

## INFLUÊNCIA DE PLANTAS DE COBERTURA EM PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO SOB ROTAÇÃO DE CULTURAS EM PLANTIO DIRETO E PREPARO CONVENCIONAL

Camila Cassante de Lima

### RESUMO

Foi realizado experimento em um Latossolo Vermelho Distrófico argiloso a muito argiloso no Centro Experimental Central do Instituto Agronômico em Campinas, São Paulo, com o objetivo de avaliar a influência de plantas de cobertura no balanço de água no solo de uma cultura de verão (feijão) e uma cultura de inverno (triticale) sob plantio direto consolidado e preparo convencional do solo recém mobilizado e avaliar atributos físicos do solo dos diferentes sistemas de produção agrícola utilizados. O delineamento experimental em blocos casualizados foi composto por três blocos com parcelas subdivididas, sendo o fator da parcela o manejo do solo (plantio direto e preparo convencional) e o fator da subparcela a cobertura do solo (gramínea, leguminosa e pousio). As parcelas experimentais foram instrumentalizadas com tensiômetros às profundidades de 0,70 e 0,90 m. O balanço de água no solo foi realizado em períodos de tempo de aproximadamente 15 dias, num volume de solo delimitado pela superfície do solo a profundidade de 0,80 m, englobando o ciclo do feijão e o ciclo do triticale. Para estimar a drenagem interna foi calculada diariamente a densidade de fluxo de água na profundidade considerada, pela equação de Darcy-Buckingham. Para isso foram obtidas curvas de retenção da água no solo e foi medida a condutividade hidráulica em função do conteúdo de água no solo pelo método do perfil instantâneo. A evapotranspiração foi determinada por diferença, como incógnita da equação simplificada do balanço de água no solo. Foram também avaliadas a eficiência do uso da água pelas culturas do feijão e do triticale, os componentes de rendimento destas culturas e a produção de matéria seca das plantas de cobertura. Os atributos físicos do solo avaliados foram: densidade do solo, porosidade, macroporosidade, microporosidade e resistência do solo à penetração das raízes. Os resultados obtidos mostraram que: os resíduos culturais da espécie de leguminosa sobre a superfície do solo no plantio direto promoveu menor densidade do solo e menor resistência do solo à penetração das raízes e maior porosidade total e macroporosidade, indicando melhorias das propriedades físicas do solo em relação à sua incorporação no preparo convencional.

Palavras-chave: Feijão, *Phaseolus vulgaris*, Triticale, *Triticosecale rimpaii*, Densidade do solo, Porosidade.

### ABSTRACT

An experiment was carried out on a clayey to very clayey Rhodic Hapludox soil at the Central Experimental Center of the Agronomic Institute in Campinas, São Paulo, with the aim of evaluating the influence of cover plants on soil water balance processes, of a summer crop (bean) and a winter crop (triticale) under consolidated no-tillage and conventional tillage and also evaluating the physical attributes of the soil of the different agricultural production systems used. The randomized block experimental design was composed of three blocks with subdivided plots. The plot factor was soil management (no-tillage and conventional tillage) and the subplot factor was soil cover (grass, legume and fallow). The

experimental plots were instrumented with tensiometers at depths of 0.70 and 0.90 m. The soil water balance was carried out over periods of approximately 15 days in a volume of soil delimited by the soil surface and the depth of 0.80 m, including the bean and the triticale cycles. To estimate the internal drainage, the water flow density was calculated daily at the considered depth, by the Darcy-Buckingham equation. For this, soil water retention curves were determined and the soil hydraulic conductivity as function of soil water content was evaluated by the instantaneous profile method. Evapotranspiration was determined by difference as unknown of the simplified no lateral water flow equation of soil water balance. The water use efficiency by bean and triticale crops, the yield components of these crops and dry matter yield of cover plants was also evaluated. The soil physical attributes evaluated were: bulk density, porosity, macroporosity, microporosity and soil resistance to penetration. The results obtained showed that: the maintenance of crop residues of the legume species on the soil surface under no-tillage promoted lesser bulk density and soil penetration resistance and greater total porosity and macroporosity, indicating better conditions to the soil physical properties in relation to their incorporation in the soil under conventional tillage.

Keywords: Bean, *Phaseolus vulgaris*, Triticale, *Triticosecale rimpaii*, Bulk density, Porosity.

## INTRODUÇÃO

O uso de áreas nas regiões tropicais e subtropicais para o cultivo convencional de culturas tem ocasionado diminuição do potencial produtivo dos solos agrícolas. A movimentação intensa do solo e a reposição inadequada dos nutrientes exportados pelas culturas podem constituir-se em fatores limitantes para a manutenção e o aumento da produtividade, levando à degradação do solo decorrente do manejo inadequado (BAYER et al., 2004; BERTIN et al., 2005; ANDRIOLI; PRADO, 2012).

Diante disso, surgiu o sistema plantio direto (SPD), um manejo conservacionista que contribui efetivamente para a produção agrícola sustentável (JUSTES, 2017), pois envolve a manutenção de resíduos vegetais de espécies antecessoras na superfície do solo, conhecidas como plantas de cobertura, e, posteriormente, há o estabelecimento de culturas mediante mobilização do solo exclusivamente na linha de semeadura (KOCHHANN; DENARDIN, 2000; DALMAGO, 2004; NUNES et al., 2006), excluindo, desta forma, práticas de revolvimento do solo (gradagem, aração, subsolagem e escarificação) adotadas em solos manejados convencionalmente (BAYER et al., 2004; BERTIN et al., 2005; TORRES et al., 2008).

Plantas de cobertura são incorporadas à rotação do sistema de cultivo por causa de suas supostas contribuições potenciais à conservação do solo e da água (SHARMA; IRMAK, 2017). Segundo Alvarenga et al. (1995) e Campos et al. (1995), a proteção da superfície do solo com resíduos vegetais é o manejo mais recomendado para a proteção e a conservação do solo, pois minimiza as perdas de solo por erosão devido à diminuição do impacto das gotas de chuva, reduzindo o escoamento e o selamento superficial do solo. Contribui, ainda com uma maior infiltração de água, melhoria na condução e armazenagem de água (ESHEL et al., 2015; YU et al., 2016) bem como numa melhor distribuição de água no perfil do solo (ALONSO-AYUSO et al., 2014). Embora haja estudos que confirmem estes efeitos, deve-se levar em

consideração que estas mudanças no solo ocorrem de forma lenta e gradual e que a sua magnitude depende do clima e do solo (MEYER et al., 2019).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de plantas de cobertura em processos do balanço de água em um Latossolo Vermelho em rotação de culturas sob sistema de plantio direto e preparo convencional e avaliar os atributos físicos do solo dos diferentes sistemas de produção agrícola utilizados.

## MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no Centro Experimental Central do Instituto Agrônomo, mais especificamente na Fazenda Santa Elisa, situada em Campinas, SP, Brasil (22°54'S, 47°05'W e 669 m de altitude).

O clima da região é tropical de altitude, Cwa segundo Köppen, com temperatura média de 24 °C, com verões quentes e úmidos e pluviosidade média de 229,5 mm em janeiro e invernos de temperaturas amenas e pluviosidade média de 28,2 mm em julho; a pluviosidade média anual é de 1.398 mm (Alvares et al. 2013).

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico férrico, argiloso a muito argiloso, bem drenado e com declividade de aproximadamente 2% (SANTOS et al., 2018).

As parcelas experimentais possuem 800 m<sup>2</sup> (80,0 x 10,0 m) e 200,0 m<sup>2</sup> (20,0 x 10,0 m). O delineamento experimental em blocos casualizados (DBC) foi composto por três blocos (repetição) com parcelas subdivididas, sendo o fator da parcela o manejo do solo (Plantio Direto – PD e Preparo Convencional – PC) e o fator da subparcela três tipos de cobertura do solo: a gramínea sorgo-forrageiro (*Sorghum bicolor* L.), a leguminosa feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis* L.) e sem cobertura (parcelas que permaneceram sob pousio), contabilizando 18 unidades experimentais.

Portanto, os tratamentos são descritos como: PC-Gramínea; PC-Leguminosa; PC-Pousio; PD-Gramínea; PD-Leguminosa e PD-Pousio. Nos tratamentos sob Preparo Convencional do solo (PC) a palha existente de cultivos anteriores foi incorporada com a grade aradora nos respectivos tratamentos (PC-Gramínea e PC-Leguminosa). Em PC-Pousio não há palha incorporada.

As amostras indeformadas de solo foram coletadas em anéis metálicos de aproximadamente 0,05 m de altura, 0,05 m de diâmetro e volume interno de 100 cm<sup>3</sup>, utilizando o amostrador de Uhland, nas camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, em novembro/2018 (final do ciclo das plantas de cobertura), em março/2018 (final do ciclo do feijão) e em agosto/2019 (final do ciclo do tritcale), para determinação da densidade do solo, porosidade, macroporosidade, microporosidade e resistência do solo à penetração.

A densidade dos sólidos ( $\rho_s$ ), quociente da massa de sólidos ( $m_s$ ) e o volume de sólidos ( $V_s$ ) foi determinada pelo método do picnômetro (FLINT; FLINT, 2002), realizada em amostras de solo passadas em peneira de malha 2,00 mm e secas em estufa a 105°C:

$$\rho = \frac{m_s}{V_s} \text{ (kg m}^{-3}\text{)} \quad [1]$$

A densidade do solo ( $\rho$ ) foi determinada a partir de amostras indeformadas de solo e calculada pelo quociente da massa de sólidos ( $m_s$ ) e o volume ( $V$ ) do respectivo anel volumétrico:

$$\rho = \frac{m_s}{V} \text{ (kg m}^{-3}\text{)} \quad [2]$$

A porosidade ( $\alpha$ ) foi calculada a partir dos valores determinados de  $\rho$  e  $\rho_s$ :

$$\alpha = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) \text{ (m}^3 \text{ m}^{-3}\text{)} \quad [3]$$

A microporosidade foi calculada a partir da diferença entre o conteúdo de água volumétrico na amostra de solo saturada e o conteúdo de água na amostra equilibrada em 6 kPa em mesa de tensão correspondente à água retida nos microporos (KIEHL, 1979). A macroporosidade foi calculada pela diferença entre a porosidade e microporosidade, sendo os valores expressos em  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ .

A resistência do solo à penetração foi determinada no campo, quando o conteúdo de água do solo estava próximo à capacidade de campo ( $0,29 \text{ g g}^{-1}$ ), antes do preparo do solo (14/08/2018) e após o preparo do solo (23/08/2018) para conhecimento do estado de compactação do solo proveniente dos 13 anos de plantio direto. Para determinar a resistência do solo à penetração foi utilizado um penetrômetro de impacto (modelo IAA/PLANALSUCAR).

Foram realizados três ensaios de resistência do solo à penetração em cada parcela experimental, contabilizando nove repetições para cada tratamento. Seguindo as recomendações de STOLF (1991) para cálculo da resistência, foram contados o número de impactos necessários para que a haste do equipamento penetrasse 0,05 m no solo. A avaliação foi feita até a profundidade de 0,60 m, limite do equipamento. Concomitantemente à resistência do solo à penetração, foram coletadas amostras deformadas de solo a cada 0,10 m para determinação do conteúdo de água.

Nas amostras de solo coletadas nos anéis metálicos ao final do ciclo das culturas (plantas de cobertura, feijão e triticale), após serem equilibrados em mesa de tensão a 6 kPa, para fins de determinação dos atributos físicos do solo, foram realizados ensaios de resistência do solo à penetração utilizando o penetrômetro de bancada CT3<sup>TM</sup> Texture Analyzer da Brookfield Ametek, no Laboratório de Física do Solo da Escola Superior de Agricultura – Luiz de Queiroz (ESALQ/USP).

Com apoio de planilha Excel foram realizados os cálculos de acordo com as equações 4 e 5, sendo os valores obtidos em  $\text{kgf cm}^{-2}$  multiplicados por 0,098 para transformação em unidades MPa:

$$F = (M + m) \cdot g + \left( \frac{M}{M + n} \right) \cdot \left( \frac{Mgh}{x} \right) \quad [4]$$

$$R = \frac{F}{A} \quad [5]$$

em que,  $M$  é a massa que provoca o impacto (kg);  $m$  é a massa dos demais componentes (kg);  $g$  é a aceleração da gravidade ( $9,81 \text{ ms}^{-2}$ );  $h$  é altura de queda (cm);  $x$  é a penetração por impacto (cm);  $R$  é a resistência ( $\text{kgf cm}^{-2}$ );  $F$  é a força da resistência (kgf) e  $A$  é a área da base do cone ( $\text{cm}^2$ ).

Os valores de resistência do solo à penetração obtidos nos anéis metálicos foram corrigidos de acordo com o conteúdo de água no solo e a densidade do solo, utilizando a função não linear (Equação 6) desenvolvida por Busscher (1990):

$$R = b_0 \theta^{b_1} \rho^{b_2} \quad [6]$$

em que,  $R$  é a resistência do solo à penetração (MPa);  $\theta$  é o conteúdo de água à base de volume do solo ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ );  $\rho$  é a densidade do solo ( $\text{kg m}^{-3}$ ) e  $b_0$ ,  $b_1$  e  $b_2$  são parâmetros de ajuste da equação.

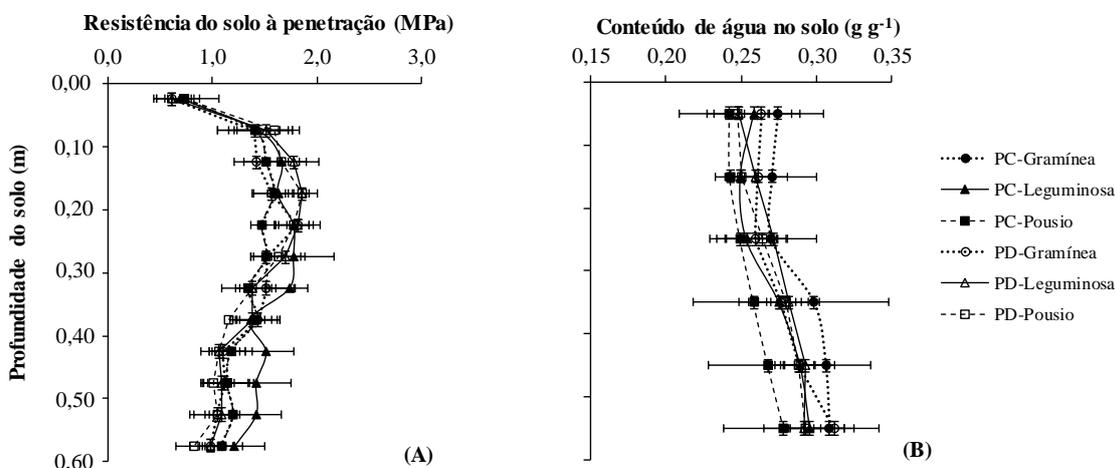
Os dados foram submetidos ao teste de normalidade (SHAPIRO; WILK, 1965) e homocedasticidade (BARTLETT, 1937). Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância, sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey ( $p < 0,10$ ) utilizando o software R (R CORE TEAM, 2016).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Antes do preparo convencional do solo para interrupção do plantio direto cultivado por longo período de tempo, foi realizado ensaio de resistência do solo à penetração das raízes (RP) para averiguação do estado de compactação do solo. No mesmo momento da realização deste ensaio foi medido o conteúdo de água no solo. Os valores obtidos de RP não foram afetados pelo conteúdo de água no solo visto que, para este último não foi verificada diferença estatística (Figura 1).

Os valores de RP obtidos antes do preparo do solo, provenientes de um histórico de 13 anos de PD, demonstram que o solo não apresentava compactação que limitasse o desenvolvimento de plantas ( $< 2,00$  MPa, de acordo com TAYLOR et al., 1966), independentemente do tipo da planta de cobertura utilizada,

evidenciando que a adoção de sistemas de rotação de culturas, em especial sob plantio direto indica bom potencial de melhoria das condições físicas do solo para o crescimento das plantas (ANDRADE et al., 2009).



**Figura 1. (A):** Médias da resistência do solo à penetração dos tratamentos experimentais antes do preparo do solo. **(B):** Conteúdo de água no solo no momento de execução do ensaio de resistência do solo à penetração. Barras horizontais em cada ponto indicam o intervalo de confiança da média ( $p \leq 0,10$ ).

Após o preparo do solo, percebe-se que o sistema de preparo influenciou os valores de resistência à penetração da camada de 0,00-0,15 m de profundidade (Figura 2), para a qual, menor RP foi verificada em todas as coberturas sob o PC (Figura 2A). Estas diferenças devido ao preparo do solo ocorreram por causa da pulverização do solo e do desarranjo dos agregados os quais, ao serem atingidos pela extremidade do penetrômetro, quebravam-se com facilidade (BEUTLER et al., 2001).

Embora saiba-se que os solos sob PD, com elevado teor de argila, sofram compactação em sua superfície (SECCO et al., 2000), não se pode afirmar que o solo sob o PD do presente estudo estivesse compactado, pois os valores obtidos de RP não indicam a ocorrência deste processo, o qual é classificado como moderado no PD e baixo no PC até a profundidade de 0,15 m, conforme a classificação da Soil Survey Staff (ARSHAD et al., 1996).

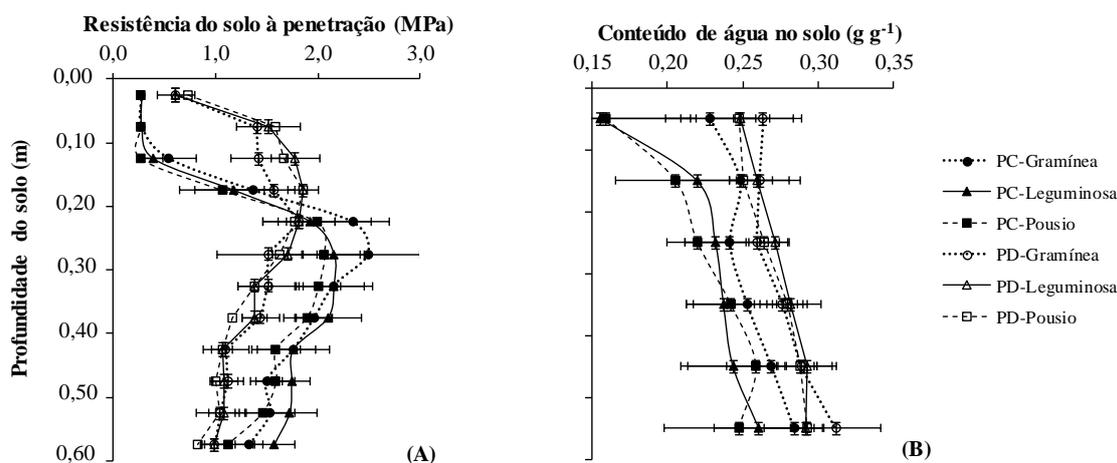
Os maiores conteúdos de água no solo sob PD em relação ao sob PC, embora não constatada diferença significativa, podem ter influenciado os resultados obtidos. Idealmente é sugerido que a avaliação da resistência à penetração seja efetuada quando as áreas estejam com o mesmo conteúdo de água e que este seja o mais próximo possível da capacidade de campo do solo (ARSHAD et al., 1996), pois com a redução do conteúdo de água no solo há aumento na resistência à penetração decorrente da maior coesão entre as partículas (BELTRAME et al., 1981). No entanto, em experimentos de campo isto quase nunca é possível, visto que o próprio manejo do solo altera a dinâmica da água, dificultando comparações entre sistemas de manejo.

A partir da profundidade de 0,15 m são observadas diferenças pontuais em cada camada de solo em profundidade, destacando-se: na camada 0,15-0,20 m o PD-Pousio apresentou maior RP em relação ao PC-Pousio, ainda pela influência da ausência/presença de preparo do solo, respectivamente; a partir da

camada de 0,20-0,25 m, o comportamento das curvas de resistência à penetração é invertido e o PC passa a apresentar maior RP em todas as camadas subsequentes; na camada de 0,25-0,30 m o PC-Gramínea e o PC-Leguminosa apresentaram RP superiores, em relação a todos os demais tratamentos sob PD, e o PC-Pousio foi diferente apenas do PD-Gramínea; nas camadas de 0,30-0,35 m até a camada de 0,55-0,60 m, o PC apresentou RP superior ao PD, independentemente do tipo de cobertura do solo.

Estes resultados preliminares indicam a insustentabilidade da interrupção do PD cultivado por longo período de tempo, visto que, logo após o primeiro preparo do solo os valores de RP das camadas de 0,20-0,25 e 0,25-0,30 m de profundidade em PC-Gramínea, PC-Leguminosa e PC-Pousio são superiores a 2,00 MPa, que caracterizam a ação dos discos da grade pesada e da grade niveladora e ao tráfego de máquinas, como também observado por Castro (1995) em milho e Beutler et al. (2001) em rotação com as culturas do milho e do feijão em preparo convencional do solo.

Estudos têm mostrado maior resistência à penetração em sistemas de manejo sob plantio direto em relação ao preparo convencional do solo, a partir da profundidade de 0,15 m (BEUTLER et al., 2001; COSTA et al., 2003; SILVA et al., 2009) e outros o contrário, concordando com os resultados encontrados no presente estudo (SILVA et al., 2000). Para Beutler et al. (2001) estes aspectos estão relacionados ao tráfego de máquinas e à ação dos implementos agrícolas utilizados no preparo do solo, além do tempo diferencial de condução dos ensaios.



**Figura 2. (A):** Médias da resistência do solo à penetração dos tratamentos experimentais após o preparo do solo. **(B):** Conteúdo de água no solo no momento de execução do ensaio de resistência do solo à penetração. Barras horizontais em cada ponto indicam o intervalo de confiança da média ( $p \leq 0,10$ ).

Os efeitos simples de preparo e cobertura do solo foram significativos na macroporosidade e RP, e na microporosidade e RP, respectivamente, ao final do ciclo das plantas de cobertura. O desdobramento da interação preparo  $\times$  cobertura do solo levaram a resultados significativos apenas para a microporosidade na camada de 0,10-0,20 m de profundidade e RP nas camadas de 0,00-0,05 e 0,10-0,20 m de profundidade.

Nota-se maior macroporosidade nas camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m de profundidade e menor RP nas camadas de 0,05-0,10 e 0,20-0,30 m de profundidade no PC (Tabela 1). Este efeito já era esperado devido ao revolvimento do solo neste sistema de preparo. Por outro lado, a ausência de mobilização do solo no PD diminuiu a macroporosidade e aumentou a RP em relação ao PC. Silveira et al. (2008) também encontraram menor macroporosidade no PD em relação ao PD arado anualmente, que se assemelha ao PC do presente estudo. No entanto, o solo em ambos os sistemas de preparo não apresentou macroporosidade inferior a  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , considerado o valor crítico ao desenvolvimento de plantas e difusão de oxigênio (XU et al., 1992).

**Tabela 1.** Efeito simples do preparo do solo nas médias da macroporosidade e da resistência do solo à penetração ao final do ciclo das plantas de cobertura nas camadas avaliadas.

Preparo	Camada (m)			
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30
	Macroporosidade ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )			
PC	0,21 a	0,22 a	0,14 a	0,19 a
PD	0,18 b	0,19 b	0,19 a	0,19 a
	Resistência do solo à penetração ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )			
PC	0,67 a	0,74 b	0,84 a	0,74 b
PD	0,78 a	0,81 a	0,84 a	0,82 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 10% de probabilidade.

Os baixos valores de RP encontrados nos anéis metálicos em cada ciclo de cultivo são explicados pelo elevado conteúdo de água no momento da condução dos ensaios de resistência à penetração. À medida que há incremento do conteúdo de água no solo há redução das forças de adsorção que resultam na redução do contato entre as partículas do solo (LIBARDI, 2012).

Verifica-se modificação da microporosidade na camada de 0,00-0,05 m de profundidade e da RP na camada de 0,05-0,10 m de profundidade em função da planta de cobertura utilizada (Tabela 2). Maior microporosidade foi verificada quando se utiliza a gramínea em relação à leguminosa. Já a área que permaneceu sem cobertura se igualou as demais coberturas, provavelmente devido ao fato de ter ocorrido o desenvolvimento de uma gama de espécies daninhas de diversas composições. Para a RP, o efeito significativo de cobertura foi notado na camada de 0,05-0,10 m de profundidade, onde a gramínea apresentou valores de RP superiores, seguido da leguminosa e da área sob pousio. Isso pode ser explicado pois, as espécies de gramíneas apresentam sistema radicular volumoso e agressivo e com alto potencial de fixação de carbono e, por isso, quando utilizados como plantas de cobertura podem melhorar a porosidade e a agregação do solo em médio e longo prazos (IGUE, 1984, DIAS JÚNIOR, 2000).

**Tabela 2.** Efeito simples da cobertura do solo nas médias da microporosidade e da resistência do solo à penetração ao final do ciclo das plantas de cobertura nas camadas avaliadas.

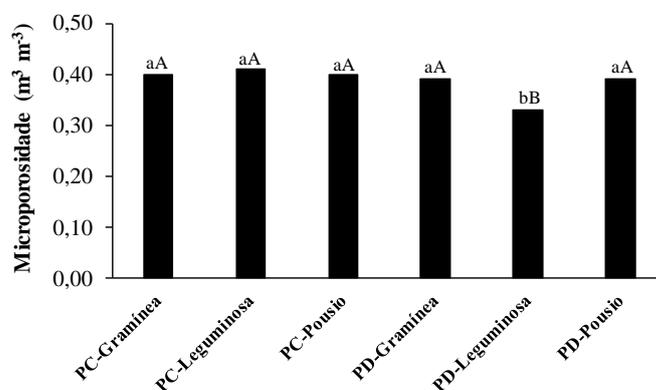
Cobertura	Camada (m)			
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30
	Microporosidade ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )			

Gramínea	0,41 a	0,37 a	0,40 a	0,38 a
Leguminosa	0,35 b	0,33 a	0,37 a	0,37 a
Pousio	0,39 ab	0,39 a	0,40 a	0,38 a

	Resistência do solo à penetração ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )			
Gramínea	0,76 a	0,86 a	0,87 a	0,79 a
Leguminosa	0,68 a	0,77 ab	0,81 a	0,81 a
Pousio	0,75 a	0,72 b	0,85 a	0,76 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 10% de probabilidade.

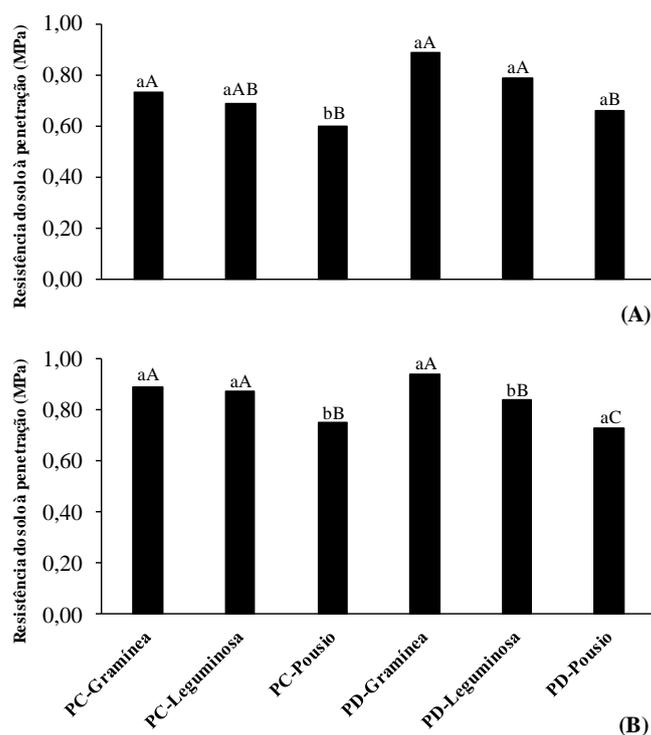
Por meio do desdobramento da interação significativa, nota-se que a microporosidade na camada de 0,10-0,20 m de profundidade foi superior em PC-Leguminosa em relação ao PD-Leguminosa e este último foi inferior ao PD-Gramínea e ao PD-Pousio (Figura 3). Embora não constatadas diferenças estatísticas, Andrade et al. (2009) também observaram menores microporosidades em sistemas que utilizaram leguminosas em relação a gramíneas.



**Figura 3.** Médias da microporosidade do solo na camada de 0,10-0,20 m de profundidade nos tratamentos experimentais ao final do ciclo das plantas de cobertura. Letra minúscula compara preparos de solo diferentes dentro da mesma espécie de cobertura e letra maiúscula compara plantas de cobertura dentro do mesmo preparo do solo, a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Com relação à RP, para o desdobramento da interação, nota-se que o PC-Pousio foi inferior ao PD-Pousio na camada de 0,00-0,05 e 0,10-0,20 m de profundidade (Figura 4A e Figura 4B) devido ao preparo do solo, assim como já constatado na figura 20, e a RP do PD-Leguminosa foi inferior ao do PC-Leguminosa (Figura 4B). Dentro de cada preparo do solo a RP seguiu a seguinte ordem: Gramínea = Leguminosa  $\geq$  Pousio na camada de 0,00-0,05 m de profundidade (Figura 4A) e Gramínea  $\geq$  Leguminosa > Pousio na camada de 0,10-0,20 m de profundidade (Figura 4B).

A maior RP encontrada nos tratamentos sob cobertura de gramínea pode ser explicada pelo seu sistema radicular abundante que está relacionado, direta ou indiretamente, na estabilização do solo, pois protege os agregados (ALVARENGA et al., 1995). Além disso, a utilização de gramíneas como plantas de cobertura, sobretudo com a utilização da rotação de culturas, protege a superfície do solo com a presença de resíduos vegetais, e proporciona aumento do movimento de água e de difusão de gases por meio de canais que se formam pela decomposição das raízes (MÜLLER et al., 2001).



**Figura 4.** Médias da resistência do solo à penetração nos tratamentos experimentais ao final do ciclo das plantas de cobertura. **(A):** camada de 0,00-0,05 m de profundidade. **(B):** camada de 0,10-0,20 m de profundidade. Letra minúscula compara preparos de solo diferentes dentro da mesma espécie de cobertura e letra maiúscula compara plantas de cobertura dentro do mesmo preparo do solo, a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Para o ciclo da cultura do feijão nota-se que o efeito simples de preparo do solo foi significativo para todos os atributos físicos, com exceção da microporosidade (Tabela 3). Segundo Dal Ferro et al. (2014), a microporosidade possui baixa sensibilidade para detectar alterações na estrutura do solo induzidas pelo manejo. No entanto, o efeito simples de cobertura do solo foi significativo na microporosidade e RP (Tabela 4). Embora significativos os efeitos observados nos sistemas de cultivos avaliados, as diferenças foram numericamente pequenas. Não houve efeito significativo para o efeito da interação preparo x cobertura do solo em nenhum atributo físico do solo para o ciclo da cultura do feijão.

A densidade do solo foi superior no PC nas camadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m de profundidade e, conseqüentemente, a porosidade foi menor em relação ao PD. A macroporosidade superior no PD na camada de 0,05-0,10 m de profundidade é consequência da maior porosidade e menor RP (Tabela 3). Portanto, o cultivo do feijão sob as plantas de coberturas promoveu certa alteração na estrutura do solo no PC, onde se observa início do processo de compactação decorrente, sobretudo, do rompimento da estrutura ocasionado por duas mobilizações consecutivas do solo e posterior rearranjo da estrutura do solo.

**Tabela 3.** Efeito simples de preparo do solo nas médias da densidade do solo, porosidade, macroporosidade e da resistência do solo à penetração ao final do ciclo da cultura do feijão nas camadas avaliadas.

Preparo	Camada (m)			
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30
	Densidade do solo ( $\text{kg m}^{-3}$ )			
PC	1169,92 a	1298,03 a	1331,94 a	1273,89 a
PD	1191,03 a	1238,10 b	1243,73 b	1244,10 a
	Porosidade ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )			
PC	0,60 a	0,56 b	0,55 b	0,57 a
PD	0,60 a	0,58 a	0,58 a	0,58 a
	Macroporosidade ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )			
PC	0,23 a	0,18 b	0,16 a	0,20 a
PD	0,23 a	0,21 a	0,20 a	0,21 a
	Resistência do solo à penetração (MPa)			
PC	0,68 a	0,81 a	0,85 a	0,78 a
PD	0,69 a	0,74 b	0,78 a	0,75 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 10% de probabilidade.

No presente estudo, ao contrário do que normalmente é praticado, a área com 13 anos de PD foi interrompida por meio do preparo convencional do solo, onde se utilizou grade aradora e niveladora para rompimento da estrutura do solo. Neste sentido, o solo sob PD consolidado já apresentava propriedades físicas adequadas ao desenvolvimento de culturas agrícolas, decorrentes da manutenção de cobertura do solo com material vegetal que favorece a adição de matéria orgânica na superfície elevando a capacidade de suporte de carga do solo (FIDALSKI, et al., 2015).

Para o efeito das coberturas do solo no cultivo do feijão, nota-se maior microporosidade sob gramínea, seguido de leguminosa e pousio, na camada de 0,00-0,05 m de profundidade e, na camada de 0,10-0,20 m de profundidade, a cobertura com leguminosa apresentou maior RP seguido do pousio e da gramínea (Tabela 4). Para o ciclo da cultura do triticale foi observado efeito simples de preparo do solo na macroporosidade e microporosidade (Tabela 5).

**Tabela 4.** Efeito simples da cobertura do solo nas médias da microporosidade e da resistência do solo à penetração ao final do ciclo da cultura do feijão nas camadas avaliadas.

Cobertura	Camada (m)			
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30
	Microporosidade ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )			
Gramínea	0,38 a	0,38 a	0,38 a	0,38 a
Leguminosa	0,37 ab	0,38 a	0,41 a	0,38 a
Pousio	0,36 b	0,37 a	0,37 a	0,37 a

	Resistência do solo à penetração (MPa)			
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30
Gramínea	0,68 a	0,76 a	0,74 b	0,78 a
Leguminosa	0,67 a	0,81 a	0,88 a	0,76 a
Pousio	0,71 a	0,76 a	0,83 ab	0,78 a

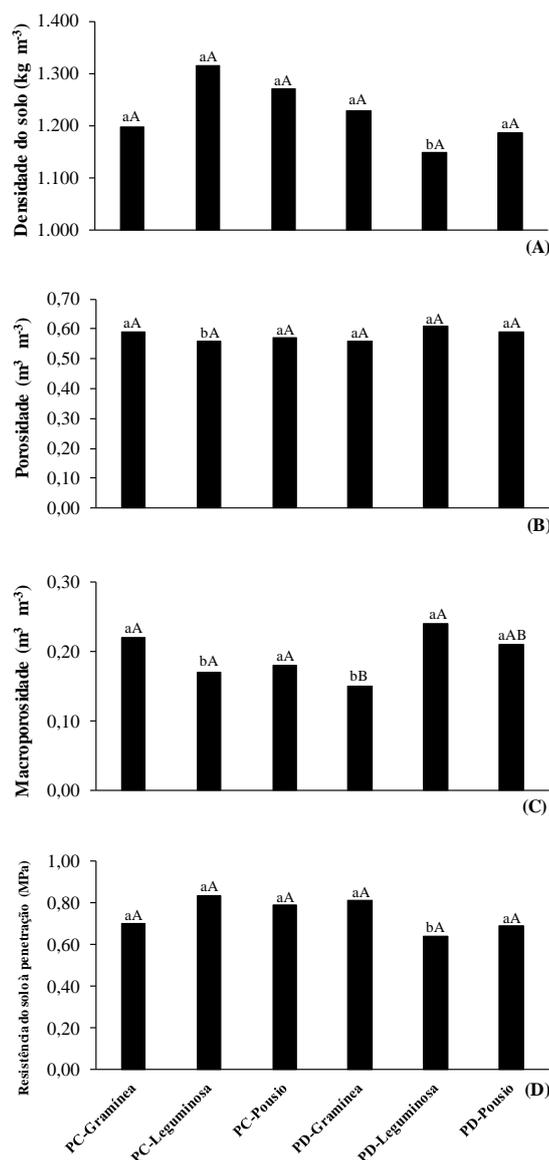
Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 10% de probabilidade.

**Tabela 5.** Efeito simples do preparo do solo nas médias da macroporosidade e da microporosidade ao final do ciclo da cultura do triticale nas camadas avaliadas.

Preparo	Camada (m)			
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30
	Macroporosidade ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )			
PC	0,23 a	0,20 a	0,17 a	0,19 b
PD	0,19 a	0,20 a	0,18 a	0,20 a
	Microporosidade ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )			
PC	0,37 b	0,37 a	0,39 a	0,39 a
PD	0,39 a	0,37 a	0,39 a	0,39 a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 10% de probabilidade.

O desdobramento da interação preparo  $\times$  cobertura do solo foram significativos para a densidade do solo, porosidade, macroporosidade e RP na camada de 0,20-0,30 m de profundidade, e para a microporosidade na camada de 0,05-0,10 m de profundidade, onde se verifica maior densidade do solo e RP e, conseqüentemente, menor porosidade e macroporosidade em PC-Leguminosa em relação ao PD-Leguminosa na camada de 0,20-0,30 m de profundidade (Figura 5).



**Figura 5.** Médias dos atributos físicos do solo na camada de 0,20-0,30 m de profundidade nos tratamentos experimentais ao final do ciclo da cultura do triticale. **(A):** densidade do solo. **(B):** porosidade. **(C):** macroporosidade. **(D):** resistência do solo à penetração. Letra minúscula compara preparos de solo diferentes dentro da mesma espécie de cobertura e letra maiúscula compara plantas de cobertura dentro do mesmo preparo do solo, a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.

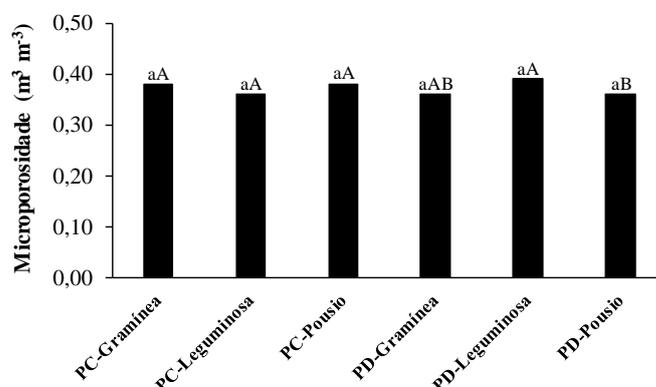
Embora nos ciclos de cultivo anteriores não tenha sido constatada diferença para a densidade do solo entre os tratamentos, observa-se tendência de aumento desta propriedade do solo ao longo dos ciclos das plantas de cobertura para a cultura do triticale em PC-Leguminosa na camada de 0,20-0,030 m de profundidade. Já em PD-Leguminosa, a densidade do solo diminuiu a cada ciclo de cultivo, na mesma camada de solo, revelando que o PD permite a preservação e melhoria da qualidade ao longo do tempo, assim como relatado por outros autores em solos tropicais (COSTA et al., 2006; CAVALIERI et al., 2009).

Os atributos físicos do solo não foram alterados no PC, demonstrando que o preparo do solo com grade aradora e niveladora promove a homogeneização da estrutura do solo independentemente do tipo de planta

de cobertura que é incorporada. Já no PD, verifica-se maior macroporosidade no PD-Leguminosa, seguido de PD-Pousio e PD-Gramínea na camada de 0,20-0,30 m de profundidade (Figura 5C), enquanto que para a microporosidade, os maiores valores também foram encontrados em PD-Leguminosa, seguido de PD-Gramínea e PD-Pousio na camada de 0,05-0,10 m de profundidade (Figura 6).

Estudando diferentes coberturas do solo em PD, Andrade et al. (2009) também observaram aumento da macroporosidade na camada superficial (0,00-0,10 e 0,10-0,20 m de profundidade), do solo sob cobertura de leguminosa em relação ao solo sob cobertura de gramínea. Argenton et al. (2005) também verificaram que o uso de leguminosas como plantas de cobertura em rotação com gramíneas demonstrou ser uma prática benéfica para as propriedades relacionadas com a estrutura do solo, visto que aumentou a macroporosidade e a porosidade e reduziu a densidade do solo, quando comparada com rotação incluindo somente gramíneas.

O valor de densidade do solo considerado limitante para o crescimento de culturas em Latossolos argilosos brasileiros ( $1330,00 \text{ kg m}^{-3}$ ), segundo Reichert et al. (2009), foi encontrado no PD-Pousio na camada de 0,05-0,10 m de profundidade no ciclo das plantas de cobertura, demonstrando a importância da manutenção da cobertura do solo com restos vegetais em sistemas de manejo que não mobilizam a superfície do solo. Tal valor limitante também foi encontrado no PC-Leguminosa no ciclo do feijão na camada de 0,05-0,10 m de profundidade, no PC-Leguminosa e no PC-Pousio na camada de 0,10-0,20 m de profundidade e no PC-Gramínea e PC-Leguminosa no ciclo do feijão na camada de 0,20-0,30 m de profundidade. Apesar deste valor de densidade do solo limitante, não foram observadas macroporosidades abaixo do limite crítico ( $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) para aeração adequada do solo.



**Figura 6.** Médias da microporosidade na camada de 0,05-0,10 m de profundidade nos tratamentos experimentais ao final do ciclo da cultura do triticales. Letra minúscula compara preparos de solo diferentes dentro da mesma espécie de cobertura e letra maiúscula compara plantas de cobertura dentro do mesmo preparo do solo, a 10% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Para a avaliação dos atributos físicos do solo ao longo dos ciclos de cultivo, percebe-se, no presente estudo, que o uso contínuo do plantio direto de 13 anos melhorou a qualidade física do solo, principalmente nas camadas mais profundas em relação ao preparo convencional do solo que, embora, na maioria das vezes, não tenha apresentado condições limitantes ao desenvolvimento das plantas, deve ser

evitado, pois o revolvimento do solo promove a incorporação do material vegetal, altera a agregação, que retém a maior parte dos nutrientes necessários às plantas, deixando a superfície do solo exposta aos agentes de erosão (WÜRSCHÉ; DENARDIN, 1980).

A manutenção de resíduos culturais na superfície do solo, sob PD, promove condições distintas às propriedades do solo, em relação à sua incorporação nos solos sob preparo convencional (HOLTZ, 1995). O preparo convencional do solo, devido a transmissão da pressão realizada na superfície do solo pelas máquinas e equipamentos agrícolas, pela compressão exercida pela lâmina dos discos do arado, bem como do pneu do trator rodando no sulco de aração, causa a compactação do solo nas camadas subsuperficiais, conhecida como “pé-de-grade” e “pé-de-arado” ao longo do tempo, limitando o crescimento das plantas (CAMARGO, 1983; COSTA et al., 2003), além de mudanças do regime hídrico do solo, da temperatura do solo e da distribuição de nutrientes no solo (MUZILLI, 1983).

Resultados semelhantes ao presente estudo foram encontrados por Moraes et al. (2016) que observaram que o sistema de plantio direto de longo prazo (22 anos) preservou a qualidade estrutural de Latossolos argilosos do sul do Brasil ao longo do tempo e forneceram condições físicas adequadas para o crescimento das culturas. Por outro lado, os sistemas convencionais de preparo do solo levaram a uma estrutura pobre do solo, principalmente na camada de 0,20-0,30 m de profundidade.

Os efeitos da cobertura do solo e rotação de culturas nos atributos físicos foram pequenos, e provavelmente são explicados por sua baixa sensibilidade às mudanças na estrutura do solo induzidas pelos sistemas de cultivo, sendo necessários mais estudos usando indicadores de qualidade física mais sensíveis ou sistemas de cultivo mais diversificados.

Sabe-se que os efeitos do preparo do solo nas propriedades físicas do solo dependem do tempo, espaço e manejo (TANGYUAN et al., 2009, WANG; SHAO, 2013, MUNKHOLM et al., 2013, DERPSCH et al., 2010) e são determinados por vários fatores, como clima (MUNKHOLM et al., 2013), textura do solo, camada do solo, tempo de amostragem (TANGYUAN et al., 2009), conteúdo de matéria orgânica (MAHBOUBI et al., 1993), sistemas de cultivo (MUNKHOLM et al., 2013) e intensidade do tráfego de máquinas (MAHBOUBI et al., 1993), levando a discrepâncias geralmente observadas nos resultados.

Além disso, é importante considerar que a magnitude dos efeitos do revolvimento do solo na qualidade estrutural é altamente dependente da variabilidade e sensibilidade dos atributos físicos utilizados (MORAES et al., 2016). Por isso, experimentos de manejo do solo devem ser realizados a longo prazo, em regiões de importância para as culturas, com o intuito de esclarecer os efeitos combinados de todos os fatores ao longo do tempo, para que então, resultados claros e concisos quanto ao efeito do preparo do solo na qualidade física do solo possam ser mensurados (BA et al., 2014; MORAES et al., 2016).

Nesse contexto, o PD tem sido considerado uma das práticas de manejo mais importantes para atender às demandas agrícolas futuras de forma sustentável (DERPSCH et al., 2010) e, ao mesmo tempo, preservar a qualidade do solo, reduzindo a erosão (LAL, 2007) e aumentando o teor de carbono orgânico do solo (ZOTARELLI et al., 2012), a estabilidade de agregados (ALVAREZ; STEINBACH, 2009), a biodiversidade (ADL et al., 2005) e a atividade biológica (BABUJIA et al., 2010).

## CONCLUSÕES

Os resíduos culturais da espécie de leguminosa sobre a superfície do solo no PD promoveu menor densidade do solo e menor resistência do solo à penetração das raízes e maior porosidade total e macroporosidade, indicando melhorias das propriedades físicas do solo em relação à sua incorporação no PC.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADL, S.M.; COLEMAN, D.C.; READ, F. Slow recovery of soil biodiversity in sandy loam soils of Georgia after 25 years of no-tillage management. **Agriculture Ecosystems and Environment**, 114:323-334, 2005.
- ALONSO-AYUSO, M.; GABRIEL, J.L.; QUEMADA, M. The kill date as a management tool for cover cropping success. **Plos One**, 9:e109587, 2014.
- ALVARENGA, R.M.; COSTA, L.M.; MOURA FILHO, W.; REGAZZI, A.J. Características de alguns adubos verdes de interesse para a conservação e recuperação de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 30:175-185, 1995.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, 22:711-728, 2013.
- ANDRADE, R.S.; STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. Culturas de cobertura e qualidade física de um Latossolo em plantio direto. **Revista de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 13:411-418, 2009.
- ANDRIOLI, I.; PRADO, R.M. Plantas de cobertura em pré-safra e adubação nitrogenada na fertilidade do solo em diferentes camadas, cultivado com milho em sistema de plantio direto e convencional. **Semina**, 33:963-978, 2012.
- ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; WILDNER, L.P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 29:425-435, 2005.
- ARSHAD, M.A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. **Physical tests for monitoring soil quality**. In: DORAN, J.W. & JONES, A.J., eds. Methods for assessing soil quality. Madison, Soil Science Society of America. 1996. p.123-141 (SSSA Special publication, 49).
- BABUJIA, L.C.; HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J.C.; BROOKES, P.C. Microbial biomass and activity at various soil depths in a Brazilian oxisol after two decades of no-tillage and conventional tillage. **Soil Biology and Biochemistry**, 42:2174-2181, 2010.
- BARTLETT, M.S. **Properties of sufficiency and statistical tests**. Proceedings of the Royal Society, Series A, 1937.

- BAYER, C.; MARTI-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 39:677-683, 2004.
- BELTRAME, L.F.C.; GONDIM, L.A.P.; TAYLOR, F.C. Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 5:145-149, 1981.
- BERTIN, G.E.; ANDRIOLLI, T.; CENTURION, J.F. Plantas de cobertura em pré-safra ao milho em plantio direto. **Acta Scientiarum Agronomy**, 27:379-386, 2005.
- BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; CRUZ, J.C.; PEREIRA FILHO, I.A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho Distrófico típicosob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 25:167-177, 2001.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, 3:519-524, 1990.
- CAMARGO, O.A. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas**. Campinas: Fundação Cargill, 1983. 44p.
- CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICOLODI, R.; RUEDELL, J.; PETRERE, C. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 19:121-126, 1995.
- CASTRO, O.M. Comportamento físico e químico de um Latossolo Roxo em função do seu preparo na cultura do milho (*Zea mays* L.). 1995. 174 f. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.
- CAVALIERI, K.M.V. SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; LEÃO, T.P.; DEXTER, A.R.; HAKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physic properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná Brazil. **Soil Tillage and Research**, 103:158-164, 2009.
- COSTA, E.A.; GOEDERT, W.; SOUSA, D.M.G. Qualidade de solo submetido a sistemas de cultivo com preparo convencional e plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 41:1185-1191, 2006.
- COSTA, F.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27:527-535, 2003.
- DAL FERRO, N.; SARTORI, L.; SIMONETTI, G.; BERTI, A.; MORARI, F. Soil macro- and microstructure as affected by different tillage systems and their effects on maize root growth. **Soil Tillage and Research**, 140:55-65, 2014.
- DALMAGO, G.A. Dinâmica da água no solo em cultivos de milho sob plantio direto e preparo convencional. 2004. 268f. Tese (Doutorado em Fitotecnia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Faculdade de Agronomia, Porto Alegre.

DERPSCH, T.; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A.; HONGWEN, L. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits **Internaticonal Journal of Agricultural Biological Engineering**, 3:1-26, 2010.

DIAS JÚNIOR, M.S. **Compactação do solo**. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., H.V.; SCHAEFER, C.E.G.R., ed. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1. p.55-94.

ESHEL, G.; EGOZI, R.; GOLDWASSER, Y.; KASHTI, Y.; FINE, P.; HAYUT, E.; KAZUKRO, H.; RUBIN, B.; DAR, Z.; KEISAR, O.; DISEGNI, D.M. Benefits of growing potatoes under cover crops in a Mediterranean climate. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 211:1–9, 2015.

FIDALSKI, F.; CAVALIERI-POLIZELI, K.M.V.; TORMENA, C.A.; ANGHINONI, G. AULER, P.A.M. Capacidade de suporte de carga do solo em sistemas de produção de laranja conservacionistas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 39:880-885, 2015.

FLINT, A.L.; FLINT, L.E. Particle density. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Ed.). **Methods of soil analysis: Physical methods**. Part 4. SSSA Book Series n.5., American Society of Agronomy, 2002. p.229-240.

HOLTZ, G.P. Dinâmica da decomposição da palhada e a distribuição do carbono, nitrogênio e fósforo numa rotação de culturas sob plantio direto na região de Carambeí/PR. Curitiba. 1995. 129 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Paraná, Paraná.

IGUE, K. **Dinâmica da matéria orgânica e seus efeitos nas propriedades do solo**. In: Adubação verde no Brasil. Campinas: Fundação Cargill, 1984. p.232-267.

JUSTES, E. **Cover crops for sustainable farming**. Editions Quae (France) and Springer (The Netherlands). 2017. 91p.

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia: relação solo planta**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 273p.

KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E. **Implantação e manejo do sistema plantio direto**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. 36p. (Embrapa Trigo.Documentos, 20)

LAL, R. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. **Soil Tillage and Reearch**, 93:1-12, 2007.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2012. 352p.

MAHBOUBI, A.A.; LAL, R.; FAUSSEY. N.R.; Twenty-eight years of tillage effects on two soils in Ohio. **Soil Science Society of American Journal**, 57:506-512, 1993.

MEYER, N.; BERGEZ, J.E.; CONSTANTIN, J.; JUSTES, E. Cover crops reduce water drainage in temperate climates: A meta-analysis. **Agronomy for Sustainable Development**, 39:3, 2019.

MORAES, T.M.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J.C.; SILVA, V.R.; LUZ, D.B. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil Tillage and Research**, 155:351-362, 2016.

MÜLLER, M.M.L.; CECCON, G.; ROSOLEM, C.A. Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e radicular de plantas de adubação verde de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 25:531-538, 2001.

MUNKHOLM, L.J.; SCHJØNNING, P.; RASMUSSEN, K. J.; TANDERUP, K. Spatial and temporal effects of direct drilling on soil structure in the seedling environment. **Soil Tillage and Research**, 71:163-173, 2003.

MUZILLI, O. Influência do sistema de plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 7:95-102, 1983.

NUNES, U.R.; ANDRADE JÚNIOR, V.C.A.; SILVA, E.B.; SANTOS, N.F.; COSTA, H.A.O.; FERREIRA, C.A. Produção de palhada de plantas de cobertura e rendimento do feijão em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 41:943-948, 2006.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2016.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R.; HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil Tillage and Research**, 102:242-254, 2009.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5.ed. Brasília: Embrapa, 2018. 353p.

SECCO, D.; SILVA, V.R.; RUBIN, R.B.; JUNIOR, S.A.G.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Efeitos da compactação nos atributos físicos do solo e na produtividade da cultura do trigo, em Latossolo VermelhoEscuro sob sistema plantio direto. In: 13ª Reunião Brasileira de Manejo e conservação do Solo e da Água, Ilhéus. Resumos, Universidade Federal da Bahia, 2000.

SHARMA, V.; IRMAK, S. Soil-Water Dynamics, Evapotranspiration, and Crop Coefficients of Cover-Crop Mixtures in Seed Maize Cover-Crop Rotation Fields. II: Grass-Reference and Alfalfa-Reference Single (Normal) and Basal Crop Coefficients. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 143:04017033, 2017.

SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysis of variance test for normality (complete sample). **Biometrika**, 52:591-611, 1965.

SILVA, V.R.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BORTOLUZZI, E.C. Soil water dynamics related to the degree of compaction of two Brazilian Oxisols under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 33:1097-1104, 2009.

SILVA, M.L.N.; CURI, N.; BLANCANEAUX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 35:2485-2492, 2000.

SILVEIRA, P.M.; STONE, L.F.; ALVES JUNIOR, J.; SILVA, J.G. Efeitos do manejo do solo sob plantio direto e de culturas na densidade e porosidade de um Latossolo. **Bioscience Journal**, 24:53-59, 2008.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 15:229-235, 1991.

TANGYUAN, N.; BIN, H.; NIANYUAN, J.; SHENZHONG, T.; ZENGJIA, L.: Effects of conservation tillage on soil porosity in maize-wheat cropping system. **Plant, Soil and Environment**, 8:327-333, 2009.

TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER Jr., J.J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse textured soil materials. **Soil Science**, 102:18-22, 1966.

TORRES, J.L.R.; PEREIRA, M.G.; FABIAN, A.J. Produção de fitomassa por plantas de cobertura e mineralização de seus resíduos em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 43:421-428, 2008.

XU, X.; NIEBER, J.L.; GUPTA, S.C. Compaction effects on the gas diffusion coefficients in soil. **Soil Science Society of American Journal**, 56:1743-1750, 1992.

YU, Y.; LOISKANDL, W.; KAUL, H.P.; HIMMELBAUER, M.; WEI, W.; CHEN, L.; BODNER, G. Estimation of runoff mitigation by morphologically different cover crop root systems. **Journal of Hydrology**, 538:667–676, 2016.

WANG, Y.Q.; SHAO, M.A. Spatial variability of soil physical properties in a region of the Loess Plateau of PR China subject to wind and water erosion. **Land Degradation and Development**, 24:296-304, 2013.

WÜRSCHÉ, W., DENARDIN, L.E. **Conservação e manejo dos solos** - I. Planalto Rio-grandense. Considerações gerais. Circular Técnica Nacional de Pesquisa do Trigo, Passo Fundo, n.2, p.1-20, 1980.

ZOTARELLI, L.; ZATORRE, N.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S.; JANTALIA, C.P.; FRANCHINI, J.C.; ALVEA, B.J.R. Influence of no-tillage and frequency of a green manure legume in crop rotations for balancing N outputs and preserving soil organic C stocks. **Field Crops Research**, 32:185-195, 2012.