" ao nível de significância de 5%). PE = Plantio de Eucalipto, ILPF = Integração Lavoura Pecuária Floresta, CE = Cerrado, PCM = Plantio Convencional de Milho, PEX = Pastagem Extensiva e FN = Floresta Nativa.

Também, com base na Tabela 2, verificou-se que a sequência decrescente de valores quanto a densidade máxima do solo (Dsmax) foi: CE > PEX > PCM > ILPF > PE > FN. Observou-se que as alternativas PEX e CE foram as que apresentaram maiores valores de Dsmax. A FN por sua vez foi a alternativa que apresentou o menor valor de Dsmax.

Sobre o Grau de compactação (Tabela 2), a mesma tendência decrescente para a densidade do solo pode ser observada: CE > PEX > PCM > ILPF > PE > FN e, maiores graus de compactação ensejaram em menores Velocidades de infiltração básica, caso do manejo CE e PEX.

Com relação às umidades apresentadas, em todas as situações as Umidades na capacidade de campo foram superiores às Umidades ótimas de compactação. As Figuras 2 a 7 apresentam as curvas provenientes das equações de regressão ajustadas da resistência do solo à penetração, para as diferentes alternativas de uso do solo estudadas. Nessas figuras, estão apresentadas as modelagens matemáticas, com ajuste exponencial de Resistência do solo à Penetração x Umidades.

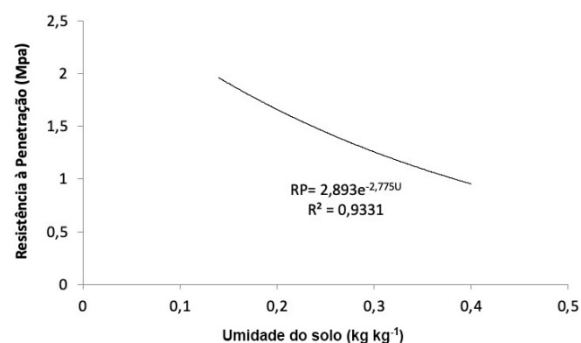


Figura 2 - Modelagem da Resistência à penetração versus Umidade para o PE.

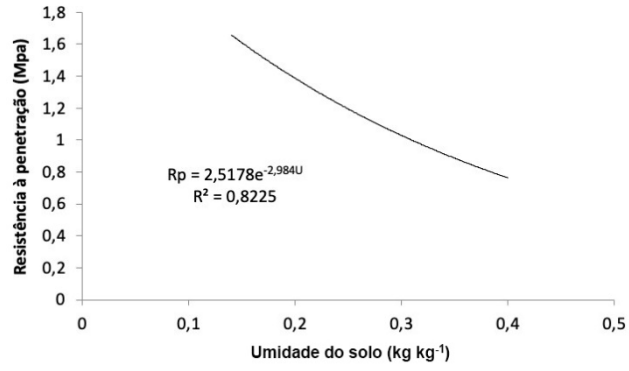


Figura 3 - Modelagem da Resistência à penetração versus Umidade para ILPF.

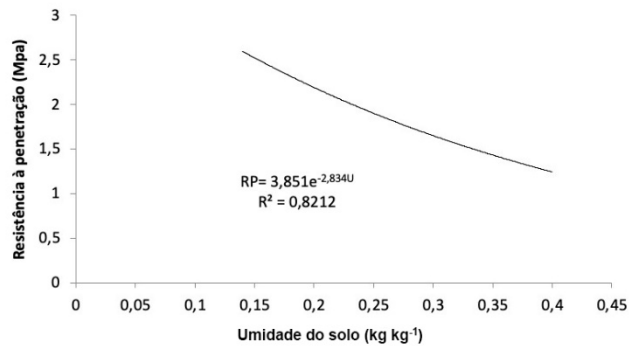


Figura 4 - Modelagem da Resistência à penetração versus Umidade para o CE.

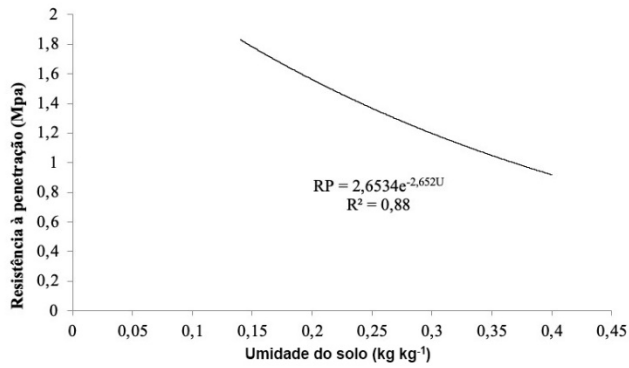


Figura 5 - Modelagem da Resistência à penetração versus Umidade para o PCM.

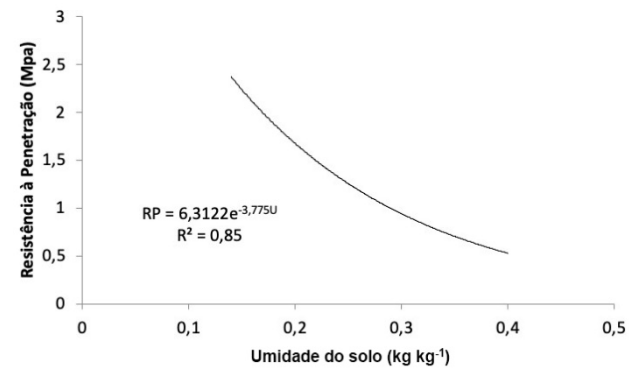


Figura 6 - Modelagem da Resistência à penetração versus Umidade para a PEX.

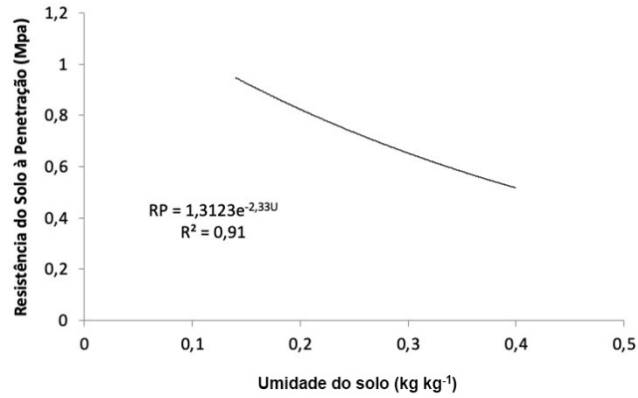


Figura 7 - Modelagem do solo à penetração versus Umidade para a FN.

Tendo sido gerados em forma exponencial, para comparações estatísticas os modelos foram transformados em retas e estas, comparadas duas a duas pelos seus coeficientes lineares e angulares de acordo com Snedecor & Cochran (1989).

Pela Tabela 3 observa-se que os tratamentos PE x ILPF não se diferenciaram estatisticamente entre si pelo teste de Snedecor & Cochran (1989).

Tabela 3. Teste de significância para as diferentes alternativas de uso do solo estudadas, de acordo com Snedecor & Cochran (1989).

Comparações entre as alternativas	Significância	
	Coefficiente linear	Coefficiente angular
PE x ILPF	ns	ns
PE x CE	*	*
PE x PCM	*	ns
PE x PEX	*	*
PE x FN	*	*
ILPF x CE	*	*
ILPF x PCM	*	*
ILPF x PEX	*	*
ILPF x FN	*	*
CE x PCM	*	*
CE x PEX	*	*
CE x FN	*	*
PCM x PEX	*	*
PCM x FN	*	*
PEX x FN	*	*

* = significativo a 5%, ns = não significativo. PE = Plantio de Eucalipto, ILPF = Integração Lavoura Pecuária Floresta, CE = Cerrado, PCM = Plantio Convencional de Milho, PEX = Pastagem Extensiva e FN = Floresta Nativa.

A Tabela 4 demonstra os valores de resistência à penetração (RP) na umidade correspondente à capacidade de campo (Ucc). O que se observa é que as alternativas PEX e CE apresentaram os maiores valores de RP, nesta ordem, e ambos acima de 2 MPa. Já o menor valor de RP, 0,84 MPa, foi constatado para o solo sob FN.

Tabela 4. Valores de Resistência à Penetração (RP) na umidade correspondente à capacidade de campo (Ucc).

Usos do solo	RP (MPa)	Ucc (kg kg⁻¹)
PE	1,22	0,31
ILPF	1,23	0,32
CE	2,08	0,30
PCM	1,19	0,30
PEX	2,42	0,30
FN	0,84	0,33

PE = Plantio de Eucalipto, ILPF = Integração Lavoura Pecuária Floresta, CE = Cerrado, PCM = Plantio Convencional de Milho, PEX = Pastagem Extensiva e FN = Floresta Nativa.

DISCUSSÃO

Os usos CE e PEX foram os que sofreram uma maior degradação, aumentando assim a sua densidade do solo, tal fato se explica pelo não revolvimento do solo e o pisoteio animal que o CE sofreu no passado e, o intenso pastejo animal que a PEX vem sendo submetida ao longo dos anos. Na alternativa PCM devido ao solo passar por sucessivas operações de revolvimento como, arações e gradagens, a estrutura deste é drasticamente alterada, deixando-o mais solto e, conseqüentemente, com menores valores de densidade. Nas áreas de PE e ILPF, embora tenham sido submetidas ao tráfego de máquinas durante seus preparos (subsolagem, aração e duas gradagens respectivamente), a estrutura destes locais foi drasticamente alterada pelo revolvimento do solo, deixando-o mais solto e, conseqüentemente, com valores de densidade não tão altos. Outro aspecto a ser considerado também é o de que ambas as áreas não sofreram pisoteio animal.

Ressalta-se que maiores valores de D_{smax} não expressam a compactação do solo, sendo apenas parte do cálculo de seu grau, o qual segundo Dias Junior et al. (2007), pode expressar com maior clareza apenas seu estado.

Neste estudo obteve-se ainda por intermédio do método de *Proctor normal* a umidade ótima de compactação (U_{ot}), ou seja, a umidade na qual o solo quando submetido a uma quantidade excessiva de cargas tem uma maior propensão em se compactar (Raghavan et al., 1990). A Tabela 2 apresenta os valores de U_{ot} para as diferentes alternativas estudadas, na qual verificou-se que o CE e PEX apresentaram os menores valores de U_{ot} , dado seu estado de consolidação pelo não revolvimento do solo e pisoteio de animais. Essas alternativas de usos tendem a apresentar menores valores de porosidade total, o que de certa forma ocasiona menores valores de U_{ot} . Na prática isto significa que em períodos de chuva, esses solos requerem maiores cuidados quanto aos seus usos, pois podem ser mais suscetíveis à compactação.

A umidade correspondente à capacidade de campo - U_{cc} (Tabela 2) tem também grande influência na susceptibilidade dos solos à compactação (Sá & Santos Júnior, 2005). Observou-se, porém, que para todas as alternativas de uso do solo, o valor de U_{cc} é superior ao valor da U_{ot} , indicando um risco. Se no momento da irrigação o solo é mantido com umidade próxima à da capacidade de campo e, entre uma irrigação e outra, essa umidade é reduzida por processos fisiológicos de redistribuição da água no perfil e de evapotranspiração, possivelmente chegará a valores muito próximos aos da U_{ot} , (Tabela 2). Ressalta-se que um solo em condições ideais ou próximo dessa situação, aliado ao intenso tráfego de máquinas e, ou pisoteio animal, apresenta um alto potencial de compactação. Ao analisar-se PE e ILPF verificou-se que o valor de U_{ot} é muito próximo de U_{cc} , conferindo a essas duas alternativas de uso do solo um enorme potencial para a compactação, caso sejam irrigados.

Para a FN, a maior quantidade de matéria orgânica (MO) pode influenciar nos valores de U_{ot} , pois, por suas características físicas e químicas a retenção de água é aumentada, podendo reduzir também D_{smax} . Os menores valores de D_{smax} ocorrem pelo efeito de amortecimento, uma vez a MO deixar o solo mais leve e com menores densidades. Os maiores valores de U_{ot} ocorrem pela alta capacidade de adsorção da MO, o que foi observado também por Aragón et al. (2000) e Ball et al. (2000).

Segundo Santos et al. (2005), o grau de compactação (GC) tem sido aceito como indicativo da compactação dos solos. Este autor afirma ainda que, valores acima de 75% para GC apresentaram limitações ao desenvolvimento da cultura do milho. Porém, Carvalho et al. (2010) encontraram gramíneas se desenvolvendo bem onde o grau de compactação medido foi de 88%. Neves Junior et al. (2013) estudando a densidade relativa, que se compara com o grau de compactação obtido pelo ensaio de *Proctor normal*, concluíram que o valor crítico limitante do desenvolvimento das culturas seria de 86%. Contudo, não se tem estudos ainda precisos de limites para a cultura do eucalipto.

Pela Tabela 2 verificou-se que as alternativas de uso do solo ILPF e PCM não apresentam valores críticos em relação à compactação, pois estão abaixo dos limites citados anteriormente, sendo assim o desenvolvimento dessas culturas não foram comprometidos por esse fator. A FN também não sofreu riscos devido à compactação, pois está bem abaixo

do valor crítico. Isto ocorreu devido ela não ter sofrido nenhuma ação antrópica, pisoteio animal ou prática de preparo do solo.

De acordo com a Tabela 2 observou-se ainda que, as alternativas de uso do solo PEX e CE apresentaram os maiores de GC, indicando uma maior alteração estrutural do solo quando comparados com a FN. Isso é um indicativo de que o pisoteio constante de animais nas referidas áreas ocasionou uma significativa mudança na estrutura do solo.

Por trabalhar com amostras deformadas, os resultados do *Proctor* normal que auxiliam no cálculo do grau de compactação ainda são questionados por alguns autores, porém é um método aceito pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo como indicativo da compactação dos solos agrícolas. Embora este método se aplique com mais propriedade a estudos da Engenharia Civil, como construção de estradas e outros.

Outro ensaio realizado para quantificação da mudança estrutural do solo e para o conhecimento de sua possível compactação é a determinação da velocidade de infiltração básica (VIB). No campo é uma medida direta da velocidade de infiltração da água em condições de saturação do solo. A Tabela 2 apresenta os valores da VIB para as diferentes alternativas de uso do solo. Se considerar que antes do estabelecimento das culturas nos locais estudados toda a área era ocupada pela FN, então o solo sob este tipo de vegetação é o parâmetro de comparação. Observa-se pela Tabela 2 que, todas as alternativas apresentaram valores de VIB inferiores ao da FN, indicando que a atividade antrópica interferiu na estrutura do solo. As alternativas de uso do solo CE e PEX foram as que apresentaram os menores valores de VIB, pelo fato de não revolvimento do solo nestas situações. Ao passo que nas alternativas PCM, PE e ILPF o efeito da ação antrópica pode ser notado. A compactação do solo pode limitar a infiltração de água (Rosolem et al., 1994), influenciando significativamente nos valores da VIB. Ao apresentar menores valores de VIB o solo pode estar sujeito frequentemente a problemas de enxurradas no período das chuvas. Essas enxurradas podem causar erosões com arraste de partículas significativas, gerando perdas de produtividade, problema este muito frequente em solos compactados.

A resistência do solo à penetração é um dos parâmetros mais empregados atualmente no Brasil, pois permite identificar camadas compactadas no solo de um modo rápido e de fácil interpretação. Ela correlaciona-se com a densidade e com a macroporosidade, possibilitando a identificação de camadas potencialmente limitante ao crescimento radicular (Colet et al., 2009).

Observa-se pela Tabela 3 que os tratamentos PE x ILPF não se diferenciaram estatisticamente entre si pelo teste de Snedecor & Cochran (1989). Entretanto, todos os demais tratamentos apresentaram diferenças estatísticas. De acordo com Rocha (2003), a melhor representatividade da resistência do solo à penetração (RP) deve ser o valor na umidade correspondente à capacidade de campo, pois esse valor é influenciado pela umidade do solo.

A Tabela 4 apresenta os valores de RP obtidos na Ucc. Admitindo-se o valor crítico de 2 MPa (Hamza & Anderson, 2005). Observou-se que as alternativas de uso do solo PEX e CE apresentaram valores acima do valor crítico, evidenciando problemas de compactação, principalmente devido ao pisoteio animal. Os menores valores de RP foram encontrados para a FN e PCM. A FN por se constituir em um sistema sem tráfego de máquinas e, ou animais e, também, por apresentar um maior conteúdo de matéria orgânica, tende a condicionar o solo a menores valores de resistência à penetração. O PCM também apresenta menores valores de resistência à penetração devido a uma estrutura mais solta do solo, em decorrência dos intensos processos de mobilização por sucessivas arações e gradagens, antes do plantio de milho anualmente.

CONCLUSÕES

A FN foi a alternativa de uso do solo com menor valor de densidade máxima e maior valor de umidade ótima de compactação. Entretanto PEX e o CE foram as alternativas que apresentaram os maiores valores de resistência do solo à penetração e, também, para o grau de compactação. A FN foi a alternativa que apresentou o maior valor de VIB e, por sua vez, o CE e PEX os que apresentaram os menores valores destes indicadores. Portanto, devido aos

seus usos extensivos e pisoteio animal as alternativas que apresentaram as maiores modificações estruturais em relação à FN foram a PEX e o CE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aragón, A., García, M. G., Filgueira, R. R., & Pachepsky, Y. A. A. (2000). Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test; the relationship with organic carbon and water content. *Soil & Tillage Research*, 56(3-4), 197-204. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00144-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00144-6).
- Ball, B. C., Campbell, D. J., & Hunter, E. A. (2000). Soil compactibility in relation to physical and organic properties at 156 sites in UK. *Soil & Tillage Research*, 57(1-2), 83-91. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00145-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00145-8).
- Barbosa, L. C., Magalhaes, P. S. G., Bordonal, R. O., Cherubin, M. R., Castioni, G. A. F., Tenelli, S., Franco, H. C. J., & Carvalho, J. L. N. (2019). Soil physical quality associated with tillage practices during sugarcane planting in south-central Brazil. *Soil & Tillage Research*, 195, 104. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2019.104383>.
- Bernardo, S. (2006). *Manual de irrigação* (8. ed.). Viçosa: UFV, Imprensa Universitária.
- Carvalho, R. C. R., Rocha, W. W., Pinto, J. C., Pires, B. S., Dias Júnior, M. S., & Nunes, A. H. B. (2010). Soil shear strength under non-irrigated and irrigated short duration grazing systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34(3), 631-638. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000300004>.
- Colet, M. J., Sverzut, C. B., Weirich Neto, P. H., & Souza, Z. M. (2009). Alterações em atributos físicos de um solo sob pastagem após escarificação. *Ciência Agrotecnológica*, 33, 361-368. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542009000200001>.
- Colombi, T., & Keller, T. (2019). Developing strategies to recover crop productivity after soil compaction: a plant eco-physiological perspective. *Soil & Tillage Research*, 191, 156-161. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2019.04.008>.
- Day, P. R. (1965). Particle fractionation and particle-size analysis. In C.A. Black (Ed.), *Methods of soil analysis: physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling* (pp. 545-566). Madison: American Society of Agronomy.
- Dias Junior, M. S., Fonseca, S., Araujo Junior, C. F., & Silva, A. R. (2007). Soil compaction due to forest Harvest operatinos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42(2), 257-264. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2007000200015>.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. (2017). *Manual de métodos de análise de solos* (3. ed., 573 p.). Rio de Janeiro: Embrapa Solos.
- Ferreira, C. J. B., Tormena, C. A., Severiano, E. D. C., Zotarelli, L., & Betioli Júnior, E. (2021). Soil compaction influences soil physical quality and soybean yield under long-term no-tillage. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 67(3), 383-396. <http://dx.doi.org/10.1080/03650340.2020.1733535>.
- Håkansson, I., & Lipiec, J. (2000). A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil & Tillage Research*, 53(2), 71-85. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00095-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00095-1).
- Hamza, M. A., & Anderson, W. K. (2005). Soil compaction incropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research*, 82, 121-145. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>.
- Iezzi, G., Dolce, O., Teixeira, J. C., Machado, N. J., Goulart, M. C., Castro, L. R. S., & Machado, A. S. (1978). *Matemática* (325 p.). São Paulo: Atual.
- Keller, T., & Håkansson, I. (2010). Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. *Geoderma*, 154(3/4), 398-406. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.11.013>.
- Koureh, H. K., Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M. R., & Khodaverdiloo, H. (2020). Critical values of soil physical quality indicators based on vegetative growth characteristics of spring wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(2), 493-506. <http://dx.doi.org/10.1007/s42729-019-00134-8>.
- Lili, M., Bralts, V. F., Yinghua, P., Han, L., & Tingwu, L. (2008). Methods for measuring soil infiltration: state of the art. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 1(1), 22-30.
- Lima, C. L. R., Paiva, R. B., Nunes, M. C. M., Tuchtenhagen, I. K., & Pillon, C. N. (2018). Critical values of physical attributes of an Ultisol under uses in South of Brazil. *Agrária*, 13(2), 1-9. <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v13i2a5529>.
- Marins, A. C., Reichert, J. M., Secco, D., Rosa, H. A., & Veloso, G. (2018). Crambe grain yield and oil content affected by spatial variability in soil physical properties. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 81, 464-472. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.003>.

- Moraes, M. T., Debiasi, H., Carlesso, R., Franchini, J. C., Silva, V. R., & Luz, F. B. (2016). Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. *Soil & Tillage Research, 155*, 351-362. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2015.07.015>.
- Moraes, M. T., Debiasi, H., Franchini, J. C., Mastroberti, A. A., Levien, R., Leitner, D., & Schnepf, A. (2020). Soil compaction impacts soybean root growth in an Oxisol from subtropical Brazil. *Soil & Tillage Research, 200*, 104611. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2020.104611>.
- Neves Junior, A. F., Silva, A. P., Noronha, N. C., & Cerri, C. C. (2013). Sistemas de manejo do solo na recuperação de uma pastagem degradada em Rondônia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, 37*(1), 232-241. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000100024>.
- Oliveira, P. D. D., Sato, M. K., Lima, H. V. D., Rodrigues, S., & Silva, A. P. D. (2016). Critical limits of the degree of compactness and soil penetration resistance for the soybean crop in N Brazil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 179*(1), 78-87. <http://dx.doi.org/10.1002/jpln.201400315>.
- Raghavan, G. S. V., Alvo, P., & Mckyes, E. (1990). Soil compaction in agriculture: a review toward managing the problem. *Advances in Soil Science, 11*, 1-36. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4612-3322-0_1.
- Raij, B., & Quaggio, J. A. (1983). *Métodos de análise de solo para fins de fertilidade* (31 p.). Campinas: IAC.
- Reichardt, K., & Timm, L. C. (2020). *Soil, plant and atmosphere: concepts, processes and applications*. Cham: Springer International Publishing. 456 p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-19322-5>.
- 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 & Tillage Research, 102*(2), 242-254. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002>.
- Rivera, M., Polanía, J., Ricaurte, J., Borrero, G., Beebe, S., & Rao, I. (2019). Soil compaction induced changes in morpho-physiological characteristics of common bean. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 19*(1), 217-227. <http://dx.doi.org/10.1007/s42729-019-0007-y>.
- Rocha, W. W. (2003). *Resistência ao cisalhamento e estabilidade de taludes de voçorocas em solos da região de Lavras, MG* (Tese de doutorado). Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- Rosolem, C. A., Vale, L. S. R., Grassi Filho, H., & Moraes, M. H. (1994). Sistema radicular e nutrição do milho em função da calagem e da compactação do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, 18*, 491-497.
- Rossetti, K. D. V., & Centurion, J. F. (2015). Ensaio de compactação em Latossolo cultivado com milho sob diferentes períodos de adoção de tipos de manejo. *Agrária, 10*(4), 499-505. <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v10i4a5013>.
- Sá, M. A. C., & Santos Júnior, J. D. G. (2005). *Compactação do solo: consequências para o crescimento vegetal* (Documentos; 136). Planaltina, DF: Embrapa Cerrados.
- Santos, A. G., Dias Júnior, M. S., Guimarães, T. G. P., & Furtini Neto, E. A. (2005). Diferentes graus de compactação e fornecimento de fósforo influenciando no crescimento de plantas de milho (*Zea mays* L.) cultivadas em solos distintos. *Ciência e Agrotecnologia, 29*(4), 740-752. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542005000400005>.
- Shah, A. N., Tanveer, M., Shahzad, B., Yang, G., Fahad, S., Ali, S., Bukhari, M. A., Tung, S. A., Hafeez, A., & Souliyanonh, B. (2017). Soil compaction effects on soil health and cropproductivity: an overview. *Environmental Science and Pollution Research International, 24*(11), 10056-10067. PMID:28108925. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-017-8421-y>.
- Silva, B. P. (2007). *Resistência ao cisalhamento e compressibilidade de um latossolo sob diferentes usos MG* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Lavras, Lavras. 66 p.
- Snedecor, G. W., & Cochran, W. G. (1989). *Statistical methods* (8. ed.). Ames: Iowa State University. 503 p.
- Somasundaram, J., Chaudhary, R. S., Awanish Kumar, D., Biswas, A. K., Sinha, N. K., Mohanty, M., Hati, K. M., Jha, P., Sankar, M., Patra, A. K., Dalal, R., & Chaudhari, S. K. (2018). Effect of contrasting tillage and cropping systems on soil aggregation, carbon pools and aggregate-associated carbon in rainfed Vertisols. *European Journal of Soil Science, 69*(5), 879-891. <http://dx.doi.org/10.1111/ejss.12692>.
- Souza, R. O., Portela, J. C., Martins, C. M., Dias, N. S., Cavalcante, J. S. J., & Silva, J. F. (2015). Soil attributes in agricultural uses and in the Semiarid RN- Brazil in eutrophic Cambisol. *African Journal of Agricultural Research, 10*(37), 3636-3643. <http://dx.doi.org/10.5897/AJAR2015.9983>.
- Stancati, G., Nogueira, J. B., & Vilar, O. M. (1992). *Ensaio de laboratorio em mecanica dos solos* (248 p.). São Carlos: Eesc-USP.
- Suzuki, L. E. A. S., Reichert, J. M., Reinert, D. J., & Lima, C. L. R. (2007). Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, 42*(8), 1159-1167. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2007000800013>.

Trentin, R. G., Modolo, A. J., Vargas, T. D. O., Campos, J. R. R., Adami, P. F., & Baesso, M. M. (2018). Soybean productivity in Rhodic Hapludox compacted by the action of furrow openers. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 40(1), 1-9. <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v40i1.35015>.

Contribuição dos Autores: ARS: conceituação, curadoria de dados, análise formal, obtenção de financiamento, investigação, metodologia, administração do projeto, recursos, supervisão, validação, visualização, escrita – primeira redação, escrita – revisão e edição; MSDJ: conceituação, curadoria de dados, análise formal, investigação, metodologia, administração do projeto, supervisão, validação, visualização, escrita – primeira redação, escrita – revisão e edição; WWR: conceituação, curadoria de dados, análise formal, investigação, metodologia, administração do projeto, supervisão, validação, visualização, escrita – primeira redação, escrita – revisão e edição; AMPL: revisão e edição; VLF: revisão e edição; JJS: revisão e edição.