

**Resistência mecânica do solo à penetração avaliada em área de segundo ano de implantação da cultura da mandioca (*Manihot esculenta* CRANTZ)****Mechanical resistance of soil to penetration evaluated in the second year of implantation of cassava (*Manihot esculenta* CRANTZ)**

DOI:10.34117/bjdv6n1-330

Recebimento dos originais: 30/11/2019

Aceitação para publicação: 29/01/2020

**Liliane Scabora Miotto**

Professor(a) Doutor(a) do Curso de Engenharia Agrícola  
Universidade Estadual de Maringá - UEM, Campus do Arenito, Cidade Gaúcha – PR  
E-mail: liliscabora@hotmail.com

**Marcelo Alessandro Araújo**

Professor(a) Doutor(a) do Curso de Engenharia Agrícola  
Universidade Estadual de Maringá - UEM, Campus do Arenito, Cidade Gaúcha - PR

**Cássio de Castro Seron**

Engenheiro Agrícola, Doutor em Agronomia  
Universidade Estadual de Maringá – Maringá - Brasil

**Rogério Lavanholi**

Engenheiro Agrícola, doutorando em Engenharia de Sistemas Agrícolas  
ESALQ/USP, Piracicaba - Brasil

**Marcelo Augusto Batista**

Professor Doutor do Curso do Curso de Agronomia  
Universidade Estadual de Maringá – Maringá - Brasil

**Silvio Yoshiharu Ushiwata**

Professor Doutor do Curso de Agronomia  
Universidade Estadual de Mato Grosso - UNEMAT, Nova Xavantina – MT

**RESUMO**

A compactação promove a degradação da estrutura do solo, resultando em impactos negativos em suas propriedades físicas, com prejuízos ao desenvolvimento das plantas, devido à restrição ao sistema radicular. Neste sentido, objetivou-se com este trabalho avaliar os parâmetros físicos: densidade, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e resistência mecânica do solo à penetração (RP), em um Latossolo Vermelho cultivado com mandioca, no segundo ano de desenvolvimento. A RP foi determinada por dois penetrômetros de funcionamento distintos: o de impacto e o de anel dinamométrico. O desenvolvimento da pesquisa ocorreu no Campus do Arenito da Universidade Estadual de Maringá, localizado em Cidade Gaúcha – PR. Os resultados obtidos demonstraram que os valores de RP mensurados com o penetrômetro de impacto apresentaram-se significativamente superiores aos valores de RP do penetrômetro de anel, nas profundidades 0,20; 0,30; 0,40; 0,50 e 0,60 m. Contudo, o comportamento da RP nestas profundidades, para ambos os equipamentos foram semelhantes, indicando que as camadas mais compactadas ocorreram no intervalo de profundidade entre 0,30 a 0,50 m. O coeficiente de correlação dos penetrômetros foi de 0,77.

**Palavras-chave:** Arenito Caiuá, Penetrômetro, Qualidade física do solo

#### **ABSTRACT**

Compaction promotes degradation of the soil structure, resulting in negative impacts on its physical properties, with damage to the development of the plants, due to the restriction to the root system. In this sense, the objective of this work was to evaluate the physical parameters: soil bulk density, total porosity, macro porosity, micro porosity and soil mechanical resistance to penetration (RP) in a dystrophic Red Latosol (Oxisol) cultivated with cassava in the second year of development. The RP was determined by two different operating penetrometers: the impact and the dynamometric ring. The development of the research took place in the Campus of the Arenito of the State University of Maringá, located in Cidade Gaúcha - PR. The results obtained showed that the values of RP measured with the impact penetrometer were significantly higher than the RP values of the ring penetrometer at depths of 0.20; 0.30; 0.40; 0.50 and 0.60 m. However, the behavior of RP at these depths for both equipment were similar, indicating that the more compacted layers occurred in the depth range between 0.30 and 0.50 m. The correlation coefficient of the penetrometers was 0.77.

**Key words:** Sandstone Caiuá, Penetrometers, Soil physical quality

## **1 INTRODUÇÃO**

Uma das principais causas da degradação do solo é a compactação. Sendo esta influenciada por diversos fatores, dentre eles: o manejo, devido ao tráfego intenso de máquinas e implementos no preparo do solo, a textura, o teor de umidade, o teor de matéria orgânica, entre outros (ARAUJO et al., 2004; SANTANA et al., 2014; LIMA et al., 2013a).

A compactação do solo pode ser caracterizada pelo acréscimo da densidade, decorrente da aplicação de cargas ou pressão no solo, que também é influenciada pela umidade, ocasionando redução da porosidade, através da expulsão parcial de ar e/ou água, a partir da compressão do solo (HILLEL, 2003). Ela causa incremento na resistência à penetração das raízes, que dependendo do grau em que ocorre, pode promover condições que restringem o desenvolvimento e produção das culturas (LIMA, et al., 2013b; SILVA et al., 2014; SZYMCZAK et al., 2014; ROSSETTI e CENTURION, 2017). De acordo com Camargo e Alleoni (1997) e Hillel (2003), a compactação é um impedimento mecânico ao crescimento radicular das plantas, que prejudica os processos de aeração do solo, a condutividade do ar, da água e do calor, e a infiltração e redistribuição da água.

Os efeitos causados pela compactação afetam as propriedades físicas do solo em praticamente todas as fases do desenvolvimento da planta, desde germinação (MONTANARI et al., 2012), até desenvolvimento radicular e aéreo (BENGOUGH et al., 2011; MONTANARI et al., 2012). Na cultura da mandioca (*Manihot esculenta* Crantz), a compactação pode reduzir a produtividade, em razão das características e anatomia das raízes apresentarem alta sensibilidade a camadas impeditivas (HOWELER et al., 1993).

A sondagem do solo para a determinação da compactação é um procedimento fundamental para verificar sua qualidade física (LIMA et al., 2013b). Os procedimentos mais comuns utilizados para estimá-la são a quantificação da densidade, porosidade e principalmente da resistência mecânica do solo à penetração (GIRARDELLO et al., 2014; MIOTO et al., 2016). O uso de penetrômetros para medir a resistência mecânica do solo é uma técnica vantajosa, pois os penetrômetros são equipamentos simples e de fácil manuseio, apresentando também, a vantagem de fornecerem medidas “*in situ*”, ou seja, no local de interesse (HILLEL, 2003, CAMPOS et al., 2013; OLIVEIRA FILHO et al., 2015). Tais instrumentos se classificam em função do seu princípio de penetração, podendo ser estáticos, os quais registram a resistência mecânica do solo à penetração (RP) em um dinamômetro, devido à pressão exercida no penetrômetro contra o solo, ou dinâmicos, no qual a haste do equipamento penetra no solo em virtude de um peso (martelo) que cai em queda livre de uma altura constante (STOLF 1991).

Devido ao princípio de funcionamento dos penetrômetros estático e dinâmico serem distintos, é fundamental que se analise a proximidade dos resultados, tendo em vista o aperfeiçoamento na interpretação dos dados (LIMA et al., 2013b). Beutler et al. (2007) concluíram que o penetrômetro de impacto determina valores superiores de resistência à penetração em solos compactados, quando comparado aos penetrômetros de anel dinamométrico e eletrônico. Entretanto todos os equipamentos apresentaram eficiência na mensuração da compactação. Do mesmo modo, Miotto et al. (2016) também encontraram valores superiores de RP para o penetrômetro de impacto, em relação ao de anel dinamométrico.

Por ser a compactação um fator que pode restringir o bom desenvolvimento e a produtividade das culturas, através da limitação imposta ao desenvolvimento radicular (BENGOUGH et al., 2011), é imprescindível analisá-la. Neste sentido, o objetivo do presente estudo foi avaliar a presença de compactação em um Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com mandioca que se encontrava no segundo ano de desenvolvimento. Para esse fim, foram quantificadas a densidade, a porosidade e a resistência mecânica do solo à penetração. Sendo este último parâmetro, mensurado por meio de dois penetrômetros de princípios de funcionamento distintos, o de anel dinamométrico e o de impacto.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

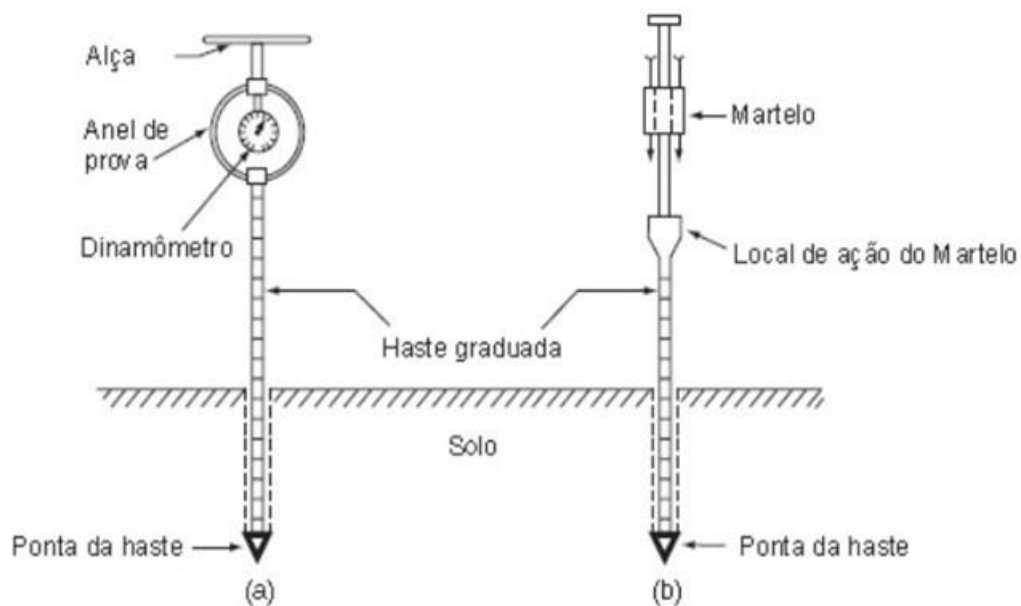
O presente estudo foi realizado no Campus do Arenito da Universidade Estadual de Maringá, Cidade Gaúcha, Paraná, coordenadas geográficas 23°22'30" S, 52°56'00" W.

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico. Esta classe de solo é caracterizada por ser profundo e altamente intemperizado (EMBRAPA, 2013). O material de origem predominante na região onde foi realizada a coleta de dados é o Arenito Caiuá. As

características granulométricas, na profundidade de 0,0-0,20 m, foram  $650 \text{ g kg}^{-1}$  de areia grossa,  $200 \text{ g kg}^{-1}$  de areia fina,  $10 \text{ g kg}^{-1}$  de silte e  $140 \text{ g kg}^{-1}$  de argila, já na camada de 0,50 m foram  $620 \text{ g kg}^{-1}$  de areia grossa,  $150 \text{ g kg}^{-1}$  de areia fina,  $10 \text{ g kg}^{-1}$  de silte e  $220 \text{ g kg}^{-1}$  de argila (PANINI et al., 2015).

A cultura implantada na área onde foi realizado o estudo era mandioca, cultivar Santa Helena, vulgarmente conhecida como fécula branca, e o plantio foi realizado em agosto de 2011. A área apresentava um histórico de cultivo de pastagem com mais de dez anos (pastagem degradada). O solo foi preparado para o plantio, utilizando-se o sistema de preparo convencional (aração e gradagem).

O estudo foi realizado em fevereiro de 2013 com a realização das coletas de dados de densidade do solo (Ds), porosidade e resistência mecânica do solo à penetração (RP), utilizando-se os penetrômetros de anel dinamométrico e de impacto. A Figura 1, ilustra os dois penetrômetros utilizados e seu princípio de funcionamento.



**Figura 1.** Ilustração dos dois penetrômetros utilizados no estudo, (a) Penetrômetro de anel dinamométrico, e, (b) Penetrômetro de impacto. Adaptado de Hillel (2003).

Na área foram selecionados aleatoriamente 24 pontos de amostragem. Em cada ponto, no centro da camada de 0,00 – 0,20 m foi coletada uma amostra indeformada com o auxílio de um amostrador específico e anéis volumétricos de aproximadamente 50 mm de diâmetro e 50 mm de altura, para a determinação da densidade e porosidade do solo. Após a coleta as amostras foram envoltas por papel alumínio e acondicionadas em sacos plásticos até serem processadas. No laboratório as amostras foram preparadas para as análises e posteriormente saturadas por 48 horas em uma bandeja com água até dois terços da altura do anel (ARAUJO, et al., 2004).

Para a determinação da porosidade, as amostras saturadas foram pesadas, e em seguida submetidas ao potencial de -0,006 MPa, utilizando-se uma mesa de tensão. Sucessivamente as amostras foram pesadas e secas em estufa a  $\pm 105^{\circ}\text{C}$  por 24 horas, para finalmente ser realizada a última pesagem. A partir disso, calculou-se a macroporosidade, microporosidade e a porosidade total do solo. Já a densidade do solo foi determinada utilizando-se as mesmas amostras dos anéis volumétricos empregadas na investigação da porosidade do solo, sendo considerado o peso da amostra após a secagem a  $\pm 105^{\circ}\text{C}$  dividido pelo volume do anel. Todas as metodologias descritas foram realizadas conforme a Embrapa (1997).

A resistência do solo a penetração foi mensurada com os penetrômetros de anel dinamométrico e o de impacto, com o solo apresentando umidade próximo a capacidade de campo. Para ambos os penetrômetros foram coletados aleatoriamente na área 40 dados de RP, com intervalos de 0,10 m até a profundidade de 0,60 m no perfil do solo, totalizando 240 dados de RP para cada penetrômetro. Na coleta de dados foi respeitada uma distância entre os pontos de amostragem de 0,50 m para cada modelo de penetrômetro.

A coleta de dados de RP, com o penetrômetro de anel dinamométrico, foi realizada de acordo com a metodologia descrita por Tormena e Roloff (1996). Os resultados obtidos no relógio de leitura foram transformados em MPa, conforme a Equação (1) fornecida pelo fabricante do penetrômetro.

$$RP = \frac{1,8192 + 0,4848y}{a} \quad (1)$$

em

que:

RP: resistência do solo à penetração ( $\text{kgf cm}^{-2} * 0,0980665 = \text{MPa}$ );

y: índice de cone (mm);

a: área do cone ( $\text{cm}^2$ )

A mensuração da resistência à penetração, com o penetrômetro de impacto foi efetuada com um penetrômetro adaptado do modelo IAA/Planalsucar – Stolf. A transformação da penetração da haste do aparelho no solo (cm/impacto), em resistência à penetração, foi obtida através da Equação (2) dos “holandeses” simplificada por Stolf (1991).

$$RP = \frac{(M + m) \times g}{A} + \frac{f \times M \times g \times h}{10 \times A} \times N \quad (2)$$

em que:

RP: resistência mecânica do solo à penetração,  $\text{kgf cm}^{-2}$ ;

M: massa do êmbolo (1,507 kg) ( $Mg = 1,507 \text{ kgf}$ );

m: massa do aparelho sem êmbolo (1,070kg) ( $mg = 1,070 \text{ kgf}$ );

h: altura de queda do êmbolo, 40 cm;

f: fração de energia restante para promover a penetração  $[M/(M+m)]$ ;

N: número de impactos por decímetro;

A: área da base do cone de penetração ( $1,27 \text{ cm}^2$ ) e;

g: aceleração da gravidade ( $9,8 \text{ m s}^{-2}$ )

Para a obtenção da resistência a penetração do solo em MPa, no penetrômetro de impacto, os valores de RP ( $\text{kgf cm}^{-2}$ ) foram multiplicados pelo fator 0,0980665.

Vários autores adotam 2,00 MPa como sendo o valor considerado limitante para o crescimento e desenvolvimento das raízes no solo (TAYLOR et al., 1966; ARAUJO et al., 2004; BENGOUGH et al., 2011). Por essa razão este foi o valor adotado no presente estudo.

Como o teor de água do solo possui relação direta com a RP, vários autores salientam que, a coleta de dados da RP deve ser realizada com solo próximo a capacidade de campo (TORMENA e ROLLOF, 1996; ARAUJO et al., 2004; LIMA et al., 2013b). Neste sentido foi realizada a coleta de RP dois dias após uma chuva (30 mm) e no mesmo dia da coleta dos dados de RP foram realizadas coletas de três amostras de solo com o auxílio de um trado holandês nas profundidades 0,00 - 0,20; 0,20 - 0,40 e 0,40 - 0,60 m, para fins de determinação do teor de água no solo, segundo a metodologia descrita em Embrapa (1997).

Os dados de resistência do solo a penetração foram avaliados e analisados para verificar se houve diferenças estatísticas entre os penetrômetros, utilizando o teste *t* para amostras independentes. A análise estatística foi realizada mediante o uso do intervalo de confiança da média a 95 % ( $p < 0,05$ ). Também foi realizada a correlação de Pearson entre os valores de RP obtidos pelos diferentes penetrômetros.

### 3 RESULTADOS

A densidade e a porosidade são atributos do solo que estão relacionados diretamente com a compactação. Geralmente quanto maior a densidade do solo, menor será sua porosidade total e maior será a sua compactação (ARAUJO et al., 2004), resultando em maiores dificuldades para o

crescimento do sistema radicular das plantas (BENGOUGH et al., 2011). A porosidade do solo é composta pela porosidade total, a macroporosidade e microporosidade. Sendo que, os microporos são aqueles responsáveis pela retenção de água e os macroporos responsáveis pelas trocas gasosas (CAMARGO e ALLEONI, 1997). Valores de macroporos inferiores a  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , estão associados a limitações nas trocas gasosas entre solo e raízes (BENGOUGH et al., 2011).

A Tabela 1 exibe os valores de densidade, macroporos, microporos e porosidade total do solo, na camada de 0,0-0,20 m.

**Tabela 1.** Valores médios de densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo na camada de 0,0-0,20 m

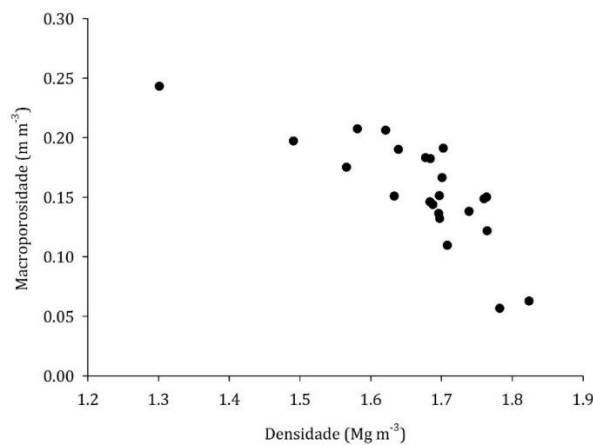
Ds	Poros		
	Macro	Micro	Total
( $\text{Mg m}^{-3}$ )	( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )		
1,67	0,1579	0,1919	0,3498

De acordo com Laia et al. (2005), os solos arenosos que apresentam valores de densidade superiores a  $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$ , podem restringir o sistema radicular das plantas. Nota-se que o valor médio da densidade encontrado na profundidade de 0,0-0,20 é menor que  $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$ , o que pode indicar que, em tese, nesta camada, a área de estudo deve sofrer pouca restrição em relação ao desenvolvimento radicular. Miotto et al. (2016), ao avaliarem a densidade de um Latossolo Vermelho cultivado com mandioca que se encontrava no primeiro ano de desenvolvimento, obtiveram densidade igual a  $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$  na camada de 0,0-0,20 m. Segundo os autores, este valor elevado se deve ao curto período de tempo decorrido entre a implantação da cultura e a coleta dos dados, não havendo tempo hábil para as raízes da cultura e principalmente das plantas daninhas, presentes na entrelinha, agirem com seu sistema radicular, promovendo a criação e manutenção de bioporos suficientemente estáveis ao ponto de promover redução na densidade.

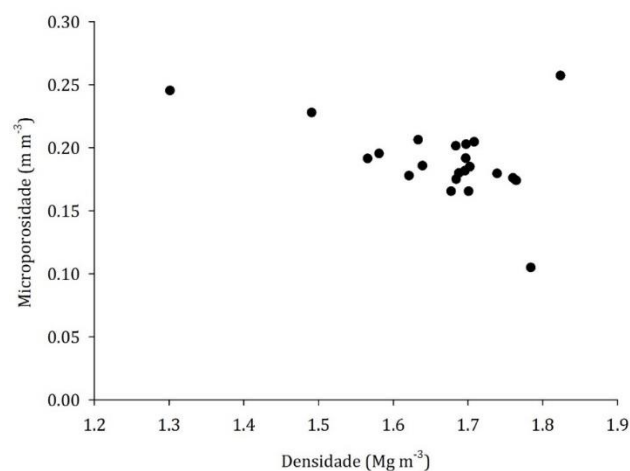
Segundo Camargo e Alleoni (1997), os solos arenosos podem compactar-se facilmente, pois apresentam uma fraca estrutura. O fraco grau de estruturação desses solos é resultado dos poucos agregados estáveis em água que possuem, os quais se esboroam facilmente quando umedecidos. Essa maior susceptibilidade ao selamento ou impermeabilização superficial é mais evidente em solos que foram preparados (aração e gradagem) há menos tempo e, pode influenciar negativamente em parâmetros ligados a qualidade física do solo, tais como: densidade e porosidade. Geralmente, quanto maior for a densidade de um solo, maior será sua RP e menor será sua macroporosidade, sendo este último parâmetro considerado o principal espaço para o crescimento das raízes (CAMARGO e ALLEONI, 1997; ARAUJO et al., 2004).

O volume de macroporos na profundidade amostrada é de  $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , ou seja 15%. De acordo com Watanabe et al. (2002) e Bengough et al. (2011) valores de porosidade com ar abaixo de 10% normalmente são restritivos para o crescimento e produtividade de várias culturas. A porosidade total do solo foi de  $0,349 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e de acordo com Camargo e Alleoni (1997), em valores médios, o solo ideal para a produção agrícola deve apresentar porosidade total próxima a  $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Portanto, tomando-se estes valores como referência, verifica-se que o solo da área avaliada apresentou valor médio de porosidade total inferior a este.

*A densidade do solo em função da distribuição da macroporosidade e microporosidade são apresentadas nas Figuras 2 e 3, respectivamente.*



**Figura 2.** Macroporosidade em função da densidade do solo, na profundidade de 0-0,20 m.



**Figura 3.** Microporosidade em função da densidade do solo, na profundidade de 0-0,20 m.



Constata-se pela Figura 2 que a macroporosidade do solo reduziu conforme a elevação dos valores de densidade. Este fato ocorreu, por que conforme o aumento da densidade, ou seja, com o aumento da massa por volume de solo, conseqüentemente existe uma tendência à compactação do solo, e assim a redução da macroporosidade.

Resultados semelhantes foram encontrados por Araujo et al. (2004) que notaram redução da macroporosidade com o acréscimo da densidade em sistema de preparo convencional do solo cultivado com mandioca. Miotto et al. (2016), em Latossolo Vermelho cultivado com mandioca de primeiro ano, e Watanabe et al. (2002), em sistema convencional e preparo mínimo, ambos com a cultura da mandioca, também verificaram comportamento similar.

No presente estudo não se verificou o aumento da microporosidade em relação ao acréscimo da densidade do solo (Figura 3). Mentges et al. (2010), trabalhando com solo de textura arenosa, concluíram que a compactação elevou a densidade e a resistência mecânica à penetração do solo, reduziu a porosidade total e a macroporosidade, sem provocar impactos significativos na microporosidade. No entanto, Miotto et al. (2016), verificaram elevação da microporosidade com a elevação da densidade, em área de primeiro ano da implantação da cultura da mandioca. O comportamento constatado no trabalho de Miotto et al. (2016), e não verificado no presente estudo, pode ser atribuído ao fato de que, a avaliação em área de cultivo com mandioca implantada no primeiro ano (poucos meses após o plantio), ainda está sob grande influência do efeito residual do tráfego de máquinas e implementos agrícolas, que haviam sido utilizados a pouco tempo. Fato evidenciado pelos maiores valores de densidade encontrados naquele estudo. O maior intervalo de tempo decorrido entre o plantio da cultura e a coleta de dados, no presente estudo (18 meses após o plantio), e a ação do sistema radicular da cultura e das plantas daninhas, formou bioporos que favoreceram mais a macroporosidade do que a microporosidade.

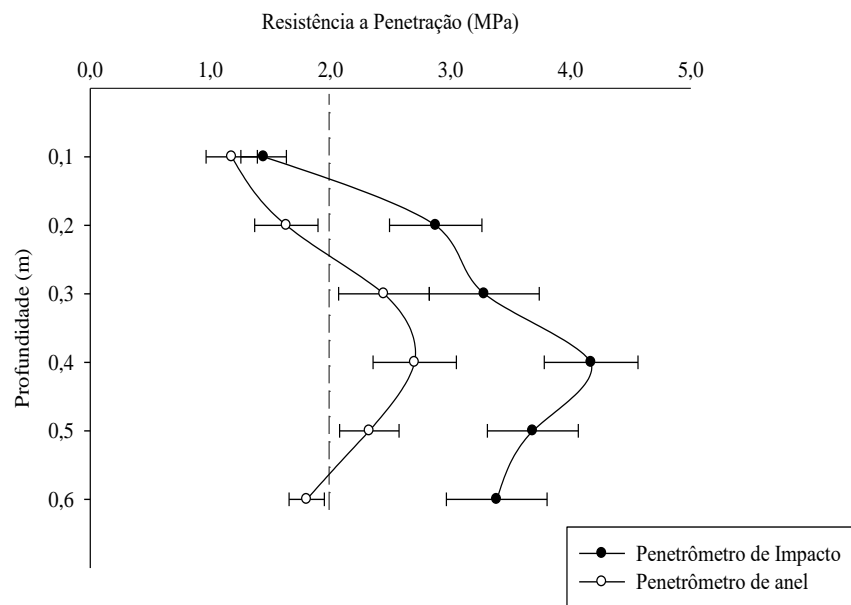
Na Tabela 2, é apresentado o teor de água do solo, da área em estudo, no momento da amostragem. Pode ser verificado acréscimo nos valores do teor de água, conforme o aumento da profundidade, fato que, está relacionado provavelmente, ao ligeiro aumento de argila em profundidade, comum neste tipo de solo e, também ao próprio aprofundamento que preserva a umidade por mais tempo.

**Tabela 2.** Teor de água médio do solo nas diferentes profundidades

Profundidade (m)	Teor de água (kg kg <sup>-1</sup> )
0,0-0,20	0,0686
0,20-0,40	0,0776
0,40-0,60	0,085

De acordo com Lima et al. (2013b) e Araujo et al. (2004), a resistência a penetração possui relação direta com o teor de água do solo.

A Figura 4 demonstra os valores de resistência à penetração mensurados na área, com os penetrômetros de impacto e de anel dinâmométrico.



**Figura 4.** Valores de resistência mecânica do solo à penetração, mensurados com o penetrômetro de impacto e o de anel dinâmométrico. As barras referem-se ao intervalo de confiança da média, e a sobreposição dos intervalos de confiança, na mesma profundidade, indica ausência de diferenças entre as médias de RP, para os dois penetrômetros avaliados.

Como visto na Figura 4 os valores de RP mensurados com os diferentes penetrômetros não apresentaram diferença significativa ( $p > 0,05$ ) para as profundidades 0,10 e 0,30 m. Já nas profundidades 0,20; 0,40; 0,50 e 0,60 m, os dados de RP do penetrômetro de impacto apresentaram-se estatisticamente superiores ( $p < 0,05$ ) aos obtidos com o penetrômetro de anel dinâmométrico. Entretanto, o padrão de comportamento dos dados de RP apresentado pelos aparelhos foi semelhante, indicando maiores valores de RP na camada de 0,30 a 0,50 m.

Souza et al. (2014), em estudo, constataram que o penetrômetro de impacto denotou medições de resistência à penetração superiores às obtidas com o penetrômetro eletrônico, contudo, ambos os penetrômetros foram sensíveis em indicar a presença de camada compactada. Do mesmo modo, Miotto et al. (2016), encontraram o mesmo padrão de comportamento dos dados de RP, em ambos os penetrômetros avaliados (anel e impacto).

Beutler et al. (2007), verificaram que o penetrômetro de impacto registrou maiores valores de RP em Latossolo Vermelho Distrófico (4,40 MPa) no maior nível de compactação, quando

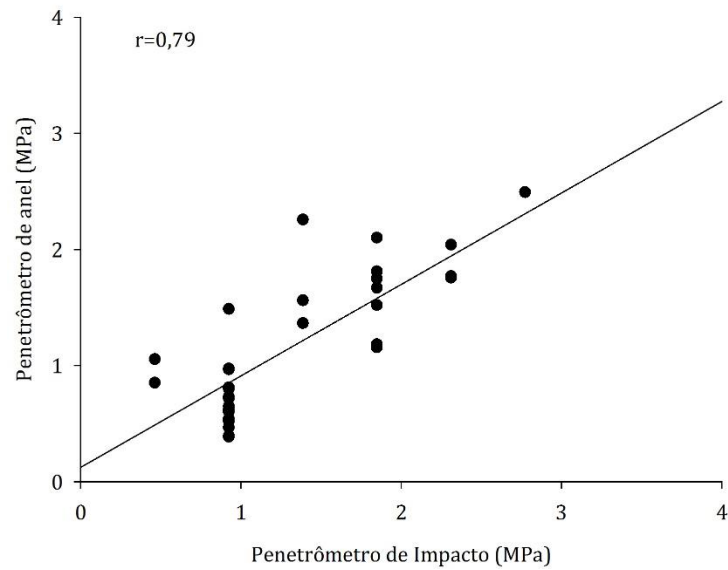
comparado com os valores mensurados pelos penetrômetros de anel dinamométrico (3,93 MPa) e eletrônico (3,61 MPa). Stolf (1991), também obteve maiores valores de RP com o penetrômetro de impacto, em relação ao penetrômetro de anel dinamométrico.

Beutler et al. (2002), notaram que em Latossolo, o penetrômetro de impacto determina valores superiores de RP em locais mais compactados, não permitindo sua comparação direta com valores obtidos com outros penetrômetros.

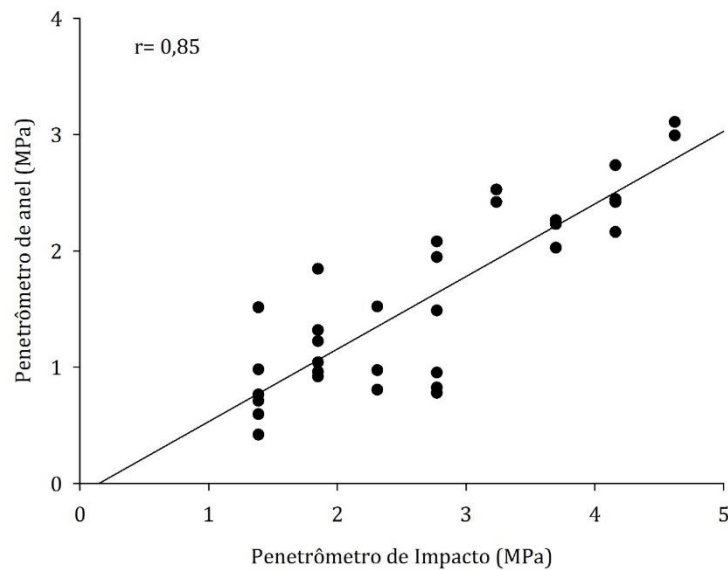
Segundo Molin et al. (2012) e Miotto et al. (2016), a resistência à penetração medida no mesmo solo por penetrômetros distintos podem gerar dados diferentes. Estas diferenças de valores expressas pelos penetrômetros estão vinculadas com o princípio de funcionamento destes equipamentos. Entretanto ambos os penetrômetros estudados exercem a mesma função, e neste caso o que se torna importante é o conhecimento do comportamento desses equipamentos na avaliação da resistência à penetração. Assim, os dados encontrados no presente estudo sugerem que em se tratando de penetrômetro de impacto, nas camadas mais profundas, o valor tido como limite de 2,0 MPa (TAYLOR, 1966; ARAUJO et al., 2004; BENGOUGH et al., 2011) deve ser revisto.

Assis et al. (2014), estudando a resistência à penetração utilizando penetrômetro de impacto em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes culturas de cobertura, notaram que a partir da profundidade de 0,10 m, todos os tratamentos, à exceção do solo cultivado com milho, exibiram valores de RP restritivos ( $RP > 2,0$  MPa) ao desenvolvimento das culturas. Miotto et al. (2016), ao avaliarem a RP em Latossolo Vermelho cultivado com mandioca, constataram que os valores obtidos com o penetrômetro de impacto foram superiores a 2,0 MPa abaixo da profundidade de 0,10 m. Estes resultados corroboram com o obtido no presente estudo, visto que a partir da profundidade de 0,10 m os valores de RP mensurados com o penetrômetro de impacto foram superiores a 2,0 MPa.

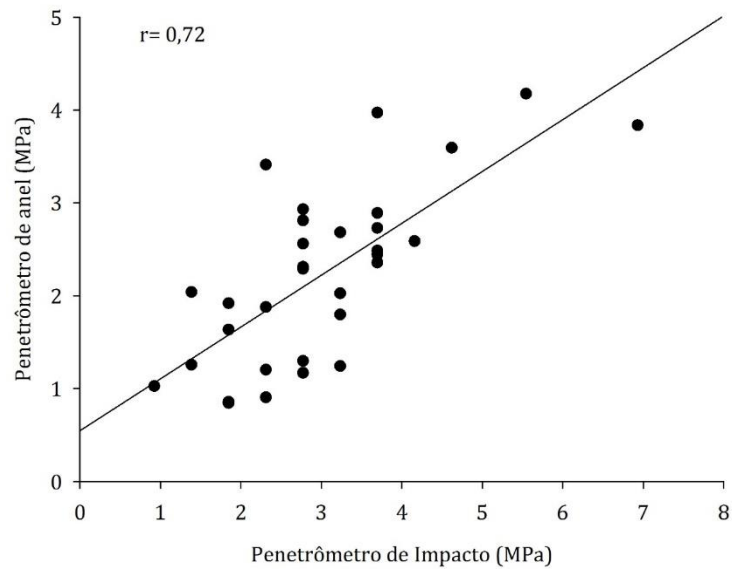
As correlações dos valores de resistência à penetração determinados pelos dois tipos de penetrômetros, para cada profundidade amostrada (0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,50 e 0,60 m) são expostas a seguir nas figuras 5, 6, 7, 8, 9 e 10.



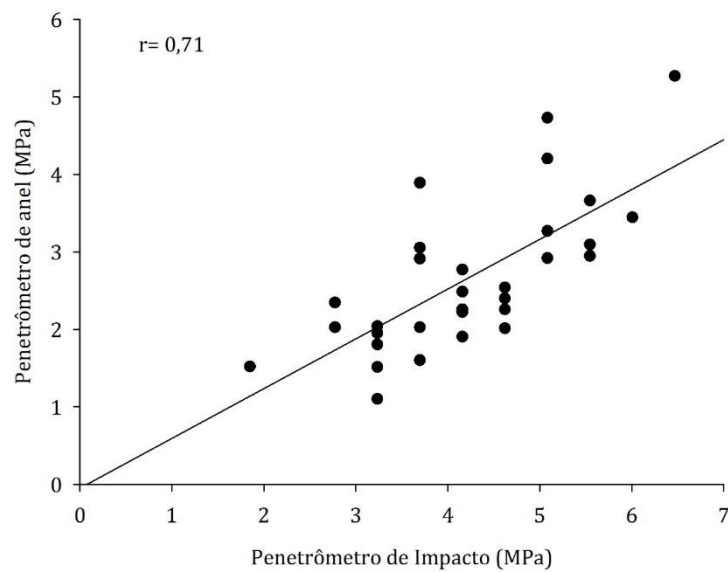
**Figura 5.** Correlação de Pearson entre os valores de resistência do solo à penetração avaliados com o penetrômetro de anel dinamométrico e de impacto, na profundidade de 0,10 m.



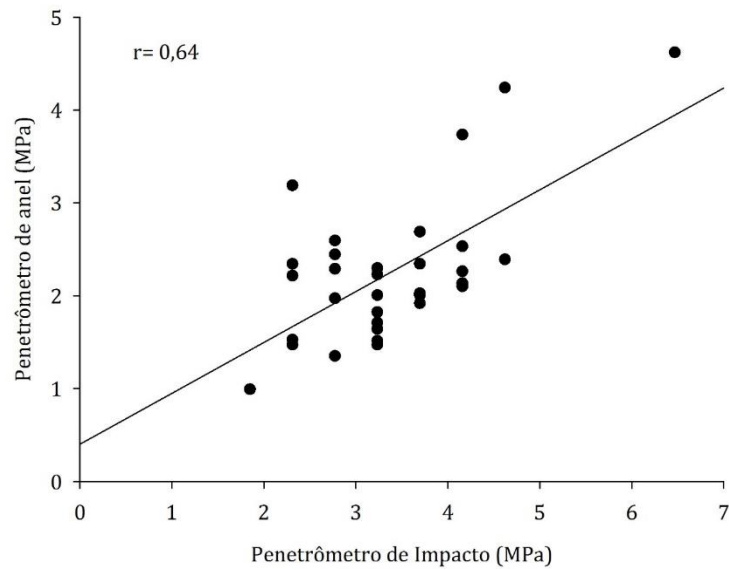
**Figura 6.** Correlação de Pearson entre os valores de resistência do solo à penetração avaliados com o penetrômetro de anel dinamométrico e de impacto, na profundidade de 0,20 m.



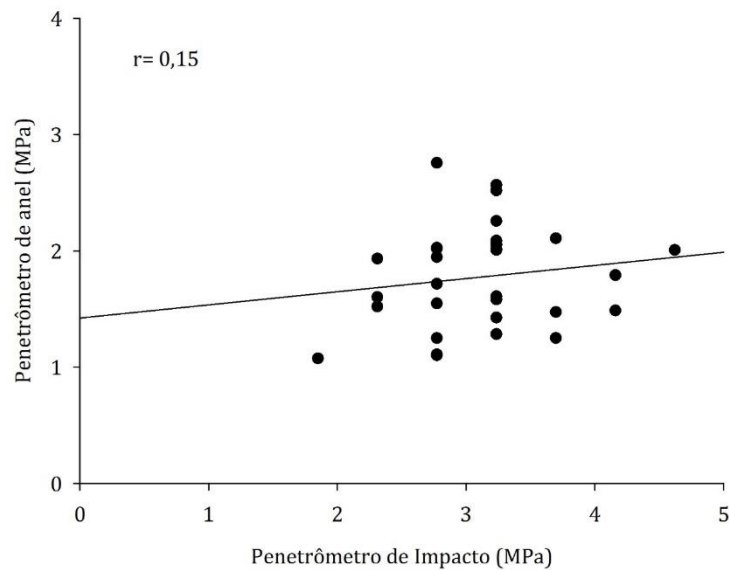
**Figura 7.** Correlação de Pearson entre os valores de resistência do solo à penetração avaliados com o penetrômetro de anel dinamométrico e de impacto, na profundidade de 0,30 m.



**Figura 8.** Correlação de Pearson entre os valores de resistência do solo à penetração avaliados com o penetrômetro de anel dinamométrico e de impacto, na profundidade de 0,40 m.



**Figura 9.** Correlação de Pearson entre os valores de resistência do solo à penetração avaliados com o penetrômetro de anel dinâmométrico e de impacto, na profundidade de 0,50 m.

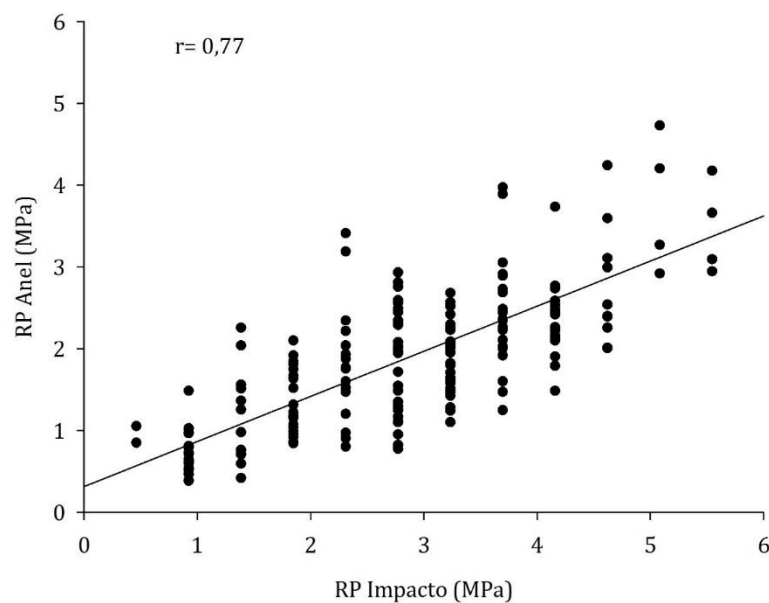


**Figura 10.** Correlação de Pearson entre os valores de resistência do solo à penetração avaliados com o penetrômetro de anel dinâmométrico e de impacto, na profundidade de 0,60 m.

Pode se observar que as maiores correlações ocorreram até a profundidade 0,40 m, ou seja,  $r > 0,70$ . Já a profundidade de 0,60 m apresentou a menor correlação ( $r=0,15$ ). Este fato, pode ser explicado pela variação da textura do solo, ou seja, devido ao aumento do teor de argila em profundidade (profundidade de 0,0-0,20 m:  $140 \text{ g kg}^{-1}$  de argila; profundidade de 0,50 m:  $220 \text{ g kg}^{-1}$  de argila).

De acordo com Stolf (1991), os solos argilosos estão sujeitos a compressões elásticas, e a resistência dinâmica apresenta-se maior que a estática, assim a diferença percentual aumenta com a resistência do meio. Os resultados do presente estudo, corroboram com Miotto et al. (2016), que também observaram correlação acima de 0,70 até a profundidade de 0,40 m, e decréscimo da correlação nas profundidades 0,50 e 0,60 m, devido ao aumento do teor de argila em profundidade.

Na Figura 11 é apresentada a correlação entre os penetrômetros de anel dinamométrico e de impacto, levando em consideração, simultaneamente, todas as profundidades avaliadas.



**Figura 11.** Correlação de Pearson entre os valores de resistência do solo à penetração avaliados com o penetrômetro de anel dinamométrico e de impacto, considerando concomitantemente as profundidades analisadas.

O comportamento da RP para as profundidades analisadas foi equivalente para os dois penetrômetros. Os valores de RP indicaram correlação positiva ( $r = 0,77$ ). Corroborando com os resultados de Roque et al. (2003), que obtiveram  $r = 0,80$  e com Miotto et al. (2016), que encontraram  $r = 0,75$  para o penetrômetro de impacto e de anel dinamométrico em Latossolo Vermelho. Por outro lado, os dados de resistência mecânica do solo à penetração apresentaram valores de correlação inferiores aos obtidos por Beutler et al. (2002), ( $r > 0,96$ ), que compararam estes tipos de penetrômetros em um Latossolo Vermelho de textura média.

De maneira geral, os resultados revelam que para este tipo de solo, os penetrômetros avaliados apresentam valores análogos, podendo assim ser utilizados para o fim proposto, contanto que se considere que o penetrômetro estático (anel dinamométrico) conduz a valores de RP menores em

camadas mais densas e profundas (STOLF 1991; BEUTLER et al., 2002; ROQUE et al., 2003; MIOTO et al., 2016).

#### 4 CONCLUSÃO

A macroporosidade do solo decresceu com a elevação da densidade. Já a microporosidade se manteve estável com o acréscimo da densidade.

O penetrômetro de impacto mensurou valores de RP significativamente superiores nas profundidades 0,20; 0,40; 0,50 e 0,60 m, em comparação ao penetrômetro de anel. Contudo o comportamento dos dados de RP indicado pelos equipamentos seguiram a mesma tendência.

Os penetrômetros de impacto e de anel apresentaram correlação significativa. Entretanto, o valor de 2,0 MPa considerado como restritivo ao desenvolvimento do sistema radicular, deve ser utilizado com ponderação para o penetrômetro de impacto.

#### REFERÊNCIAS

ARAUJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 337-345, 2004.

ASSIS, E. B.; NUNES, M. C. M.; BARELLI, M. A. A.; SEABRA JUNIOR, S.; SERAFIM, M. E. Resistência à penetração em argissolo vermelho-amarelo sob pousio e diferentes culturas de cobertura. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.10, n.19, p.1668-1677, 2014.

BENGOUGH, A. G.; MCKENZIE, B. M.; HALLETT, P. D.; VALENTINE, T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 1, p. 59–68, 2011.

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.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SOUZA, Z.M.; SILVA, L.M. Utilização dos penetrômetros de impacto e de anel dinamométrico em Latossolos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.22, n.2, p.191-199, 2002.



CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba, 132 p. 1997.

CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; OLIVEIRA, I. A.; BERGAMIM, A. C. Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração e umidade do solo em área cultivada com cana-de-açúcar na região de Humaitá, Amazonas, Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.8, p.305-310. 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed., Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 353 p. 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análises de solos**. Rio de Janeiro, 212 p. 1997.

GIRARDELLO, V.C.; AMADO, T. J. C.; SANTI, A. L.; CHERUBIN, M. R.; KUNZ, J.; TEIXIRA, T. G. Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1234-1244, 2014.

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. Academic Press, New York, 494 p. 2003.

HOWELER, R.H.; EZUMAH, H. C.; MIDMORE, D. J. Tillage systems for root and tuber crops in the tropics. **Soil & Tillage Research**, v.27, p.210-240, 1993.

LAIA, A. M.; MAIA, J. C. S.; KIM, M. E. Uso do penetrômetro eletrônico na avaliação da resistência do solo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 2, p. 523-530, 2005.

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

LIMA, R. P.; LEÓN, M. J. D.; SILVA, A. R. Comparação entre dois penetrômetros na avaliação da resistência mecânica do solo à penetração. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 60, n. 4, p. 577-581, 2013b.

MENTGES, M. I.; REICHERT, J. M.; ROSA, D. P.; VIEIRA, D. A.; ROSA, V. T.; REINERT, D. J. Propriedades físico-hídricas do solo e demanda energética de hastes escarificadora em Argissolo compactado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 3, p.315- 321, 2010.

MIOTO, L. S.; ARAUJO, M. A.; SERON, C. C.; LAVANHOLI, R.; BATISTA, M. A.; LOZANO, C. S. Resistência do solo à penetração das raízes avaliada por dois penetrômetros em uma área cultivada com mandioca. **Acta Iguazu**, Cascavel, v. 5, n.1, p. 65-79, 2016.

MOLIN, J. P.; DIAS, C. T. 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.

MONTANARI, R.; ZAMBIANCO, E. C.; CORRÊA, A. R.; PELLIN, D. M. P.; CARVALHO, M. P.; DALCHIAVON, F. C. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho correlacionados linear e espacialmente com a consorciação de guandu com milho. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 59, n. 1, p.125-135, 2012.

OLIVEIRA FILHO, F. X.; MIRANDA, N. O.; MEDEIROS, J. F.; SILVA, P. C. M.; 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. 2015.

PANINI, R. L.; ARAUJO, M. A.; BERTOLDI, I. R.; MORAES JÚNIOR, J. C.; USHIWATA, S. Y.; SOUZA, S. L. Levantamento de uso atual e classificação dos solos do campus do arenito em Cidade Gaúcha – PR. In: **IX Encontro Internacional de Produção Científica UniCesumar – IX EPCC**, 2015. Editora UniCesumar, Maringá – PR. 2015. Anais Eletrônico.

ROSSETTI, K. V.; CENTURION, J. F. Indicadores de qualidade em Latossolos compactados e suas relações com o crescimento do sistema radicular do milho. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 11, n. 3, p. 181-190, 2017.

ROQUE, C. G.; CENTURION, J. F.; ALENCAR, G. V.; BEUTLER, A. N.; PEREIRA, G. T.; ANDRIOLI, I. Comparação de dois penetrômetros na avaliação da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho sob diferentes usos. **Acta Scientiarum**, Maringá, v.25, n.1, p.53-57, 2003.

SANTANA, A. V.; FERREIRA, E. M.; GUIMARÃES, L. E.; CALIL, F. N.; TSAI, H. M. Resistência à penetração em solo sob sistema integração lavoura-pecuária-floresta, pasto convencional e mata nativa do cerrado. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.10, n.18; p. 2676. 2014.

SILVA, F. R.; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A. Crescimento inicial da cultura da soja em Latossolo Bruno com diferentes graus de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 38:1731-1739, 2014.

SOUZA, E. B.; PATROCÍNIO FILHO, A. P.; PIMENTA, W. A.; NAGAHAMA, H. J.; CORTEZ, J. W. Resistência mecânica do solo à penetração em função da sua umidade e do tipo de penetrômetro. **Engenharia na agricultura**, Viçosa, v.22, n.1, p. 67-76, 2014.

STOLF, R. Teoria de testes experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Campinas, v.15, p.229-235, 1991.

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

TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER Jr., J. J. **Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials**. Soil Science, 102p. 1966.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.20, p.333-339, 1996.

WATANABE, S.H.; TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; VIDIGAL FILHO, P. S.; PINTRO, J. C.; COSTA, A. C. S.; MUNIZ, A. S. Propriedades físicas de uma Latossolo vermelho distrófico

influenciadas por sistema de preparos do solo utilizados para implantação da cultura de mandioca.

**Acta Scientiarum**, Maringá, v.24, n.5, p.1255-1264, 2002.