



AVALIAÇÃO DOS PENETRÔMETROS DE IMPACTO E ELETRÔNICO NA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA A PENETRAÇÃO DO SOLO

Evaluation of electronic and impact penetrometers in determining the mechanical resistance to soil penetration

Gabriel Felipe Vogel^{1*}; Lais Martinkoski²; Jose Francisco Grillo³, Leandro Michalovicz⁴, Rubens Fey⁵

¹Eng. Agrônomo; Departamento de Agronomia - Grupo de Pesquisa em Manejo do solo, Água e Planta em Sistemas de Produção; Universidade Federal da Fronteira Sul; gabrielfelipevogel@gmail.com (autor para correspondência).

²Professora Adjunto; Eixo de Recursos Naturais; Instituto Federal Farroupilha;

³Professor Adjunto; Departamento de Agronomia - Grupo de Pesquisa em Manejo do solo, Água e Planta em Sistemas de Produção; Universidade Federal da Fronteira Sul; jose.grillo@uffs.edu.br.

⁴Eng. Agrônomo, Instituto Paranaense de Assistência Técnica e Extensão Rural – EMATER; leandromichalovicz@gmail.com.

⁵Professor Adjunto; Departamento de Agronomia - Grupo de Pesquisa em Manejo do solo, Água e Planta em Sistemas de Produção; Universidade Federal da Fronteira Sul; rubens.fey@uffs.edu.br

Artigo enviado em 07/05/2017, aceito em 12/06/2017 e publicado em 29/09/2017.

Resumo: Atualmente, os penetrômetros mais utilizados classificam-se em função do seu princípio de penetração. Porém, independentemente do modo de operação, é importante que a determinação da resistência mecânica a penetração seja feita de forma precisa e, de preferência, que haja confiabilidade e exatidão de seus resultados. O presente trabalho objetivou comparar os valores da resistência do solo à penetração determinados por meio dos penetrômetros de impacto e eletrônico e avaliar sua eficiência correlacionando-os com os atributos físicos do solo. Os estudos foram conduzidos em Neossolo sob transição a um Cambissolo, em manejo convencional de integração lavoura pecuária na sucessão soja-aveia preta, no município de Jardim Alegre, Paraná. A resistência mecânica à penetração foi determinada com o penetrômetro de impacto IAAPLANALSUCAR/STOLF e o penetrômetro eletrônico PLG 1020 penetroLOG2. Foi utilizado um delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições em parcelas de 10.000 m², avaliando-se 30 pontos amostrais por repetição nas camadas 0,00-0,05 m; 0,05-0,10 m; 0,10-0,20 m; 0,20-0,30 m; 0-0,30 m. Em conjunto, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas para avaliação de densidade aparente e porosidade total, umidade gravimétrica e textura do solo. A partir dos resultados, constatou-se que os penetrômetros de impacto e eletrônico apresentam similaridade no comportamento. Entretanto, os resultados obtidos com o penetrômetro de impacto se correlacionaram melhor com os atributos físicos do solo.

Palavras-chave: Densidade. Penetrometria. Porosidade. Correlação.

Abstract – Currently, the most widely used penetrometers are classified according to their penetration principle. However, regardless of the mode of operation, it is important that the determination of the mechanical resistance to penetration be made accurately and preferably that there is reliability and accuracy of its results. The aim of this study was to compare the soil resistance to penetration values determined by impact and electronic penetrometers and to evaluate their efficiency by correlating them with the soil physical attributes. The studies were conducted in Neossolo under transition to a Cambisol, in conventional management of integration of livestock farming in the soya-oat black succession, in the city of Jardim Alegre, Paraná. The mechanical resistance to penetration was determined with the IAAPLANALSUCAR / STOLF impact penetrometer and the electronic penetrometer PLG 1020 penetroLOG2. A completely randomized design was used, with four replications in plots of 10,000 m², with 30 sample points per replicate in the 0.00-0.05 m layers; 0.05-0.10 m; 0.10-0.20 m; 0.20-0.30 m; 0-0.30 m. Together, deformed and undisturbed samples were collected for evaluation of apparent density and total porosity, gravimetric moisture and soil texture. From the results, it was verified that the impact and electronic penetrometers present similarity in the behavior. However, the results obtained with the impact penetrometer correlated better with the soil physical attributes.

Keywords – Density. Penetrometry. Porosity. Correlation

INTRODUÇÃO

A avaliação da compactação do solo é um procedimento necessário para avaliar a qualidade física do solo (LIMA et al., 2013). A compactação envolve relação entre os diferentes atributos do solo, sendo seu diagnóstico efetuado por métodos específicos de elevada confiabilidade, como densidade do solo e porosidade do solo (RICHART et al., 2005). Porém, estas determinações apresentam complexidade na sua execução, além de serem onerosas e exigirem elevada mão de obra e tempo para sua determinação (EURICH et al., 2014).

O uso de métodos práticos, como a resistência do solo à penetração (RP), apresenta-se como uma técnica quantitativa muito utilizada, devido à facilidade e rapidez de determinação, bem como a possibilidade de realização de um elevado número de amostragens para obtenção de dados confiáveis (ROQUE et al., 2003; SILVEIRA et al., 2010).

A resistência do solo a penetração caracteriza-se como um dos principais indicadores para o diagnóstico e avaliação da compactação do solo. Este indicador descreve a resistência física que o solo exerce sobre a raiz que tenta se mover através dele, sendo diretamente influenciado pela densidade, porosidade e, principalmente, pela umidade do solo no momento da avaliação (MAZURA et al., 2013). Na prática, a RP nos permite identificar as camadas que comprometem o crescimento do sistema radicular das plantas (LIMA et al., 2013), sendo que valores de RP acima de 2,0 MPa afetam negativamente na penetração das raízes, na proporção de gases e na disponibilidade de água e nutrientes no solo (TORMENA et al., 1998; DALCHIAVON et al., 2011).

Atualmente, os penetrômetros mais utilizados classificam-se em função do seu princípio de penetração (ROBOREDO et al., 2010), desde os mais simples, como os penetrômetro de impacto, que mensuram a RP por cálculos indiretos, até os mais práticos na coleta e capacidade de armazenamento dos dados, como os penetrômetros eletrônicos (MOLIN et al., 2006). Entretanto, a variedade de penetrômetros pode trazer consigo diferenças com relação ao número de dados obtidos, sendo influenciados principalmente pela área e projeção da ponteira (normalizadas pela ASABE, 2006), bem como pela velocidade de penetração (MOLIN et al., 2012).

Independentemente do modo de operação, é importante que a determinação da RP seja feita de forma precisa e, de preferência, que haja confiabilidade e exatidão de seus resultados, visando otimizar a interpretação dos dados e no manejo a ser adotado.

Estudos demonstram a existência de variação nas informações dos equipamentos em função das características dos mesmos. Autores como Roboredo et al. (2010), encontraram diferença significativa de RP entre penetrômetros eletrônicos e de impacto, destacando que o equipamento de impacto apresentou confiabilidade de 91% com a densidade do solo, sendo superior ao penetrômetro eletrônico (42%) em relação a mesma variável.

Deste modo, devido à diversidade dos penetrômetros disponíveis para determinação da resistência do solo a penetração, são necessárias investigações sobre suas características e disponibilidade de informações, tendo a finalidade de auxiliar na interpretação dos dados. Diante desse exposto, o presente estudo teve por objetivo comparar os penetrômetros de impacto e eletrônico, com base nos valores da resistência do solo à penetração, e analisar sua eficiência em relação aos atributos de qualidade física do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido no período compreendido entre agosto a outubro de 2016, em solo classificado como Neossolo Litólico Eutrófico, em transição com um Cambissolo Háptico Eutrófico (EMBRAPA, 2006) localizado nas coordenadas 24°16'3.74"S e 51°53'19.64"W e altitude de 628 m, no município de Jardim Alegre, Paraná. O clima da região é classificado como Subtropical Úmido Mesotérmico (Cfa) segundo critérios de classificação climática de Köppen, com precipitação média anual de 1.617 mm, e temperatura média superior a 21° C no mês mais quente (IAPAR, 2016).

A área avaliada vem sendo manejada em sistema de integração lavoura-pecuária e cultivada há mais de três anos com a sucessão das culturas de soja (*Glycine max*) no verão, seguida de aveia preta (*Avena strigosa*) no inverno. O solo é manejado de forma convencional, utilizando grade aradora e niveladora intermediárias, com objetivo de obter maior uniformidade nas características físicas do solo.

A avaliação da resistência mecânica à penetração do solo ocorreu com o uso do penetrômetro de impacto (PI) e eletrônico por acionamento manual (PE). O penetrômetro de impacto modelo IAA/PLANALSUCAR/STOLF apresenta as seguintes características: massa de 4 kg com impacto em curso de queda livre de 0,40 m; cone com 0,0128 m de diâmetro, área de 1,29 cm² e ângulo sólido de 30°; e haste com diâmetro aproximado de 0,01 m. Este equipamento tem como princípio a penetração de uma

haste ao longo do perfil do solo mediante uma força que provém do impacto de um êmbolo que compõem o equipamento, o qual é derrubado de uma altura constante.

Para obtenção da resistência mecânica a penetração (RMP) com este equipamento, de acordo com a metodologia proposta por Stolf (1991), deve-se aplicar a seguinte equação:

$$RMP = (5,6 + 6,89 \times ((N/(D-A) \times 10) \times 0,0981))$$

Onde: RMP a resistência mecânica do solo à penetração (MPa); N o número de impactos efetuados para a obtenção da leitura; e A e D = leituras anteriores (A) e posteriores (D) da realização dos impactos (cm).

O penetrômetro eletrônico portátil modelo PLG 1020 penetroLOG2 apresenta sistema de aquisição e processamento automático de dados, com resolução máxima de RMP equivalente a 7.700 kPa. A haste apresenta cone com diâmetro de 0,0128 m e ângulo de penetração de 30°, com velocidade de penetração da haste próxima de 0,035 m s⁻¹, de acordo com a instrumentação do aparelho. A operação é manual, levando em consideração a técnica e força do operador para a penetração da haste, de modo a promover uma velocidade de penetração aproximadamente constante (MOLIN et al., 2012). Este equipamento possui um sensor que indica a profundidade e compõe o cálculo da velocidade, sendo as informações armazenadas na memória interna do equipamento.

As amostras foram coletadas em quatro talhões com 10.000 m² cada. Para a aquisição dos dados de RP, foi considerado um padrão de amostragem sequencial, com 30 pontos amostrais por talhão, seguindo orientações norte para o penetrômetro de impacto e sul para o eletrônico, em uma distância de 0,10 m entre equipamentos. Foram avaliadas as camadas de 0-0,05 m; 0,05-0,10 m; 0,10-0,20 m; 20-30 m; 0-0,30 m

A densidade do solo (Ds) e porosidade total (Pt) foram determinadas de acordo com a metodologia descrita em Embrapa (1997), mediante a coleta de amostras de solo com estrutura preservada utilizando-se anéis volumétricos de aço com capacidade de 100 cm³, extraídas com auxílio do amostrador de Kopeck nas mesmas camadas, com dez repetições. A RP do PI e PE foi determinada de acordo com o mesmo procedimento de coleta mencionado anteriormente, com dez repetições. A umidade do solo (Ug) e análise granulométrica foram determinadas nas mesmas camadas, retirando-se dez amostras em cada parcela

com auxílio do trado holandês, seguindo as recomendações de Embrapa (1997). Para determinação da Ug utilizou-se o método padrão estufa, onde amostras foram secas durante 24 horas em estufa a 105-110°C e sua massa medida após o resfriamento.

Os valores para resistência do solo à penetração, densidade do solo e porosidade total foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk e, com base nos resultados obtidos, realizou-se a análise da estatística descritiva e da correlação de Pearson entre as variáveis mencionadas nas camadas analisadas a 5% e 1% probabilidade. Utilizando-se os valores de RP determinados com os penetrômetros de impacto e eletrônico, realizou-se análise de regressão utilizando-se o programa estatístico Statistic 8.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores correspondentes ao conteúdo de água e análise granulométrica do solo, em porcentagem, encontram-se na Tabela 1. Observa-se que os valores não oscilaram entre as camadas na profundidade de 0,0 a 0,30 m, deste modo não sendo um indicador de mudança dos valores de resistência mecânica à penetração (RP). Os valores de umidade se encontram dentro do intervalo considerado ideal para a mensuração de RP, entre 20 a 40% do teor de água no solo (MOLIN et al., 2012).

Tabela 1. Valores médios umidade, argila, silte e areia (em porcentagem), nas diferentes camadas amostradas em um Neossolo.

Profundidade (m)	Umidade Argila Silte Areia (%)			
	Umidade	Argila	Silte	Areia
0,0-0,05	39	62	24	14
0,05-0,10	39	62	25	13
0,10-0,20	40	63	25	12
0,20-0,30	40	63	24	13
0,0-0,30	39	62	24	13

Verifica-se que, ao longo do perfil amostrado (0 a 0,30 m profundidade), a RP apresentou valores médios equivalentes a 3,19 MPa para equipamento de impacto e 1,78 MPa para o eletrônico (Tabela 2), sendo que os valores máximos constatados foram de 4,73 MPa e 2,37 MPa para respectivos penetrômetros. Diferenças nos valores de RP ocorreram em função das características dos equipamentos e do seu modo operação, resultados esses corroborados por Roboredo *et al.* (2010), que relatam valores superiores no PI em comparação ao PE, chegando a valores de 4,23 MPa,

superiores ao nível crítico de desenvolvimento radicular, de 2,0 Mpa (TORMENA et al., 1998).

Tabela 2. Estatística descritiva da resistência mecânica à penetração do solo pelo penetrômetro de impacto (PI) e penetrômetro eletrônico (PE) (MPa), densidade do solo (Ds) (g cm^{-3}) e porosidade total do solo (Pt) ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-1}$).

Camada (m)		RP PI	RP PE	Ds (g cm^{-3})	Pt ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-1}$)
		---- (MPa) ----	----		
0,0-0,05	Min.	1,79	0,68	1,15	0,45
	Méd.	2,53	1,20	1,18	0,46
	Máx.	3,89	1,50	1,22	0,48
	Desv. Pa	0,53	0,22	0,05	0,08
	C.V. (%)	19,9	18,6	5,5	3,6
0,05-0,10	Min.	2,71	0,96	1,37	0,39
	Méd.	3,36	1,45	1,41	0,40
	Máx.	4,77	2,08	1,45	0,43
	Desv. Pa	0,19	0,23	0,12	0,25
	C.V. (%)	15,1	15,8	6,5	2,4
0,10-0,20	Min.	2,71	1,33	1,53	0,36
	Méd.	3,36	1,69	1,58	0,38
	Máx.	4,79	2,37	1,62	0,40
	Desv. Pa	0,50	0,26	0,23	0,21
	C.V. (%)	15,1	15,5	5,2	3,0
0,20-0,30	Min.	2,69	1,40	1,62	0,41
	Méd.	3,55	1,86	1,67	0,42
	Máx.	5,18	2,66	1,72	0,44
	Desv. Pa	2,11	1,12	0,24	0,21
	C.V. (%)	16,9	15,3	5,5	4,4
0,0-0,30	Min.	2,62	1,39	1,42	0,41
	Méd.	3,19	1,78	1,46	0,42
	Máx.	4,37	2,35	1,50	0,46
	Desv. Pa	1,16	0,96	0,21	0,10
	C.V. (%)	12,3	15,3	7,5	4,4

*Mínimo (Min), médio (Méd), máximo (Máx), desvio padrão (Des.Pad), coeficiente variação (C.V).

A variabilidade dos atributos físicos, segundo Pimentel-Gomes e Garcia (2002) podem ser classificadas em: baixa ($CV < 12\%$); média ($12\% < CV < 60\%$); e alta ($CV > 60\%$). No presente estudo, os valores de Ds e Pt resultaram em CV baixo, ao passo que a RP apresentou valores de variabilidade considerados médios (12,3% a 19,2%) (Tabela 2).

Coefficiente de variação até o limite de 20%, observados nos valores de RP, também foram encontrados por Lima *et al.* (2014), Cavalcante et al. (2011) e Santos et al. (2012), que obtiveram valores de CV próximos a 50%. As oscilações do CV da RP podem estar associados as características inerentes que cada equipamento possui para obter a resistência do solo a penetração. Além da influência da velocidade de penetração, uma vez que o operador tende a estabilizar a velocidade somente após o cone atingir profundidades maiores (HOFFER et al., 2015). Na Figura 1 são apresentados os valores de RP no intervalo de 0 a 0,30 m profundidade, pelos penetrômetros de impacto e eletrônico. De forma geral, os valores obtidos pelos dois penetrômetros divergiram significativamente, sendo que o PI apresentou valores superiores de RP quando comparado com o PE, comportamento também observado por outros autores como Beutler et al. (2007) e Roboredo et al., (2010).

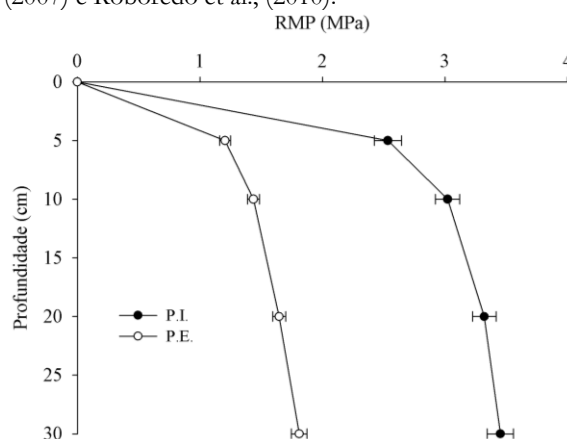


Figura 1. Resistência do solo à penetração na amostragem realizada em setembro de 2016 na camada de 0,0 a 0,30 m, com os penetrômetros de impacto (PI) e eletrônico (PE). As barras indicam os valores de intervalo de confiança a 5%.

De acordo com Beutler et al. (2007) a diferença entre os valores de RP em função do equipamento de penetrometria pode ser relacionada ao modo de operação. O valor da RP do penetrômetro de impacto é determinado por uma série de cálculos descritos por Stolf (1991), além de registrar a resistência à penetração (RP) máxima por unidade de profundidade. Por outro lado, no penetrômetro eletrônico a RP é determinada diretamente pela pressão exercida contra o solo com velocidade constante de $0,035 \text{ m s}^{-1}$, determinando valores médios de RP. Os valores obtidos com os penetrômetros de impacto e eletrônico apresentam correlação significativa entre si

ao nível de 5 e 1% (Figura 2), sendo este comportamento constatados em estudos de Beutler et al. (2007) e Roboredo et al. (2010), os quais verificaram correlação ao nível de 0,74 e 0,98, respectivamente, para o P.I. e P.E.

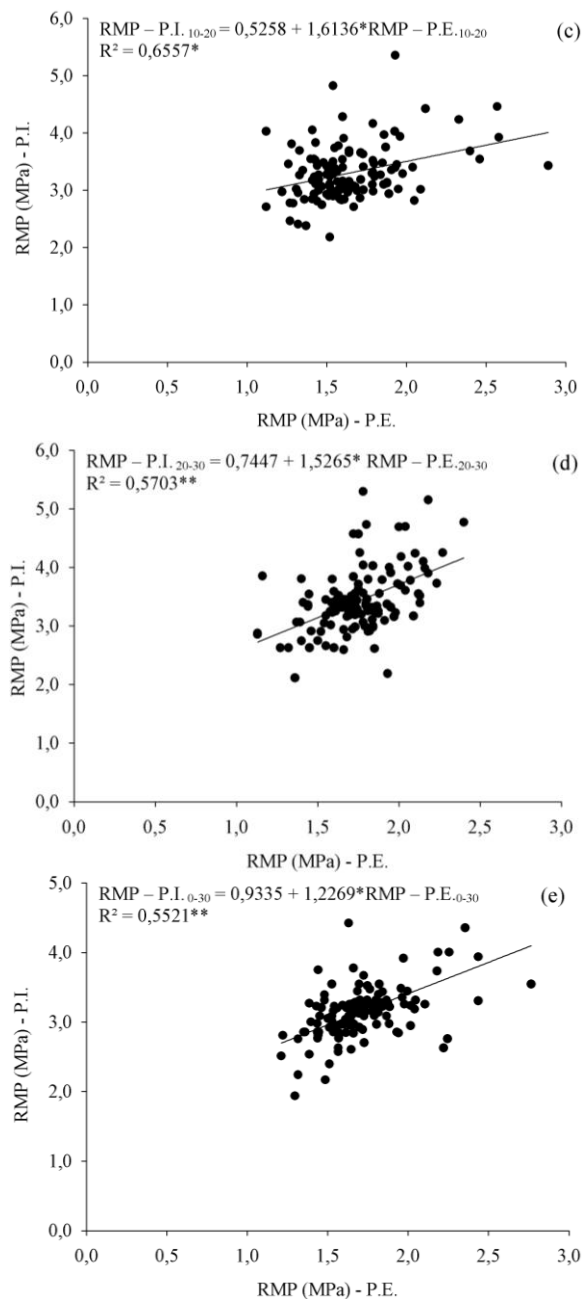
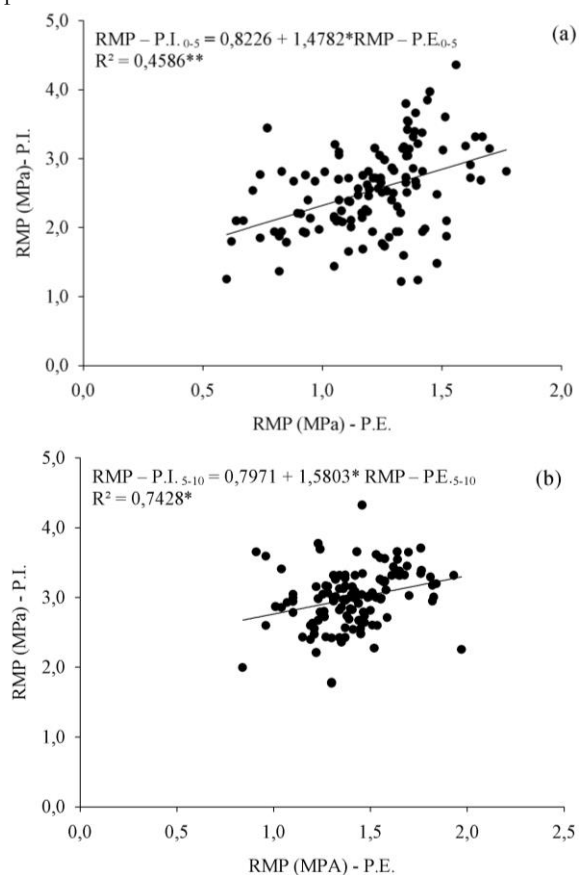


Figura 2. Correlação entre valores determinados com penetrômetro de impacto (PI) e eletrônico (PE), em MPa, nas camadas (a) 0,0-0,05 m; (b) 0,05-0,10 m; (c) 0,10-0,20 m; (d) 0,20-0,30 m; e (e) 0,0-0,30 m.
 Significativo a 5% e 1%** de probabilidade; ns não-significativo.

A correlação existente entre os valores determinados pelos dois equipamentos de penetrometria com os indicadores de qualidade física

do solo (Tabela 3), foi maior na RP obtida pelo penetrômetro de impacto com a Ds e Pt em comparação ao equipamento eletrônico, indicando maior eficiência na estimativa das condições de compactação do solo. Com exceção da porosidade total na camada de 0,05-0,10 m profundidade, o penetrômetro de impacto apresentou correlação significativa com a densidade aparente do solo e porosidade total. Estes resultados e assemelham aos obtidos por Souza et al. (2014a), que observaram correlação positivas entre a RP e a densidade do solo, bem como correlação negativa entre a RP e porosidade total determinada por esse equipamento.

Torres et al. (2012), avaliando a correlação entre a RP determinada com o penetrômetro de impacto e a Ds, em áreas de pastagem com a forrageira Tifton, em manejos com e sem irrigação, observaram valores significativos em ambos sistemas até a profundidade de 0,60 m, assim como Beutler et al. (2002) encontraram altas correlações entre a resistência à penetração e a densidade do solo sob Latossolo Vermelho eutroférico.

Tabela 3. Correlações de Pearson entre os valores de resistência mecânica a penetração do solo (RP) dos penetrômetros de impacto (PI) e eletrônico (PE), Densidade aparente do solo (Ds) e Porosidade total (Pt) avaliada nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,0-0,30 m.

Camada (m)	(PI x Ds)	(PE x Ds)	(PI x Pt)	(PE x Pt)
0.0-0.05	0,82*	0,52	-0,75*	-0,49
0.05-0.10	0,79*	0,87*	-0,53	-0,64*
0.10-0.20	0,79*	0,65*	-0,87*	-0,72*
0.20-0.30	0,75*	0,50	-0,68*	-0,38
0.0-0.30	0,91*	0,51	-0,89*	-0,58

* correlações significativas a 5% de probabilidade (Teste t).

Ao se analisar a correlação existente entre os valores de RP determinadas com o penetrômetro eletrônico com os atributos físicos do solo, foi observada correlação significativa com a densidade do solo apenas nas camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m de profundidade e com a porosidade total nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m de profundidade. Este comportamento contradiz o estudo desenvolvido por Souza et al. (2014b), que não encontraram correlação significativa entre a RP obtida pelo penetrômetro eletrônico e a Ds e Pt até a profundidade de 0,20 m.

Beutler et al. (2007), analisando a correlação existente entre a RP determinada com o penetrômetro eletrônico e a densidade e porosidade total do solo, constatou efeito significativo para ambas as variáveis

até a profundidade de 0,20 m em um Latossolo Vermelho distrófico de textura média ($r = 0,86$ e $r = -0,99$ respectivamente para Ds e Pt) e um Latossolo Vermelho eutroférico de textura argilosa ($r = 0,97$ e $r = -0,86$ respectivamente para Ds e Pt), corroborando com os resultados obtidos neste estudo.

De forma geral, observa-se que a densidade do solo apresentou correlação positiva com a RP, ao passo que a porosidade total demonstrou correlação negativa. Isto é, quanto maiores os valores de densidade do solo maior será a RP e, conseqüentemente, menor a presença de espaços porosos. De acordo com Richart et al. (2005), o aumento excessivo da densidade do solo pode acarretar em redução no volume total de poros, menor taxa de infiltração de água e maior resistência do solo a penetração, devido ao arrançamento e adensamento das partículas do solo que, por sua vez, refletem nas características do sistema poroso e no crescimento radicular.

Segundo Lima et al. (2013), embora esses penetrômetros apresentem princípios de funcionamento distintos, ambos apresentam a mesma finalidade. Deste modo, torna-se necessário conhecer as suas características inerentes e o comportamento e desempenho destes equipamentos na avaliação da RP, avaliando a sua relação com os atributos de qualidade física do solo.

CONCLUSÃO

Os penetrômetros de impacto e eletrônico apresentam similaridade no comportamento, entretanto, o penetrômetro de impacto representa melhor as condições físicas do solo relacionadas à compactação.

REFERÊNCIAS

- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Comparação de penetrômetros na avaliação da compactação de Latossolos. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.27, n.1, p.146-151, 2007.
- CAVALCANTE, E. G. S. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo sob diferentes usos e manejos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande-PB, v. 15, n. 3, p. 237-243, 2011.

- DALCHIAVON, F. C. et al. Produtividade da soja e resistência mecânica à penetração do solo sob sistema plantio direto no Cerrado brasileiro. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia-GO, v. 41, n. 1, p. 8-19, 2011.
- EURICH, J. et al. Avaliação visual da qualidade da estrutura do solo em sistemas de uso das terras. *Ceres*, Viçosa, v. 61, n.6, p. 1006-1011, 2014.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos e análise de solo*. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.
- HOFFER, H. et al. Variabilidade espacial do estado de compactação do solo em um sítio experimental de *Mimosa scabrella* Benth. *Enciclopédia Biosfera*, Goiânia, v.11, n.21, p.1903-1914, 2015.
- IAPAR. *Cartas climáticas segundo Köppen*. Disponível em: < <http://www.iapar.br/modules/conteudo/> >. Acesso em 20 de Outubro de 2016.
- LIMA, R. P.; SILVA, A. R.; OLIVEIRA, D. M. S. Análise de trilha de atributos físicos na resistência à penetração de um Latossolo Amarelo. *Revista de Agricultura Neotropical*, Cassilândia-MS, v. 1, n. 1, p. 65-74, 2014.
- LIMA, R. P. de; DE LEÓN, M. J.; SILVA, A. R. da. Comparação entre dois penetrômetros na avaliação da resistência mecânica do solo à penetração. *Revista Ceres*, Viçosa, v. 60, n.4, p. 577-581, 2013.
- MAZURANA, M. et al. Propriedades físicas do solo e crescimento de raízes de milho em um Argissolo Vermelho sob tráfego controlado de máquinas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.37, n.5, p. 1185-1195, 2013.
- MOLIN, J. P.; MAGALHÃES, R. P. de; FAULIN, G. D. C. Análise espacial da ocorrência do índice de cone em área sob semeadura direta e sua relação com fatores do solo. *Engenharia Agrícola*, Campina Grande, v.26, n. 2, p.442-452, 2006.
- MOLIN, J. P.; DIAS, C. T. dos S.; CARBONERA, L.. Estudo de penetrometria: Novos equipamentos e amostragem correta. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 16, n.5, p.584-590. 2012.
- GOMES, F. P.; GARCIA, C. H. *Estatística aplicada a experimentos agrônomicos e florestais*. 1 ed., FEALQ, Piracicaba, 2002, 307p.
- RICHART, A. et al. Compactação do solo: causas e efeitos. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.
- ROBOREDO, D. et al., C. G. Uso de dois penetrômetros na avaliação da resistência mecânica de um Latossolo vermelho distrófico. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.30, n.2, p.308-314, 2010.
- SANTOS, K. S. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande-PB, v. 16, n. 8, p. 828-835, 2012.
- SILVEIRA, D. C. et al. Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo Amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.34, n.3, p.659-667, 2010.
- SOUZA, J. M. de. et al. Atributos físicos do solo em lavoura de cafeeiro conilon submetida à subsolagem. *Engenharia na agricultura*, Viçosa, v.22, n.5, p.413-425, 2014a.
- SOUZA, M. F. de. et al. Velocidade de infiltração básica de água como indicador da qualidade porosa do solo. *Revista Agrogeoambiental*, v. 6, n. 2, 83-93, 2014b.
- STOLF, R. Teoria e teste experimental de formulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.15, n.2, p.229-235, 1991.
- TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.22, n.3, p.573-581, 1998.
- TORRES, J. L. R. et al. Resistência à penetração em área de pastagem de capim Tifton, influenciada pelo pisoteio e irrigação. *Bioscience Journal*, Uberlândia, v. 28, Supplement. 1, p. 232-239, 2012.