Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

**Comparação entre três penetrômetros na avaliação da resistência mecânica do
solo à penetração de um latossolo vermelho eutroférico**

Thiago Antonio Villa Menezes

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2018

Thiago Antonio Villa Menezes
Engenheiro de Biosistemas

**Comparação entre três penetrômetros na avaliação da resistência mecânica do
solo à penetração de um latossolo vermelho eutroférico**

Orientador:

Prof. Dr. **MURILO MESQUITA BAESSO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Menezes, Thiago Antonio Villa

Comparação entre três penetrômetros na avaliação da resistência mecânica do solo à penetração de um latossolo vermelho eutroférico / Thiago Antonio Villa Menezes. - - Piracicaba, 2018.

43 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Compactação do solo 2. Friabilidade 3. Penetrômetro de impacto 4. Índice de cone L. . I. Título

DEDICATÓRIA

Aos meus pais,
Miriam Nazaré Villa Menezes e
Célio Reginaldo Menezes

À humanidade,
ao planeta,
ao Brasil.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece a:

Alex Max da Costa Andrade pelo invaluable auxílio na coleta de dados

Fernando de Oliveira Bussiman pela amizade e direção da análise estatística

Silvia Maria Zinsly pelo profissionalismo, compreensão, empatia e carinho

Prof. Dr. Murilo Mesquita Baesso pela orientação e fé do início ao fim

Profa. Dra. Tamara Maria Gomes também pela orientação e solicitude

Prof. Dr. Quirijn de Jong van Lier pela introdução à ciência da física do solo

Prof. Dr. Reginaldo Barboza da Silva pela elucidação de tópicos da compactação

Oscar dos Santos Neto pela tortuosa jornada no laboratório de mecânica do solo

A Divisão de Prod. Agropec. da Prefeitura do Campus da USP “Fernando Costa”

Davilmar Aparecida Domingues Collevatti e

Paula Leme Mendes de Oliveira por mostrar o caminho das pedras do PPGESA

Irineu Pedro de Sousa Andrade e

Maicon Javorski pelo convívio na nossa breve, mas inesquecível república

Stefania Rosalen e

Gilmar Batista Grigolon pela amizade, cumplicidade e carinho incondicionais

Matheus Luís Docema pela nossa inquestionável e veterana irmandade

Tatiana Fernanda Canata por acolher um ex-colega de classe no dia zero

Associação dos Pós-Graduandos da ESALQ (2015-2016) pelo socorro

Vila Estudantil da Graduação e Pós-Graduação (2015) pela lição

José Paulo Molin,

Leandro Maria Gimenez,

Marcos Milan e

Taitiâny Karita Bonzanini Fuzer pelas respectivas disciplinas

Motoristas, passageiros, cozinheiros, faxineiros, seguranças e

tantos outros estranhos que não conheci, mas de quem dependi

Miriam Nazaré Villa Menezes e

Célio Reginaldo Menezes, mãe e pai

E à Energia Celestial que governa

O autor agradece especialmente pelo auxílio financeiro a:

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq

BIOGRAFIA

Thiago Antonio Villa Menezes nasceu em 1989 em Leme, no interior do oeste paulista. Ingressou na primeira turma do primeiro curso de graduação em Engenharia de Biosistemas da América Latina, segundo a Universidade de São Paulo, na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos em 2009. Graduiu-se em abril de 2015. Ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas em agosto do mesmo ano.

EPÍGRAFE

*“The value of beauty and inspiration is very much underrated, no question.
But I want to be clear: I’m not trying to be anyone’s savior.
I’m just trying to think about the future and not be sad.”*

Elon Musk

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	12
1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO DA LITERATURA	15
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.1. Experimentos de Campo	23
3.1. Análise Estatística	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5. CONCLUSÃO.....	39
REFERÊNCIAS	40

RESUMO

Comparação entre três penetrômetros na avaliação da resistência mecânica do solo à penetração de um latossolo vermelho eutroférico

Segundo estudo de 2015 da FAO, 33% da área agricultável mundial estão degradados. Um dos principais problemas é a compactação do solo, causada pelo tráfego de máquinas ou animais em solo acima da capacidade de suporte de carga ou fora da condição de trafegabilidade. A compactação do solo desencadeia problemas ambientais e agrônômicos como erosão, lixiviação e baixa produtividade. Sua reversão é um processo lento, caro, violento e ineficiente, por isso a melhor saída é preveni-la. Para tanto, uma recomendação é mapeá-la regularmente. Um indicador indireto da compactação é a resistência (ou impedância) mecânica do solo à penetração. O penetrômetro é o instrumento que mede a resistência da introdução de uma haste de ponta cônica no solo; teoricamente, solos mais compactados oferecem maior resistência. Há uma variedade de modelos de penetrômetro no mercado e literatura: bancada ou campo, manual ou automático, estático (penetrógrafo) ou dinâmico (de impacto), com ou sem registro eletrônico de dados etc. Naturalmente, surge a dúvida se é possível comparar dados de penetrômetros diferentes. Alguns trabalhos debruçaram-se sobre essa hipótese, mas a literatura ainda é escassa. Nos poucos artigos publicados, não há consenso a respeito da comparabilidade entre penetrômetros diferentes, que ora concordam, ora divergem. No presente trabalho, compararam-se os penetrômetros de campo Sondaterra PI-60 (impacto), Falker PLG1020 (manual) e Falker Solotrack (automático). O experimento observacional foi realizado em um latossolo vermelho eutroférico de texturas argilosa, argiloarenosa e franco-argiloarenosa em Pirassununga-SP. A resistência mecânica foi avaliada simultaneamente pelos três penetrômetros em oito camadas entre 0,00-0,40 m, abaixo, dentro e acima do intervalo friável do local (10,2-35,1%(v/v)). Sob a mesma condição de umidade do solo, os três penetrômetros concordaram (não houve diferença estatística a 5%) em 58% das observações. Acordaram mais entre si os penetrômetros manual-automático (76%) e impacto-automático (70% das observações). Mesmo onde divergiram, as diferenças mínima, média e máxima de resistência foram respectivamente de 0,61; 0,91 e 1,23 MPa (excluindo-se a camada superficial 0,00-0,05 m), não interferindo no diagnóstico prático da compactação do solo. Em geral, PI-60 > Solotrack > PLG1020 (2,31; 2,14 e 1,91 MPa respectivamente). A compatibilidade entre penetrômetros abaixo, dentro e acima do intervalo friável foi a mesma: 31%, 36% e 33% das observações na mesma ordem. Não houve convergência em apenas três observações (de 120), todas na camada superficial. A resistência variou inversamente com a umidade do solo nos três penetrômetros, concordando com resultados semelhantes na literatura. Em média, a resistência diminuiu de 0,0596 MPa a cada acréscimo de 1% na umidade volumétrica ($R^2 = 0,44$). Concluiu-se que é seguro comparar valores de resistência de penetrômetros diferentes desde que tenham sido coletados sob a mesma condição de umidade do solo.

Palavras-chave: Compactação do solo; Friabilidade; Penetrômetro de impacto; Índice de cone.

ABSTRACT

Comparison between three penetrometers in the evaluation of the soil penetration mechanical resistance of a red eutroferric latosol

According to a 2015 FAO study, 33% of the world's arable land is degraded. One of the main problems is soil compaction, caused by the traffic of machines or animals on soil over the load bearing capacity or outside of the trafficable condition. Soil compaction triggers environmental and agronomic problems such as erosion, leaching and low productivity. Its reversal is a slow, expensive, violent and inefficient process, so the best way out is to prevent it. To do so, a recommendation is to map it regularly. An indirect indicator of compaction is the mechanical resistance (or impedance) of the soil to penetration. The penetrometer is the instrument that measures the resistance of the introduction of a conical tipped rod into the ground; theoretically, more compacted soils offer greater resistance. There are a variety of penetrometer models in the market and literature: bench or field, manual or automatic, static (penetrograph) or dynamic (impact), with or without electronic data record etc. Of course, the question arises whether it is possible to compare data from different penetrometers. Some papers have dealt with this hypothesis, but the literature is still scarce. In the few articles published, there is no consensus about the comparability between different penetrometers, which now agree, or differ. In the present work, we compared the field sensors Sondaterra PI-60 (manual dynamic), Falker PLG1020 (manual static) and Falker Solotrack (automatic static). The observational experiment was carried out in a red eutroferric latosol (USDA oxisol) of clay, sandy clay and sandy clay loam textures in Pirassununga-SP, Brazil. The mechanical strength was evaluated simultaneously by the three penetrometers in eight layers between 0,00-0,40 m, below, within and above the friable interval of the site (10.2-35.1%(v/v)). Under the same soil moisture condition, the three penetrometers agreed (there was no statistical difference at 5%) in 58% of the observations. Best agreed among themselves the automatic-manual static (76%) and automatic-dynamic (70% of observations) penetrometers. Even where they diverged, the minimum, mean and maximum resistance differences were respectively 0.61; 0.91 and 1.23 MPa (excluding the superficial layer 0.00-0.05 m), values that do not interfere with the practical diagnosis of soil compaction. In general, PI-60 > Solotrack > PLG1020 (2.31, 2.14 and 1.91 MPa respectively). The compatibility between penetrometers below, within and above the friable interval was the same: 31%, 36% and 33% of observations in the same order. There was no convergence in only three observations (of 120), all in the superficial layer. The resistance varied inversely with soil moisture in the three penetrometers, agreeing with similar results in the literature. On average, the resistance decreased by 0.0596 MPa for each increment of 1% in the volumetric humidity ($R^2 = 0.44$). It was concluded that it is safe to compare resistance values from different penetrometers provided they have been collected under the same soil moisture condition.

Keywords: Soil compaction; Friability; Dynamic penetrometer; Cone index

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização dos locais L1-L5 no campus da PUSP-FC. Fonte: Google Maps (out/17).	23
Figura 2. Penetrômetro de impacto da marca Sonda Terra Equipamentos, modelo PI-60.	25
Figura 3. Penetrômetro eletrônico da marca Falker, modelo PLG 1020.....	25
Figura 4. Penetrômetro automático da marca Falker, modelo Solotrack PLG 5300.	26
Figura 5. Relação entre resistência mecânica e umidade do solo dos cinco locais sobrepostos.	29
Figura 6. Perfis de RMSP por penetrômetro e umidade do solo no local L1.	31
Figura 7. Perfis de RMSP por penetrômetro e umidade do solo no local L2.	32
Figura 8. Perfis de RMSP por penetrômetro e umidade do solo no local L3.	34
Figura 9. Perfis de RMSP por penetrômetro e umidade do solo no local L4.	35
Figura 10. Perfis de RMSP por penetrômetro e umidade do solo no local L5.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Granulometria, intervalo friável, umidade do solo e classificação dos locais L1-L5.....	27
Tabela 2. Quadro de análise da variância dos dados de RMSP dos locais L1-L5.....	28
Tabela 3. Médias de RMSP por penetrômetro e umidade do solo.	29
Tabela 4. Perfis de RMSP por penetrômetro e umidade do solo no local L1.	30
Tabela 5. Perfis de RMSP por penetrômetro e umidade do solo no local L2.	32
Tabela 6. Perfis de RMSP por penetrômetro e umidade do solo no local L3.	33
Tabela 7. Perfis de RMSP por penetrômetro e umidade do solo no local L4.	35
Tabela 8. Perfis de RMSP por penetrômetro e umidade do solo no local L5.	36
Tabela 9. Número de concordâncias entre penetrômetros por penetrômetro, umidade do solo e local.	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASABE	American Society of Agricultural and Biological Engineers
RMSP	Resistência mecânica do solo à penetração

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o futuro do solo do planeta intensificou-se rapidamente nos últimos anos, dado seu estado de degradação a nível global. Um relatório recente das Nações Unidas aponta que um terço de toda a terra arável mundial sofre de algum tipo de degradação do solo, como erosão, salinização ou compactação do solo (FAO, 2015). Outro relatório, da Economics of Land Degradation Initiative (ELD), aponta que a degradação do solo custa ao planeta US\$ 10,6 trilhões por ano, equivalente a 17% de todo o produto interno bruto mundial. Ao mesmo tempo, se medidas de gestão sustentável fossem adotadas para o solo a nível global, seria possível injetar US\$ 75,6 trilhões na economia mundial através de geração de empregos e produção agropecuária. Se nenhuma medida corretiva for tomada, estima-se que 849 milhões de hectares, ou toda a área do território brasileiro, tornar-se-ão impróprios para produção agropecuária até 2050. O problema da degradação do solo tende a se desenrolar em conflitos econômicos, sociais e políticos, além da preocupação ambiental.

Uma das formas mais preocupantes de degradação do solo é a compactação do solo. A compactação é a redução do volume poroso (ou aumento da densidade) do solo, causada pelo tráfego de máquinas, animais ou pessoas sobre o solo acima da sua capacidade de carga e/ou fora da condição de trafegabilidade. A pressão mecânica exercida por esses agentes expulsa os fluidos do solo e aproxima suas partículas constituintes, acarretando em diversos problemas de ordem ambiental e agrônômica. O solo compactado dificulta ou impede o crescimento radicular, interferindo na germinação, crescimento e desenvolvimento da planta. Além disso, no solo compactado, a difusão do ar e infiltração e drenagem da água ficam comprometidas, acarretando problemas como sufocamento radicular, escoamento superficial e baixa absorção d'água.

A compactação do solo é preocupante porque geralmente manifesta-se de forma gradual e oculta no subsolo. Quando aparecem sintomas visíveis na superfície, pode ser economicamente inviável revertê-la. O processo de reversão da compactação (ou descompactação), além de ser caro, é pouco eficiente no longo prazo, apresentando apenas um alívio temporário. A melhor forma de lidar com a compactação do solo é preveni-la, o que pode ser feito com medidas como planejamento e controle de tráfego, incorporação de matéria orgânica, adaptação do maquinário e adoção de sistemas de cultivo menos mecanizados. Independente do tratamento empregado, o primeiro passo para a análise do estado de compactação do solo é mapeá-lo em profundidade e extensão.

A compactação do solo pode ser observada por diversos indicadores: densidade do solo, macroporosidade, densidade radicular, taxa de infiltração e resistência do solo à penetração. Esta última geralmente é preferida porque pode ser mensurada rapidamente com o penetrômetro, um instrumento portátil.

A avaliação feita na mesma área pode ser enviesada pela variabilidade espacial e temporal, erro do operador e tipo de equipamento. Um resultado falso pode indicar que o solo precisa ser descompactado quando não precisa e vice-versa. O penetrômetro automático mantém constante a velocidade de penetração da sonda, o que não é tão fácil de alcançar manualmente. Contudo, o penetrômetro manual é mais fácil de ser transportado e seu uso é mais disseminado que o anterior. Por essas razões, esse projeto tem por objetivo comparar os equipamentos, além de investigar a influência de características texturais, estrutura e umidade nas leituras da resistência mecânica do solo à penetração.

2. REVISÃO DA LITERATURA

O uso dos tratores, implementos agrícolas e autopropelidos torna-se cada vez mais indispensável na agricultura moderna. Atividades como preparo do solo, adubação, pulverização e colheita são desenvolvidas com o auxílio dessas máquinas, resultando em aumento de produtividade e possibilitando o cultivo de grandes áreas. O trator é um dos responsáveis pelo progresso da atividade agrícola, tendo sua utilização sido impulsionada no final da Segunda Grande Guerra, porém apresentando configuração e aspecto rudimentares, em comparação com o que se observa nos dias atuais.

Pesquisas evidenciam que o avanço da tecnologia tem proporcionado ao mercado máquinas e implementos agrícolas modernos e com ótimo potencial operacional, em grande parte devido à necessidade de se obterem níveis de produtividade elevados. No Brasil, por exemplo, o índice de produtividade agrícola brasileiro multiplicou-se 3,7 vezes de 1975 a 2010, correspondendo a um incremento de produtividade médio de 3,6% ao ano ao longo dos 35 anos do período (FORNAZIER; VIEIRA FILHO, 2013). Segundo os autores, o aumento da quantidade de produto não se deve ao aumento da quantidade insumos, senão por ganhos de eficiência na produção, dos quais faz parte o incremento na capacidade operacional do maquinário agrícola.

No entanto, existem também desvantagens na utilização de máquinas agrícolas, com destaque para as alterações físicas e biológicas do solo, como a redução do tamanho dos poros do solo e o aumento da resistência à penetração das raízes (TULLBERG et al., 2018). A essas alterações dá-se o nome de degradação do solo.

Das três principais formas de degradação do solo associadas ao uso da terra, a saber, compactação, erosão e salinização, a primeira, diferente das demais, acumula-se de forma gradual, oculta e despercebida. Por isso, sua detecção, diagnóstico e manejo não são processos corriqueiros. Quando afinal se expressam visualmente os sintomas da compactação, na maioria das vezes já se tornou financeiramente inviável revertê-los. Por isso, no curto prazo a estratégia disponível e de imediato efeito e urgência é a prevenção, que começa com o mapeamento e quantificação da compactação do solo na área cultivada. O manejo subsequente depende da distribuição e grau de compactação. Assim, o diagnóstico preciso e real do estado de degradação do solo é primordial para sustentar, embasar e dimensionar o processo de tomada de decisão em seguida.

A degradação do solo é resultado de sua utilização para a produção agrícola. Os problemas derivados deste processo de degradação atingem diretamente os agricultores pela redução do seu potencial produtivo. A utilização de máquinas cada vez mais pesadas tem

causado grande impacto na estrutura do solo (desestruturação). A desestruturação do solo causa a pulverização da camada superficial e a compactação das camadas mais profundas do solo. A estrutura do solo diz respeito ao arranjo das partículas do solo e do espaço poroso existente entre elas. Para a agricultura, a estrutura do solo é uma das mais importantes propriedades, relacionando-se diretamente entre solo-planta. A estrutura do solo pode ser alterada em função do manejo inadequado - máquinas (aspecto físico) ou adubação incorreta (aspecto químico), além da influência climática e biológica.

O manejo inadequado e o uso intensivo do solo também provocam desestruturação. Na camada mais superficial, o solo fica desintegrado, pulverizado. Na camada mais profunda, o solo fica compactado pelo uso sistemático de máquinas pesadas. Com o tempo, forma-se uma camada dura e compactada embaixo da terra e uma camada fofa e pulverizada em cima, que, teoricamente, seria o ideal para receber a semente.

A compactação do solo é considerada uma preocupação importante na agricultura moderna, causada principalmente devido ao aumento do tamanho e do peso das máquinas agrícolas, possuindo assim potencial de compactar o solo inclusive em camadas mais profundas (SIVARAJAN et al., 2018).

SZATANIK-KLOC et al., (2018), ao discutirem sobre as modificações causadas pela degradação do solo, afirmam que a densidade de carga aplicada a ele influencia diretamente no surgimento de camadas compactadas, e estas afetam diretamente o desenvolvimento das raízes e a capacidade de troca catiônica.

Diante dos fatos expostos, acompanhar os atributos físicos do solo durante todo o ciclo produtivo é imprescindível ao planejamento das práticas de cultivo a serem adotadas, pois sua observação contínua permite monitorar a eficiência do sistema de manejo adotado (TORRES et al., 2015). A propriedade física do solo está relacionada diretamente a densidade do solo, a resistência do solo a penetração de raízes e a formação de agregados estáveis, fatores estes que podem limitar o desenvolvimento e a produtividade da cultura implementada (DE LIMA; DE LEÓN; DA SILVA, 2013).

A compactação do solo pode ser definida como uma alteração na estrutura física do solo, onde ocorre a diminuição dos espaços internos dos poros, quando aplicada uma pressão externa proveniente do tráfego de máquinas agrícolas, equipamentos de transporte ou animais, tais ações resultam na expulsão do ar e água que se encontram dentro desses poros, levando a uma redução na disponibilidade desses elementos no solo para a planta, com isso dificultando o bom rendimento da cultura (SZYMCZAK et al., 2014).

A compactação do solo pode reduzir a infiltração de água, provocar a erosão e aumentar a resistência mecânica ao crescimento das raízes e influenciar nas trocas gasosas.

Influenciando também outros atributos físicos do solo como aeração, temperatura e resistência mecânica à penetração que influenciam diretamente nos atributos químicos (disponibilidade dos nutrientes para as plantas) e biológicos (SAMPIETRO; LOPES; REICHERT, 2015).

A competitividade e a sustentabilidade do sistema produtivo agrícola têm levado os agricultores a buscarem formas de intensificar seus cultivos, utilizando sistemas de preparo que agredam menos o solo, em virtude da erosão e da degradação demasiada dos solos agrícolas, promovidas pelo preparo periódico do solo (BELLÉ et al., 2014). Devido a crescente utilização por parte dos agricultores de sistemas que mobilizam menos o solo, como o plantio direto (PD), muitos solos passaram a apresentar problemas de compactação associado ao não revolvimento do solo (MAZURANA et al., 2011), que tem resultado em redução da produtividade (ROBOREDO et al., 2010).

Descompactar as camadas de solo na produção agrícola pode ser uma alternativa para atingir uma boa produtividade, os equipamentos mais utilizados para modificar esses sistemas são o subsolador e o escarificador, porém essas ferramentas necessitam de um alto custo para implantação e demandam alto valor energético (OLIVEIRA FILHO et al., 2015).

Existem diferentes maneiras para a detecção de camadas compactadas por meio de propriedades físicas, como a densidade do solo, porosidade e resistência a penetração. Entretanto a resistência a penetração do solo é a variável física que melhor representa a detecção das camadas compactadas e a facilidade de crescimento radicular da planta (OLIVEIRA FILHO et al., 2015). MACHADO & LANÇAS (2014), afirmam em seu trabalho que a resistência do solo a penetração (RSP) é um problema que atinge a maioria das áreas agricultáveis do Brasil, sendo provocada por diversos fatores, tais como o excesso de carga e o tráfego intenso de máquinas; uso de pneus inadequados para o valor de carga aplicada e com pressões de inflação fora do recomendado; tráfego de máquinas com o teor de água do solo não recomendado e outros problemas.

A resistência do solo a penetração está ligada diretamente a compactação do solo, podendo ser utilizada como seu indicador, pois descreve a resistência física que o solo exerce sobre a raiz que tenta se mover através dele, sendo diretamente influenciado pela densidade e porosidade (MAZURANA et al., 2013).

O principal problema na avaliação da resistência do solo à penetração está relacionada a grande variabilidade de valores encontrados na sua avaliação, este fato ocorre devido a grande quantidade de variáveis controladoras. Com destaque a densidade e umidade do solo, tamanho de partículas, conteúdo de matéria orgânica entre outros.

A resistência do solo à penetração é diretamente proporcional ao teor de argila (MOLIN; MAGALHÃES; FAULIN, 2006; ASSIS et al., 2009; VAZ et al., 2011; MOLINA JR et al.,

2013) e densidade do solo (MOLIN; MAGALHÃES; FAULIN, 2006; ROBOREDO et al., 2010) e inversamente proporcional ao teor de umidade (LIMA et al., 2007; ASSIS et al., 2009; SILVEIRA et al., 2010; MOLINA JR et al., 2013) e matéria orgânica no solo (MOLIN; MAGALHÃES; FAULIN, 2006).

Além disso, algumas dessas propriedades são relacionadas entre si. O teor de água e matéria orgânica são diretamente proporcionais ao conteúdo de argila, e a densidade do solo e a matéria orgânica são inversas (MOLIN; MAGALHÃES; FAULIN, 2006).

MOLIN; MAGALHÃES e FAULIN (2006) notam que solos com mais argila e matéria orgânica possuem também maior capacidade de campo e, por isso, é maior a quantidade de água necessária para alcançar o teor de umidade de 70% da capacidade de campo, que segundo HENDERSON et al. (1988 apud MOLIN, 2006) é o ponto em que a umidade do solo começa a mascarar de forma mais intensa os valores de índice de cone. MOLIN; MAGALHÃES e FAULIN (2006) observam correlação negativa entre resistência do solo à penetração e argila e atestam ser este um resultado incoerente, atribuindo-o ao fato da região de mais argila estar acompanhada de alta umidade, concluindo que não se pode tecer considerações conclusivas a respeito da resistência do solo à penetração em região de alto teor de água, acompanhada de altos teores de argila e matéria orgânica. Uma pequena variação na umidade causa uma variação na resistência do solo à penetração maior em solos mais argilosos que em solos mais arenosos (ASSIS et al., 2009). O teor de argila é mais influente sobre a leitura do valor de resistência do solo à penetração para solo seco com potencial mátrico próximo de -1500 kPa, ao passo que é pouco influente para solo úmido com potencial próximo a -10 kPa (VAZ et al., 2011). Solos argilosos apresentam valores mais elevados de resistência à penetração que solos arenosos sob teores de umidade semelhantes (MOLINA JR et al., 2013).

Em condições de alto teor de umidade, a resistência do solo à penetração é praticamente insensível à densidade do solo (BENGOUGH, 2001 apud VAZ et al., 2011). A densidade do solo influencia a calibração do sensor de umidade via TDR (GONÇALVES et al., 2011) e apresenta correlação significativa e positiva com a leitura do penetrômetro (ROBOREDO et al., 2010). É mais fácil determinar a densidade do solo a partir da leitura de resistência do solo à penetração para baixos teores de umidade (VAZ et al., 2011). O valor de resistência do solo à penetração aumenta com a densidade do solo, mas fica cada vez mais difícil correlacionar os dois para valores baixos de densidade, principalmente se a umidade estiver alta (MOLINA JR et al., 2013).

A sensibilidade do índice de cone à densidade do solo é maior para menores teores de umidade (MOLINA JR et al., 2013). MOLIN; MAGALHÃES e FAULIN (2006) observou que a

relação inversa entre a densidade e o teor de matéria orgânica influencia a leitura da resistência do solo à penetração e deve ser levada em conta.

Em relação à umidade, LIMA et al. (2007) indicam que, por conta do efeito da umidade sobre a leitura da resistência, um índice de cone de 2,0 MPa pode representar densidades entre 1,44 e 1,76 g cm⁻³, enquanto 3,0 MPa pode indicar uma densidade no intervalo entre 1,53 e 1,88 g cm⁻³. Por um lado, a determinação da resistência do solo à penetração em solo seco resulta em altos valores mas não indica diretamente que haja um problema de qualidade física no solo. Por outro, a recomendação de que o penetrômetro seja usado em condições de umidade próxima da capacidade de campo impede identificar o real problema ou estado de compactação do solo, visto que a umidade mascara outras propriedades como teor de argila e densidade (MORAES et al., 2014). VAZ et al. (2011) detectaram que um pequeno acréscimo ou decréscimo na umidade tem efeito mais que proporcional no valor de resistência do solo à penetração.

O penetrômetro manual superestimou a compactação do solo para valores baixos de umidade do solo (MOME FILHO et al., 2014). MORAES et al. (2014) ressaltam a importância de se manter uma taxa de penetração constante, embora já fora demonstrado que a resistência do solo à penetração é independente da velocidade para solos com densidade média em baixos teores de umidade (MOLINA JR et al., 2013).

JUSTINO et al. (2017) ao estudarem a variabilidade espacial da resistência do solo à penetração, teor de água no solo e a produtividade na cultura do milho destacaram a necessidade de se intensificar os estudos da variabilidade espacial dos atributos do solo para conhecer o seu comportamento no sistema solo-planta, uma vez que obtiveram grande diferença nos resultados obtidos.

É necessária a padronização tanto do equipamento quanto do procedimento de medida e interpretação dos dados, para penetrômetro portátil ou de bancada (MORAES et al., 2014). Além disso, deve ser mensurada a umidade no perfil do solo, que é usada então para corrigir o valor de resistência do solo à penetração em relação a um valor de umidade de referência (MORAES et al., 2014). VAZ et al. (2011) propõem que a umidade de referência seja aquela para o potencial mátrico de -10 kPa e que a densidade do solo seja normalizada em relação à densidade máxima do teste de Proctor.

A penetrometria surge como uma alternativa, para dar melhor suporte ao produtor rural em suas tomadas de decisões no campo, pois é uma técnica quantitativa amplamente empregada pela sua facilidade, rapidez e por permitir a coleta de um grande número de amostras na obtenção dos dados (SILVEIRA et al., 2010). Existem vários modelos deste equipamento disponíveis no mercado, no entanto, todos medem fundamentalmente a força

necessária para conduzir o dispositivo verticalmente para baixo através do perfil do solo. O primeiro deles é o automático que normalmente requer o uso de um veículo para o transporte, possuindo a vantagem de penetrar o solo com uma velocidade constante. Esses tipo de penetrometro não são facilmente utilizáveis, em parte devido ao seu peso e efeito na compactação, mas também no custo deles (Herrick e Jones, 2002). Existem também os penetrômetros manuais, neste caso o operador controla a velocidade de penetração.

A avaliação feita na mesma área pode ser enviesada pela variabilidade espacial e temporal, erro do operador e tipo de equipamento. Um resultado falso pode indicar que o solo precisa ser descompactado quando não precisa e vice-versa. O penetrômetro automático mantém constante a velocidade de penetração da sonda, o que não é tão fácil de alcançar manualmente. Contudo, o penetrômetro manual é mais fácil de ser transportado e seu uso é mais disseminado que o anterior (BECKETT et al., 2018).

O teste do penetrômetro, usado para mensurar a resistência do solo à penetração ou índice de cone, é um processo lento, laborioso e, daí, custoso. Não é incomum ver casos em que o resultado do teste em uma área pequena ou amostral é extrapolado para a área total, desconsiderando a inerente variabilidade espacial e o erro experimental. Em se adotando práticas de agricultura de precisão, a densidade amostral torna-se ainda maior. Contudo, ainda é o método mais utilizado e indicado para avaliação em campo. Além disso, novos modelos automatizados e georreferenciados facilitam a amostragem. Apesar disso, a leitura do equipamento pode ser influenciada por atributos físicos do solo como textura, estrutura, umidade, matéria orgânica e até pelo tipo de instrumento (manual ou automatizado), como tem sido visto na literatura.

SOJKA; BUSSCHER e LEHRSCHE (2011) reportaram que embora o uso do penetrômetro e o índice de cone sejam muito comuns como ferramenta para avaliar e caracterizar a qualidade física do solo, tais determinação são raramente acompanhadas de outras informações tão necessárias quanto e que influenciam àquela. A correção da resistência do solo à penetração com umidade e densidade do solo e funções de pedotransferência deve ser feita de acordo com a camada avaliada (MORAES et al., 2012). O valor de resistência à penetração precisa ser corrigido em relação a características de referência (MORAES et al., 2014).

ROBOREDO et al. (2010) compararam os penetrômetros de impacto IAA/Planalsucar-Stolf (penetrômetro dinâmico, analógico e de acionamento manual) e um penetrômetro de desenvolvimento próprio (penetrômetro estático, digital, de acionamento hidráulico e taxa de penetração constante) em um latossolo vermelho distrófico de textura argilosa, cultivado com arroz, soja, milho, sorjo e *Barchiaria brizantha* e preparo do solo

convencional, com uma gradagem média e duas leves. Os autores observaram que os valores do penetrômetro de impacto foram sempre maiores que do outro equipamento e atribuíram tal diferença ao princípio de funcionamento dos aparelhos, alegando que o primeiro superestima as leituras de resistência nas maiores profundidades pelo efeito de flambagem da haste, isto é, o atrito entre a haste e a parede do poço de acesso do penetrômetro, que se encostam quando o corpo de prova em queda livre dissipa sua energia pela haste na direção do solo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Experimentos de Campo

O trabalho foi desenvolvido na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos (FZEA) da Universidade de São Paulo (USP), localizada no município paulista de Pirassununga, em área cedida pela Prefeitura Administrativa do Campus USP Fernando Costa de Pirassununga (PUSP-FC). A localização geográfica do campus é 21°59' de latitude Sul e 47°26' de longitude Oeste e altitude média de 635 metros. Segundo a classificação de Kopen, o clima local é do tipo Cwa - úmido subtropical de altitude, com verão chuvoso e inverso seco. A temperatura média anual é de 20,8 °C e precipitação média anual de 1298 mm.

Os dados do experimento foram coletados entre outubro de 2016 e março de 2017, em cinco locais distintos (L1-L5). Todas as áreas classificadas como um latossolo vermelho eutroférico (PUSP-FC), porém com histórico de cultivo e sistema de produção diferentes. A Figura 1 mostra a distribuição dos locais no campus.

Figura 1. Localização dos locais L1-L5 no campus da PUSP-FC. Fonte: Google Maps (out/17).

Foram realizadas análises para determinação da granulometria, classificação textural e intervalo friável em todas as áreas avaliadas. As análises foram realizadas no Laboratório de Física do Solo do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Solos e Recursos Ambientais do Instituto Agrônomo de Campinas - IAC, Campinas-SP.

Em cada local, uma área de 5 x 5 m² foi delimitada para amostragem, sobre a qual não se trafegou mais até o final do experimento. A variável-resposta avaliada foi a Resistência Mecânica a Penetração (RMSP), medida simultaneamente por três penetrômetros (impacto, manual e automático) em três condições de umidade do solo (abaixo, dentro e acima do intervalo friável de cada local). Foram utilizadas 30 repetições por instrumento. A resistência foi avaliada em oito camadas até a profundidade de 0,40 m em todos os equipamentos. Antes de cada coleta, o teor de água no solo foi determinado com o sensor capacitivo de umidade volumétrica Falker HidroFarm, em seis repetições na camada de 0,00-0,20 m.

Os penetrômetros utilizados foram um Sondaterra PI-60, classificado como penetrômetro dinâmico de acionamento manual e sem registro eletrônico de dados (Figura 2); Falker PLG1020, classificado como penetrômetro estático de acionamento manual e com registro eletrônico de dados Figura 3; e Falker Solotrack, considerado um penetrômetro estático de acionamento hidráulico e com registro eletrônico de dados Figura 4. A resolução do primeiro penetrômetro foi de uma leitura por camada de 0,05 m, e dos outros dois foi de uma leitura por 0,01 m. A área lateral do cone da ponteira do primeiro instrumento é $1,29 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, e dos outros dois é $1,49 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ (cone padrão ASABE tipo II). No penetrômetro de impacto, o número de impactos por camada de 0,05 m (N) foi convertido para resistência mecânica (R, em MPa) pela fórmula de Stolf, de acordo com planilha de dados fornecida pelo fabricante, a saber $R = 0,2725 \cdot N + 0,1525$.

Figura 2. Penetrômetro de impacto da marca Sonda Terra Equipamentos, modelo PI-60.

Figura 3. Penetrômetro eletrônico da marca Falker, modelo PLG 1020.

Figura 4. Penetrômetro automático da marca Falker, modelo Solotrack PLG 5300.

3.1. Análise Estatística

O conjunto de dados foi tratado para padronizar a resolução dos três instrumentos em uma leitura por camada de 0,05 m, totalizando oito camadas por ponto amostral. Foi descartado todo ponto amostral onde a variável-resposta era maior ou igual a 6,50 MPa (ou 23 impactos), a fim de eliminar extremos e garantir a homocedasticidade do conjunto.

A análise estatística foi efetuada no software SAS® University Edition. Foi utilizado um modelo linear generalizado com os fatores fixos penetrômetros (penetrômetro de impacto PI-60, penetrômetro eletrônico PLG 1020 e penetrômetro automático PLG 5300), umidade do solo (seco, úmido e próximo à saturação), camada (oito camadas de 0,05 m até a profundidade de 0,40 m) e respectivas interações duplas e tripla. Os dados foram agrupados por local e submetidos à análise de variância, e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores da análise granulométrica, intervalo friável e umidade do solo seco, úmido e próximo à saturação no momento da amostragem nos cinco locais estudados estão ilustrados na Tabela 1. Pelas proporções de areia, silte e argila, as classificações textural desses locais são franco-argiloarenosa (L1), argiloarenosa (L2) e argilosa (L3 e L5). O intervalo friável teve seu menor valor encontrado na área L1 ($0,14 \text{ kg kg}^{-1}$) e o maior valor na área L5 ($0,38 \text{ kg kg}^{-1}$).

Tabela 1. Granulometria, intervalo friável, umidade do solo e classificação dos locais L1-L5.

Local	Argila	Silte	Areia	Intervalo friável (kg kg^{-1})	Umidade do solo		
	--- kg kg^{-1} ---	---	---	--- kg kg^{-1} ---	Seco	Úmido	Próx. sat.
L1	0,22	0,02	0,76	0,14-0,19	10,2	20,3	32,6
L2	0,39	0,08	0,53	0,18-0,24	18,5	21,9	31,9
L3	0,58	0,13	0,29	0,26-0,36	16,3	26,5	35,1
L4	0,51	0,15	0,34	0,26-0,35	18,6	22,3	34,0
L5	0,45	0,22	0,32	0,28-0,38	17,4	26,7	31,0

L1 – local 1, L2 – local 2, L3 – local 3, L4 – local 4, L5 – local 5.

Na Tabela 2, observa-se a análise de variância dos tratamentos para os locais L1 a L5. Somente não houve efeito significativo no fator umidade do solo (U) no local L2. No mesmo local, a interação entre os fatores umidade do solo e penetrômetros (U*P) foi significativa a 5%. Todos os outros fatores e interações nos demais locais apresentarem diferença significativa a 1%.

Tabela 2. Quadro de análise da variância dos dados de RMSP dos locais L1-L5.

	Fator	GL	SQ	QM	Valor F	Pr > F
L1	U	2	115,0461	57,5231	910,42	< 0,0001
	P	2	11,5580	5,7790	91,46	< 0,0001
	Z	7	133,7703	19,1100	302,45	< 0,0001
	U*P	4	3,4557	0,8639	13,67	< 0,0001
	U*Z	14	10,0526	0,7180	11,36	< 0,0001
	P*Z	14	26,8466	1,9176	30,35	< 0,0001
	U*P*Z	28	5,8580	0,2092	3,31	< 0,0001
L2	U	2	0,1009	0,0505	0,28	0,7571
	P	2	135,0559	67,5278	372,56	< 0,0001
	Z	7	326,6865	46,6695	257,48	< 0,0001
	U*P	4	1,9873	0,4968	2,74	0,0272
	U*Z	14	14,8413	1,0600	5,85	< 0,0001
	P*Z	14	117,5794	8,3985	46,34	< 0,0001
	U*P*Z	28	16,0849	0,5745	3,17	< 0,0001
L3	U	2	354,9934	177,4967	622,04	< 0,0001
	P	2	102,1571	51,0786	179,00	< 0,0001
	Z	7	97,1026	13,8718	48,61	< 0,0001
	U*P	4	4,6921	1,1730	4,11	0,0025
	U*Z	14	304,0411	21,7172	76,11	< 0,0001
	P*Z	14	158,0532	11,2895	39,56	< 0,0001
	U*P*Z	28	101,1403	3,6122	12,66	< 0,0001
L4	U	2	128,0931	64,0465	180,76	< 0,0001
	P	2	84,9883	42,4941	119,93	< 0,0001
	Z	7	30,3647	4,3378	12,24	< 0,0001
	U*P	4	9,3436	2,3359	6,59	< 0,0001
	U*Z	14	115,9277	8,2805	23,37	< 0,0001
	P*Z	14	198,6599	14,1900	40,05	< 0,0001
	U*P*Z	28	54,9101	1,9611	5,53	< 0,0001
L5	U	2	267,0451	133,5226	226,11	< 0,0001
	P	2	135,2824	67,6412	114,54	< 0,0001
	Z	7	377,0602	53,8657	91,22	< 0,0001
	U*P	4	20,2797	5,0699	8,59	< 0,0001
	U*Z	14	65,3328	4,6666	7,90	< 0,0001
	P*Z	14	178,4721	12,7480	21,59	< 0,0001
	U*P*Z	28	211,9696	7,5703	12,82	< 0,0001

GL – graus de liberdade, SQ – soma dos quadrados, QM – quadrado médio, L1 – local 1, L2 – local 2, L3 – local 3, L4 – local 4, L5 – local 5, U – umidade, P – penetrômetros, Z – camada.

A Tabela 3 mostra as médias de RMSP por penetrômetros e umidade do solo nos cinco locais do experimento. Houve diferença ou entre os três penetrômetros ou entre apenas dois dos três. Entre os penetrômetros de impacto e automático somente não houve diferença no solo seco no local L4; entre os penetrômetros manual e automático, no solo seco em L4 e úmido em L3 a L5. Já entre os penetrômetros de impacto e manual, não houve diferença no solo seco em L1 e úmido em L1. Em todos os outros, houve diferença estatística entre os três equipamentos.

Tabela 3. Médias de RMSF por penetrômetro e umidade do solo.

Local	Umidade do solo								
	S			U			SA		
	Penetrômetro								
	PI	PM	PA	PI	PM	PA	PI	PM	PA
	--- MPa ---								
L1	3,25 b A	3,35 b A	4,01 a A	2,53 b B	2,64 b B	2,92 a B	1,20 b C	1,86 a C	1,87 a C
L2	2,01 a A	1,39 c A	1,64 b A	1,97 a A	1,37 c A	1,72 b A	2,01 a A	1,40 c A	1,61 b A
L3	2,74 a A	2,19 c A	2,47 b A	1,92 a B	1,30 b B	1,43 b B	1,68 a C	1,06 c C	1,42 b B
L4	2,56 a A	2,10 b A	2,06 b A	2,19 a B	1,82 b B	1,73 b B	1,90 a C	1,33 c C	1,60 b B
L5	3,18 a A	2,55 b A	2,99 a A	3,01 a A	2,62 b A	2,69 b B	2,57 a B	1,70 c B	1,95 b C

Não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% na mesma linha letras iguais minúsculas entre penetrômetros para a mesma umidade e maiúsculas entre umidades para o mesmo penetrômetro. S – seco, U – úmido, SA – próximo à saturação, PI – penetrômetros de impacto, PM – penetrômetros manual, PA – penetrômetros automático, L1 – local 1, L2 – local 2, L3 – local 3, L4 – local 4, L5 – local 5.

Os valores da relação entre resistência mecânica e umidade do solo dos cinco locais sobrepostos estão ilustrados na Figura 5.

Figura 5. Relação entre resistência mecânica e umidade do solo dos cinco locais sobrepostos.

Pode-se observar uma tendência de queda nos valores da resistência mecânica com o aumento da umidade volumétrica do solo em todas as áreas, com valores variando entre 1,30 MPa até o valor máximo de 4,01 MPa. Esses resultados são similares aos encontrados por (ROBOREDO et al., 2010), que estudaram o uso de dois penetrômetros na avaliação da resistência mecânica de um latossolo vermelho distrófico e concluíram que quanto maior a umidade volumétrica do solo menor era a resistência mecânica.

A Tabela 4 exibe os perfis de RMSP por penetrômetros e umidade do solo no local L1. Não houve diferença significativa entre os três penetrômetros entre 0,10-0,25 e 0,35-0,40 m no solo seco, entre 0,00-0,25 e 0,30-0,40 m no solo úmido e 0,10-0,40 m no solo próximo à saturação. Entre os penetrômetros de impacto e manual, não houve diferença em 0,25-0,30 m no solo seco e na mesma camada no solo úmido; entre os penetrômetros manual e automático, entre 0,00-0,05 e 0,25-0,35 m no solo seco, 0,25-0,30 m no solo úmido e nas duas primeiras camadas no solo próximo à saturação. Não houve nenhum caso com diferença significativa entre os três penetrômetros.

Tabela 4. Perfis de RMSP por penetrômetro e umidade do solo no local L1.

Camada m	Umidade do solo								
	S			U			SA		
	Penetrômetro								
	PI	PM	PA	PI	PM	PA	PI	PM	PA
	--- MPa ---								
0,00-0,05	3,00 a	0,38 b	1,30 b	1,39 a	0,12 a	0,65 a	0,64 a	0,27 b	0,29 b
0,05-0,10	3,12 a	2,21 b	3,08 b	1,77 a	1,11 a	1,62 a	0,77 b	1,11 a	1,10 a
0,10-0,15	3,56 a	3,23 a	3,93 a	2,12 a	2,12 a	2,33 a	0,93 a	1,54 a	1,55 a
0,15-0,20	3,67 a	4,08 a	4,62 a	2,60 a	2,90 a	3,33 a	1,11 a	1,92 a	1,95 a
0,20-0,25	3,63 a	4,01 a	4,63 a	2,91 a	3,27 a	3,76 a	1,31 a	2,25 a	2,27 a
0,25-0,30	3,36 b	4,20 ab	4,79 a	3,34 b	3,53 ab	3,90 a	1,57 a	2,49 a	2,50 a
0,30-0,35	3,01 b	4,47 a	5,12 a	3,06 a	3,96 a	3,86 a	1,65 a	2,75 a	2,74 a
0,35-0,40	2,64 a	4,22 a	4,61 a	3,01 a	4,06 a	3,91 a	1,61 a	2,54 a	2,55 a

Não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% letras iguais minúsculas na mesma linha entre penetrômetros. S – seco, U – úmido, SA – próximo à saturação, PI – penetrômetros de impacto, PM – penetrômetros manual, PA – penetrômetros automático, L1 – local 1, L2 – local 2, L3 – local 3, L4 – local 4, L5 – local 5.

Os valores dos perfis de RMSP por penetrômetro e umidade do solo no local L1 estão ilustrados na Figura 6.

Figura 6. Perfis de RMSP por penetrômetro e umidade do solo no local L1.

De acordo BEUTLER; CENTURION e SILVA, (2007), a diferença entre os valores de resistência mecânica obtidos por diferentes tipos de penetrômetros está relacionada ao modo de operação, tendo em vista que no penetrômetro de impacto a mesma é determinada através de uma série de cálculos e nos penetrômetros eletrônicos a resistência mecânica é determinada diretamente pela pressão exercida contra o solo com velocidade considerada constante.

A Tabela 5 exibe os perfis de RMSP por penetrômetros e umidade do solo no local L2. Não houve diferença significativa entre os três penetrômetros entre 0,20-0,40 m no solo seco e 0,25-0,35 m no solo próximo à saturação. Entre os penetrômetros de impacto e manual, não houve diferença em 0,25-0,40 m no solo úmido; entre os penetrômetros manual e automático, entre 0,10-0,20 m no solo seco, 0,00-0,25 m no solo úmido e 0,00-0,25 m e na última camada no solo próximo à saturação. Entre os penetrômetros de impacto e automático, não houve diferença significativa entre 0,05-0,20 m no solo seco, 0,15-0,30 m e última camada no solo úmido e 0,05-0,25 m e última camada no solo próximo à saturação.

Tabela 5. Perfis de RMSP por penetrômetro e umidade do solo no local L2.

Camada m	Umidade do solo								
	S			U			SA		
	Penetrômetro			Penetrômetro			Penetrômetro		
	PI	PM	PA	PI	PM	PA	PI	PM	PA
	--- MPa ---								
0,00-0,05	2,44 a	0,21 c	0,75 b	1,94 a	0,19 b	0,44 b	1,72 a	0,28 b	0,46 b
0,05-0,10	1,86 a	0,87 b	1,48 a	1,71 a	0,93 b	1,14 b	1,66 a	0,96 b	1,23 ab
0,10-0,15	1,92 a	1,26 b	1,60 ab	1,82 a	1,28 b	1,45 b	1,76 a	1,27 b	1,38 ab
0,15-0,20	2,02 a	1,51 b	1,65 ab	1,98 a	1,40 b	1,59 ab	2,03 a	1,37 b	1,60 ab
0,20-0,25	1,99 a	1,61 a	1,74 a	2,05 a	1,57 b	1,85 ab	2,10 a	1,53 b	1,78 ab
0,25-0,30	1,90 a	1,67 a	1,92 a	1,97 ab	1,68 b	2,19 a	2,03 a	1,75 a	2,01 a
0,30-0,35	1,95 a	1,90 a	2,01 a	2,03 b	1,90 b	2,53 a	2,20 a	1,94 a	2,19 a
0,35-0,40	2,02 a	2,10 a	1,94 a	2,28 ab	2,06 b	2,61 a	2,59 a	2,11 b	2,21 ab

Não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% letras iguais minúsculas na mesma linha entre penetrômetros. S – seco, U – úmido, SA – próximo à saturação, PI – penetrômetros de impacto, PM – penetrômetros manual, PA – penetrômetros automático, L1 – local 1, L2 – local 2, L3 – local 3, L4 – local 4, L5 – local 5.

Os valores dos Perfis de RMSP por penetrômetro e umidade do solo no local L2 estão ilustrados na Figura 7.

Figura 7. Perfis de RMSP por penetrômetro e umidade do solo no local L2.

No local L2, em comparação com o L1, é possível afirmar que houve maior diferença nos valores de resistência mecânica obtidos pelos diferentes tipos de penetrômetros principalmente nas camadas superficiais. De maneira geral os valores encontrados através do penetrômetro de impacto são maiores que os eletrônicos. Tal evento pode ser explicado principalmente pelo modo de operação dos penetrômetros. Beutler, Centurion, & Silva (2007) tiveram resultados compatíveis ao desse estudo ao utilizarem os penetrômetros de impacto IAA/Planalsucar-Stolf, anel dinamométrico e estático eletrônico. Os autores encontraram correlações positivas fortes entre os três equipamentos, embora o penetrômetro de impacto tenha determinado valores superiores de resistência mecânica, e concluíram que os resultados obtidos com os penetrômetros estático e de anel dinamométrico foram semelhantes.

A Tabela 6 exibe os perfis de RMSP por penetrômetros e umidade do solo no local L3. Não houve diferença significativa entre os três penetrômetros entre 0,10-0,30 m e última camada no solo seco, entre 0,05-0,15 e 0,30-0,40 m no solo úmido e 0,05-0,10, 0,15-0,25 m e última camada no solo próximo à saturação. Entre os penetrômetros de impacto e manual, não houve diferença em 0,35-0,35 m no solo seco; entre os penetrômetros manual e automático, entre 0,05-0,10 e 0,30-0,35 m no solo seco, na camada superficial e entre 0,15-0,30 m no solo úmido e na camada superficial e 0,10-0,15 m no solo próximo à saturação. Entre os penetrômetros de impacto e automático, não houve diferença significativa entre 0,15-0,30 m no solo úmido e entre 0,15-0,20 e 0,25-0,35 m no solo próximo à saturação. Houve um caso com diferença significativa entre os três penetrômetros, na camada superficial do solo seco.

Tabela 6. Perfis de RMSP por penetrômetro e umidade do solo no local L3.

Camada m	Umidade do solo								
	S			U			SA		
	Penetrômetro								
	PI	PM	PA	PI	PM	PA	PI	PM	PA
	--- MPa ---								
0,00-0,05	5,58 a	1,31 c	2,98 b	2,50 a	0,63 b	1,19 b	1,35 a	0,20 b	0,38 b
0,05-0,10	2,43 b	3,57 a	3,98 a	1,11 a	0,95 a	0,97 a	1,04 a	0,56 a	0,78 a
0,10-0,15	2,29 a	2,63 a	2,93 a	1,39 a	0,83 a	0,94 a	1,33 a	0,70 b	0,89 ab
0,15-0,20	2,22 a	1,83 a	2,28 a	1,67 a	1,10 b	1,20 ab	1,52 a	1,10 a	1,33 a
0,20-0,25	2,17 a	1,70 a	1,95 a	1,84 a	1,25 b	1,41 ab	1,62 a	1,19 a	1,54 a
0,25-0,30	2,11 a	1,85 a	1,73 a	2,14 a	1,54 b	1,68 ab	1,99 a	1,31 b	1,90 a
0,30-0,35	2,51 a	2,18 ab	1,72 b	2,38 a	2,04 a	2,01 a	2,26 a	1,63 b	2,22 a
0,35-0,40	2,58 a	2,42 a	2,19 a	2,31 a	2,07 a	2,05 a	2,33 a	1,79 a	2,33 a

Não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% letras iguais minúsculas na mesma linha entre penetrômetros. S – seco, U – úmido, SA – próximo à saturação, PI – penetrômetros de impacto, PM – penetrômetros manual, PA – penetrômetros automático, L1 – local 1, L2 – local 2, L3 – local 3, L4 – local 4, L5 – local 5.

Os valores dos Perfis de RMSP por penetrômetro e umidade do solo no local L3 estão ilustrados na Figura 8.

Figura 8. Perfis de RMSP por penetrômetro e umidade do solo no local L3.

Pode-se observar que após a profundidade de 0,15 m ocorreu uma tendência de similaridade nos valores da resistência mecânica obtidos pelos diferentes equipamentos nas umidades estudadas. Essa tendência também foi verificada por De Lima, De León, & da Silva (2013) que compararam a resistência mecânica do solo à penetração com os penetrômetros de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf e estático digital de acionamento manual Falker PLG 1020, ambos de acionamento manual, em uma área experimental de latossolo amarelo argiloarenoso, nas camadas entre 0,00-0,40 m, umidade do solo de 19,2-20,9%(v/v) e após colheita de milho, cujo preparo do solo fora realizado com uma aração e gradagem. Os autores não encontraram diferença estatística significativa a 5% entre as médias dos dois equipamentos e concluíram que podem ser utilizados para solos com características texturais semelhantes a do estudo.

A Tabela 7 exibe os perfis de RMSP por penetrômetros e umidade do solo no local L4. Não houve diferença significativa entre os três penetrômetros em todas as camadas exceto a superficial nos solos seco e úmido e entre 0,10-0,40 m no solo próximo à saturação. Entre os penetrômetros manual e automático, não houve diferença nas camadas superficiais nos solos úmido e próximo à saturação. Os penetrômetros de impacto e

automático não tiveram diferença também na camada 0,05-0,10 m no solo de umidade próximo à saturação. Houve um caso com diferença significativa entre os três penetrômetros, também na camada superficial no solo seco.

Tabela 7. Perfis de RMSP por penetrômetro e umidade do solo no local L4.

Camada m	Umidade do solo								
	S			U			SA		
	Penetrômetro			Penetrômetro			Penetrômetro		
	PI	PM	PA	PI	PM	PA	PI	PM	PA
	--- MPa ---								
0,00-0,05	4,83 a	1,07 c	2,27 b	3,26 a	1,11 b	1,56 b	1,65 a	0,13 b	0,70 b
0,05-0,10	2,76 a	2,88 a	2,64 a	2,00 a	2,20 a	2,02 a	1,85 a	0,97 b	1,74 a
0,10-0,15	1,98 a	2,41 a	1,96 a	1,93 a	1,69 a	1,71 a	2,00 a	1,54 a	1,78 a
0,15-0,20	1,87 a	1,91 a	1,79 a	2,08 a	1,73 a	1,67 a	1,95 a	1,64 a	1,69 a
0,20-0,25	2,10 a	1,98 a	1,74 a	1,83 a	1,77 a	1,56 a	1,84 a	1,64 a	1,59 a
0,25-0,30	2,10 a	2,05 a	1,75 a	1,99 a	1,88 a	1,70 a	1,94 a	1,56 a	1,73 a
0,30-0,35	2,26 a	2,16 a	1,99 a	2,08 a	1,98 a	1,76 a	1,90 a	1,57 a	1,80 a
0,35-0,40	2,59 a	2,34 a	2,31 a	2,35 a	2,19 a	1,91 a	2,03 a	1,58 a	1,78 a

Não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% letras iguais minúsculas na mesma linha entre penetrômetros. S – seco, U – úmido, SA – próximo à saturação, PI – penetrômetros de impacto, PM – penetrômetros manual, PA – penetrômetros automático, L1 – local 1, L2 – local 2, L3 – local 3, L4 – local 4, L5 – local 5.

Os valores dos perfis em profundidade de RMSP por penetrômetro e umidade do solo no local L4 estão ilustrados na Figura 9.

Figura 9. Perfis de RMSP por penetrômetro e umidade do solo no local L4.

No local L4, em comparação com os demais locais estudados, é possível afirmar que houve piora nos valores de resistência mecânica em todas as profundidades estudadas. BEUTLER; CENTURION e SILVA, (2007) também encontraram resultados diferentes para penetrômetros sob as mesmas condições experimentais, embora indicassem tendências semelhantes. Os autores notaram que os valores são função das configurações de projeto construtivo e especificações técnicas do instrumento, mesmo que o cone usado seja padronizado.

Por fim, a Tabela 8 exibe os perfis de RMSP por penetrômetros e umidade do solo no local L5. Não houve diferença significativa entre os três penetrômetros entre 0,15-0,25 m e a última camada no solo seco, entre 0,00-0,25 e 0,30-0,40 m no solo úmido e 0,20-0,40 m no solo próximo à saturação. Entre os penetrômetros de impacto e manual, não houve diferença em 0,25-0,30 m no solo seco e na mesma camada no solo úmido; entre os penetrômetros manual e automático, entre 0,00-0,15 e 0,25-0,35 m no solo seco, 0,25-0,30 m no solo úmido e nas quatro primeiras camadas no solo próximo à saturação. Entre os penetrômetros de impacto e automático, não houve diferença entre 0,10-0,15 m no solo seco e 0,10-0,20 m no solo próximo à saturação. Não houve nenhum caso com diferença significativa entre os três penetrômetros.

Tabela 8. Perfis de RMSP por penetrômetro e umidade do solo no local L5.

Camada m	Umidade do solo								
	S			U			SA		
	Penetrômetro								
	PI	PM	PA	PI	PM	PA	PI	PM	PA
	--- MPa ---								
0,00-0,05	4,29 a	0,59 b	0,89 b	1,84 a	1,14 a	1,90 a	2,58 a	0,39 b	0,76 b
0,05-0,10	3,42 a	1,45 b	2,05 b	2,57 a	3,12 a	3,21 a	2,45 a	1,26 b	1,46 b
0,10-0,15	3,40 a	1,94 b	2,85 ab	3,24 a	2,78 a	3,00 a	2,51 a	1,50 b	1,90 ab
0,15-0,20	3,30 a	3,01 a	3,49 a	3,60 a	3,08 a	3,37 a	2,95 a	1,87 b	2,45 ab
0,20-0,25	3,15 a	3,57 a	3,68 a	3,58 a	3,14 a	3,04 a	2,76 a	2,17 a	2,51 a
0,25-0,30	2,78 b	3,39 ab	3,81 a	3,56 a	2,76 ab	2,59 b	2,61 a	2,20 a	2,30 a
0,30-0,35	2,54 b	3,44 a	3,63 a	2,98 a	2,48 a	2,31 a	2,36 a	2,14 a	2,13 a
0,35-0,40	2,57 a	3,01 a	3,48 a	2,69 a	2,42 a	2,10 a	2,38 a	2,08 a	2,10 a

Não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% letras iguais minúsculas na mesma linha entre penetrômetros. S – seco, U – úmido, SA – próximo à saturação, PI – penetrômetros de impacto, PM – penetrômetros manual, PA – penetrômetros automático, L1 – local 1, L2 – local 2, L3 – local 3, L4 – local 4, L5 – local 5.

Os valores dos Perfis de RMSP por penetrômetro e umidade do solo no local L5 estão ilustrados na Figura 10.

Figura 10. Perfis de RMSP por penetrômetro e umidade do solo no local L5.

Na Tabela 9, observam-se o número de concordâncias (ausência de diferença significativa) entre os penetrômetros por par de penetrômetros, umidade do solo e local. Houve concordância entre os três instrumentos na mesma quantidade entre o solo seco, úmido e próximo à saturação: 23, 25 e 22 ocorrências respectivamente. Onde apenas dois dos três concordaram entre si, os penetrômetros de impacto e automático foram os que apresentaram mais casos, com 11, 9 e 11 observações no solo seco, úmido e próximo à saturação respectivamente. Os penetrômetros manual e automático também concordaram entre si 5, 7 e 10 vezes no solo seco, úmido e próximo à saturação respectivamente. O par que menos apresentou concordância foi o dos penetrômetros de impacto e manual, com apenas 3, 6 e nenhuma observação no solo seco, úmido e próximo à saturação.

Tabela 9. Número de concordâncias entre penetrômetros por penetrômetro, umidade do solo e local.

Tabela 2: Número de concordâncias entre perimetristas por perimetrista, unidades de solo e local.													
	Concordaram entre si												Total
	Todos			PI-PM		PM-PA			PA-PI				
	Umidade do solo												
	S	U	SA	S	U	SA	S	U	SA	S	U	SA	
Local	--- observações ---												Total
L1	4	7	6	1	1	0	0	0	0	3	1	1	24
L2	4	0	2	0	3	0	3	4	5	2	4	5	32
L3	5	4	4	0	1	0	1	3	3	2	3	1	27
L4	7	7	6	1	0	0	0	0	0	0	0	1	22
L5	3	7	4	1	1	0	1	0	2	4	1	3	27
Total	23	25	22	3	6	0	5	7	10	11	9	11	132

S – seco, U – úmido, SA – próximo à saturação, PI – penetrômetros de impacto, PM – penetrômetros manual, PA – penetrômetros automático, L1 – local 1, L2 – local 2, L3 – local 3, L4 – local 4, L5 – local 5.

Ainda pela análise da Tabela 9, conclui-se que não houve diferença significativa entre os três instrumentos em 70 das 132 observações totais ou 53% dos casos. Quando se consideram os penetrômetros em pares, os penetrômetros de impacto e automático concordaram em 101 de 132 vezes (77%), manual e automático em 92 de 132 (70%) e de impacto e manual em 79 de 132 (60%).

A concordância entre os penetrômetros de impacto e automático, embora sejam esses equipamentos com princípios de funcionamento distintos, sugere que a taxa de penetração constante de ambos os torna mais compatíveis. O mesmo não pode ser dito do par de penetrômetros manual e automático, pois o primeiro não tem taxa de penetração constante. Nesse caso, a compatibilidade pode ser atribuída ao mesmo tipo de ponteira e características gerais dos dois equipamentos, que são do mesmo fabricante. Essas razões também podem explicar a menor concordância entre os penetrômetros de impacto e manual, que não têm em comum nem o princípio de funcionamento, dimensões da ponteira e características gerais do equipamento.

Também não houve umidade do solo em que o número de concordâncias ocorreu mais vezes. Pelo contrário, essa distribuição foi homogênea, com 42, 47 e 43 observações nas umidades do solo seco, úmido e próximo à saturação respectivamente. Esse resultado sugere que, desde que as leituras de resistência do solo à penetração tenham sido obtidas a níveis de umidade do solo próximos, o tipo de penetrômetros utilizado para tal não importa, isto é, não interfere no resultado.

5. CONCLUSÃO

- Sob a mesma condição de umidade do solo, os três penetrômetros concordaram (não houve diferença estatística a 5%) em 70 das 132 observações ou 53% dos casos.
- Quando se consideram os penetrômetros em pares, os penetrômetros de impacto e automático concordaram em 101 de 132 vezes (77%), manual e automático em 92 de 132 (70%) e de impacto e manual em 79 de 132 (60%).
- A compatibilidade entre penetrômetros abaixo, dentro e acima do intervalo friável foi a mesma: 31%, 36% e 33% das observações na mesma ordem.
- Os resultados sugerem que penetrômetros diferentes são compatíveis entre si desde que sejam utilizados na mesma condição de umidade e em locais com solos similares.

REFERÊNCIAS

ASSIS, R. L. DE; LAZARINI, G. D.; LANÇAS, K. P.; CARGNELUTTI FILHO, A.; FILHO, A. C. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 4, p. 558–568, 2009.

BECKETT, C. T. S.; BEWSHER, S.; GUZZOMI, A. L.; LEHANE, B. M.; FOURIE, A. B.; RIETHMULLER, G. Evaluation of the dynamic cone penetrometer to detect compaction in ripped soils. **Soil and Tillage Research**, v. 175, p. 150–157, 1 jan. 2018.

BELLÉ, M. P.; ALONÇO, A. dos S.; FRANCETTO, T. R.; ROSSATO, F. P.; FRANCK, C. J.; CARPES, D. P. Demanda energética e mobilização do solo com o uso de escarificadores em sistemas de semeadura direta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 5, p. 551–558, maio 2014.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Comparação de penetrômetros na avaliação da compactação de latossolos. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 1, p. 146–151, abr. 2007.

DE LIMA, R. P.; DE LEÓN, M. J.; DA SILVA, A. R. Compactação do solo de diferentes classes texturais em áreas de produção de cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, v. 60, n. 1, p. 16–20, fev. 2013.

FAO. **Status of the World's Soil Resources**FAO. [s.l.] FAO, 2015. .

FORNAZIER, A.; VIEIRA FILHO, J. E. R. **Heterogeneidade estrutural na produção agropecuária: uma comparação da produtividade total dos fatores no Brasil e nos Estados Unidos**. Rio de Janeiro: Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2013. .

GONÇALVES, A. C. A.; TRINTINALHA, M. A.; TORMENA, C. A.; FOLEGATTI, M. V. Influência da densidade do solo na estimativa da umidade em um nitossolo vermelho distroférico, por meio da técnica de TDR. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1551–1560, out. 2011.

JUSTINO, F.; ALBERTO, C.; OLIVEIRA, A. De; ALMEIDA, S.; LIMA, L. P. De; GUIMARÃES, E. C. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e produtividade do milho. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 4, n. 3, p. 77–84, 31 ago. 2017.

LIMA, C. L. R. de; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; DALBIANCO, L. Densidade crítica ao crescimento de plantas considerando água disponível e resistência à penetração de um Argissolo Vermelho distrófico arênico. **Ciência Rural**, v. 37, n. 4, p. 1166–1169, ago. 2007.

LIMA, R. P. de; LEÓN, M. J. De; SILVA, A. R. da; DE LIMA, R. P.; DE LEÓN, M. J.; DA SILVA, A. R. Comparação entre dois penetrômetros na avaliação da resistência mecânica do solo à penetração. **Revista Ceres**, v. 60, n. 4, p. 577–581, ago. 2013.

MAZURANA, M.; FINK, J. R.; SILVEIRA, V. H. da; LEVIEN, R.; ZULPO, L.; BREZOLIN, D. 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**, v. 37, n. 5, p. 1185–1195, out. 2013.

MAZURANA, M.; LEVIEN, R.; MÜLLER, J.; CONTE, O. Soil tillage systems: changes in soil structure and crop response. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1197–1206, ago. 2011.

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**, v. 26, n. 2, p. 442–452, ago. 2006.

MOLINA JR, W. F.; PIEDADE, S. M. S.; AMARAL, J. R.; MOLINA, W. F.; PIEDADE, S. M. S.; AMARAL, J. R. Penetration resistance in a latosol under different moisture and penetration speeds. **Revista Ceres**, v. 60, n. 5, p. 715–721, out. 2013.

MOME FILHO, E. A.; SILVA, A. P. da; FIGUEIREDO, G. C.; GIMENES, F. H. S.; VITTI, A. C. Compared performance of penetrometers and effect of soil water content on penetration resistance measurements. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 3, p. 744–754, jun. 2014.

MORAES, M. T. de; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. da. Correction of resistance to penetration by pedofunctions and a reference soil water content. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1704–1713, dez. 2012.

MORAES, M. T. de; SILVA, V. R. da; ZWIRTES, A. L.; CARLESSO, R. Use of penetrometers in agriculture: a review. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 1, p. 179–193, fev. 2014.

OLIVEIRA FILHO, F. X. de; MIRANDA, N. de O.; MEDEIROS, J. F. de; SILVA, P. C. M. da; MESQUITA, F. O.; COSTA, T. K. G. Zona de manejo para preparo do solo na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 186–193, fev. 2015.

ROBOREDO, D.; MAIA, J. C. de S.; OLIVEIRA, O. J. de; ROQUE, C. G. Uso de dois penetrômetros na avaliação da resistência mecânica de um latossolo vermelho distrófico. . abr. 2010, p. 307–314.

SAMPIETRO, J. A.; LOPES, E. D. S.; REICHERT, J. M. COMPACTAÇÃO CAUSADA PELO TRÁFEGO DE <i>FELLER BUNCHER</i> E SKIDDER EM UM NEOSSOLO REGOLÍTICO SOB DISTINTAS UMIDADES. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 1, p. 239–248, 29 mar. 2015.

SILVEIRA, D. de C.; MELO FILHO, J. F. de; SACRAMENTO, J. A. A. S. do; SILVEIRA, E. C. P.; FILHO, J. F. de M.; DO SACRAMENTO, J. A. A. S.; SILVEIRA, E. C. P. Relação umidade versus resistência à penetração para um argissolo amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 34, n. 3, p. 659–667, jun. 2010.

SIVARAJAN, S.; MAHARLOOEI, M.; BAJWA, S. G.; NOWATZKI, J. Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield. **Soil and Tillage Research**, v. 175, p. 234–243, 1 jan. 2018.

SOJKA, R. E.; BUSSCHER, W. J.; LEHRSCHE, G. A. In situ strength, bulk density, and water content relationship for a durinodic xeric haplocalcid soil. **Soil Science**, v. 166, n. 8, p. 520–529, 2011.

SZATANIK-KLOC, A.; HORN, R.; LIPIEC, J.; SICZEK, A.; SZEREMENT, J. Soil compaction-induced changes of physicochemical properties of cereal roots. **Soil and Tillage Research**, v. 175, p. 226–233, 1 jan. 2018.

SZYMCZAK, D. A.; BRUN, E. J.; REINERT, D. J.; FRIGOTTO, T.; MAZZALIRA, C. C.; DAL'COL LÚCIO, A.; MARAFIGA, J. Compactação do solo causada por tratores florestais na colheita de *Pinus taeda* L. na região sudoeste do Paraná. **Revista Árvore**, v. 38, n. 4, p. 641–648, ago. 2014.

TORRES, J. L. R.; COSTA, D. D. A.; SILVA NETO, O. F.; ARAÚJO, A. S.; SILVA, V. R.; VIEIRA, D. M. S. Avaliação da Resistência à Penetração e Densidade do Solo Num Latossolo sob Semeadura Direta Há Doze Anos. **Global Science and Technology**, v. 8, n. 1, p. 131–140, 30 abr. 2015.

TULLBERG, J.; ANTILLE, D. L.; BLUETT, C.; EBERHARD, J.; SCHEER, C. Controlled traffic farming effects on soil emissions of nitrous oxide and methane. **Soil and Tillage Research**, v. 176, p. 18–25, 1 mar. 2018.

VAZ, C. M. P. P.; MANIERI, J. M.; DE MARIA, I. C.; TULLER, M. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. **Geoderma**, v. 166, n. 1, p. 92–101, 30 out. 2011.