

Alterações causadas nos atributos físicos após preparo do solo com arado escarificador e enxada rotativa

¹José Luiz Rodrigues Torres, ²Antônio Angelotti Netto, ³Zigomar Menezes de Souza, ⁴Renato Lara de Assis

¹Instituto Federal do Triângulo Mineiro, Campus Uberaba, Rua João Batista Ribeiro, 4000, Distrito Industrial II, CEP 38064-790, Uberaba, MG, Brasil. E-mail: jlrtorres@iftm.edu.br

² Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Instrumentação Agropecuária e USP, Caixa Postal 741, CEP 13560-970, São Carlos, SP, Brasil. E-mail: angeloti@cnpdia.embrapa.br

³Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. Av. Cândido Rondon, 501, Barão Geraldo, CEP 13083-875, Campinas, SP, Brasil. E-mail: zigomaems@feagri.unicamp.br

⁴Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus Iporá, Rodovia 060, Km 01, Zona Rural, CEP 76200-000, Iporá, GO, Brasil. E-mail: relassis@bol.com.br

Resumo: Os diferentes usos e manejos do solo podem causar alterações nos atributos físicos, por isso tem-se investido em sistemas de manejo conservacionista que necessitam menor consumo de energia, que visam à conservação do solo e da água e não causem prejuízos no desenvolvimento e na produtividade das culturas. Neste estudo avaliaram-se as alterações ocorridas nos atributos físicos após o preparo mínimo utilizando a enxada rotativa e arado escarificador, em Jaboticabal-SP. Utilizou-se o delineamento de blocos inteiramente casualizados, num esquema fatorial 2x4x3, com 2 tratamentos: arado escarificador e enxada rotativa em quatro profundidades de amostragem (0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m) e três atributos físicos (densidade do solo (Ds) pelo método do anel volumétrico, resistência do solo à penetração (RP) com penetrômetro de impacto e o conteúdo de água do solo), com quatro repetições. Os sistemas de preparo do solo com arado escarificador e enxada rotativa causam aumento da densidade e resistência do solo à penetração; Independentemente do sistema de preparo e profundidade do solo, a resistência do solo à penetração aumentou após cinco anos da área em pousio para níveis acima de 2 MPa; Para o arado escarificador a maior densidade do solo ocorreu nas profundidades de 0,10-0,40 m enquanto que para a enxada rotativa os valores se mantiverem próximos ou iguais em todas as profundidades avaliadas. Por proporcionar menor mobilização do solo e pelos resultados apresentados o arado escarificador foi o melhor equipamento de preparo mínimo do solo.

Palavras chave: Manejo do solo, Mecânica do solo, Máquinas agrícolas

Alterations in physical properties after tillage with ripper plow and rotary tiller

Abstract: The different uses and soil management can cause changes in physical attributes, so it has invested in conservation tillage systems that require lower power consumption, aimed at the conservation of soil and water and cause no harm in the development and productivity of cultures. In this study we evaluated the changes in the physical attributes after minimum tillage using chisel plow and rotary tiller in Jaboticabal. We used a randomized block design in a factorial 2x4x3 with 2 treatments: chisel plow and rotary tiller, four sampling depths (0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 and 0,30-0,40 m) and three physical attributes (soil density (Ds), by the volumetric ring method, penetration resistance (RP) with impact penetrometer and water content of the soil) four replications. Systems of tillage with chisel plow and rotary hoe cause increased density and penetration resistance of the soil; Regardless of tillage and soil depth, the penetration resistance of the soil increased after five years in fallow areas for levels above 2 MPa; for chisel plowing the soil density was greater depths of 0,10-0,40 while for the rotary tilling values remain close to or equal in all depths evaluated. By providing less soil mobilization and the results presented the chisel plowing was the best equipment of minimum tillage.

Key words: soil management, soil mechanics, agricultural machines

Introdução

Nos solos das regiões tropicais e subtropicais, a adoção de sistemas de manejo com mínimo revolvimento é fundamental para a conservação do solo, da água, manutenção ou aumento dos níveis de matéria orgânica, com objetivo de garantir elevada produtividade com reduzido impacto ambiental (Araújo et al., 2004).

Novas tecnologias têm surgido visando ao aumento da produtividade e à redução nos custos de produção, contudo, essas tecnologias estão associadas ao tráfego intenso de máquinas e tratores, que alteram a estrutura do solo, tornando-o adensado ou compactado, que pode facilmente ser constatada por meio do aumento da densidade do solo, resistência do solo à penetração e microporosidade, com diminuição da macroporosidade e porosidade total (Assis et al., 2009).

Celik et al. (2011) e Marasca et al. (2012) afirmam que a ocorrência e a intensidade da compactação dependem da sequência de culturas, do sistema de manejo e da umidade do solo por ocasião do tráfego, sendo essa maior em solos argilosos.

Nos últimos anos têm-se observado a evolução dos métodos de preparo do solo, sendo que o preparo mínimo e a semeadura direta vêm sendo adotados em substituição aos métodos convencionais de cultivo. Carvalho et al. (2007) destacam que para cada condição de solo e operação agrícola, existe um equipamento adequado e que o solo pode ser preparado com o mínimo de mobilização, reduzindo o número de operações, deixando a superfície rugosa e mantendo os resíduos culturais, total ou parcialmente, sobre a superfície, trazendo benefícios para a sustentabilidade ambiental e maior economia (Silva et al., 2011).

Dentre os equipamentos disponíveis para o cultivo mínimo estão os escarificadores, que causam menor revolvimento do solo, produzem maior rugosidade superficial, com isso aumentam a quantidade de agregados maiores quando comparados ao preparo convencional, além de propiciar menor incorporação dos resíduos culturais no solo, deixando até 70% dos restos na sua superfície o que proporcionará uma distribuição mais uniforme do sistema radicular e a redução das perdas de água (Carvalho et al., 2007 & Jadoski et al., 2012). Outro equipamento

utilizado com frequência são as enxadas rotativas, que tem a característica de mobilizar o solo intensamente, contudo permite o preparo do solo para semeadura em uma única operação, tendo a possibilidade de controlar o grau de desagregação do solo (Araújo et al., 2004, Carvalho et al., 2009 & Jadoski et al., 2012).

A densidade do solo (Ds), resistência do solo à penetração (RP) e a capacidade de retenção d'água têm sido utilizados com maior frequência como indicadores de mudanças na qualidade do solo (Torres et al., 2011; 2012), por ser mais sensíveis e refletir a influência dos sistemas de manejo numa escala de tempo que permita a verificação de suas alterações.

Segundo estudo de Prevedello et al. (2014) comparando alterações nos atributos físicos do solo, observaram que o uso da escarificação, seguida da gradagem e a enxada rotativa resultaram em menor estabilidade de agregados estáveis em água, entretanto, não alteraram a densidade do solo na profundidade de 0,0 a 0,05 m. Os efeitos negativos do preparo do solo sobre o Argissolo de textura franco arenosa foram reduzidos após 12 meses, demonstrando sua capacidade em restabelecer a estrutura e a agregação.

Prevedello et al. (2013) observaram em estudo que os sistemas de manejo escarificado, escarificado com gradagem e enxada rotativa promovem a redução da resistência do solo à penetração e na densidade do solo até a profundidade de 0,30 m. O solo sob plantio direto condicionou menor crescimento radicular e aéreo do eucalipto devido à maior resistência à penetração e densidade do solo, quando comparado aos preparos com mobilização.

Avaliando sistemas de preparo com o escarificador e a enxada rotativa, Carvalho et al. (2007) observaram que os implementos proporcionaram menor incorporação de resíduos vegetais, mas foram os equipamentos mais agressivos à estrutura do solo, que a enxada rotativa e a grade aradora produziram maior percentual de agregados com tamanho adequado (< 4,75 mm) para o bom desenvolvimento e produção de várias culturas.

Jadoski et al. (2012) observaram que maiores produtividades de batata ocorreram nos tratamentos onde se reduziu o número de operações de preparo (escarificação e sulcamento; escarificação e sulcamento mais

grade niveladora; escarificação e sulcamento mais enxada rotativa) e, conseqüentemente, a mobilização do solo, quando comparado ao manejo onde foi associado às operações de gradagem e enxada rotativa, que representa o maior revolvimento do solo.

Neste estudo avaliaram-se as alterações ocorridas nos atributos físicos do solo após o preparo mínimo utilizando a enxada rotativa e arado escarificador.

Material e métodos

O estudo foi realizado na área demonstrativa e experimental de irrigação (ADEI) da Universidade Estadual Paulista Julio Mesquita Filho [UNESP] campus Jaboticabal, SP, localizada entre as coordenadas 21°15'22" latitude sul e 48°18'58" longitude oeste, com altitude e declividade médias de 570 m e 6%, respectivamente. O clima na área é do tipo subtropical úmido com estiagem no inverno, com média anual de 1.285 mm e 22,4 °C de precipitação e temperatura, respectivamente, classificado como Cwa conforme o Sistema Internacional de Classificação de Koppen (Andrioli & Prado, 2012).

O relevo é caracterizado como suave ondulado e o solo foi classificado como Latossolo Vermelho eutrófico argiloso segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária [EMBRAPA], (2013), o qual tem sua composição granulométrica determinada por Coan (1996), que apresenta nas profundidades de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m: 585; 637 e 642 g kg⁻¹ de argila, 182; 183 e 183 g kg⁻¹ de areia e 234; 180 e 175 g kg⁻¹ de silte, respectivamente.

A área experimental constituiu-se por uma faixa de solo com 425 m de comprimento e 15 de largura, localizada entre dois terraços construídos em nível, subdivididas em parcelas experimentais de 100 m² (10 x 10 m) de área útil, com quatro repetições. Nesta área experimental foi cultivado feijão e milho durante os períodos de "seca" e das "águas", respectivamente, durante os anos agrícolas de 1992/1993 e 1993/1994, na forma de sucessão sob diferentes sistemas de preparo do solo, cujos resultados foram apresentados por Coan (1996).

Este estudo foi tomado como base para caracterização física da área nos atributos que foram avaliados no ano de 1999/2000, pois a área

foi submetida ao mesmo sistema de preparo com arado escarificador e enxada rotativa, nas mesmas profundidades, após um período de cinco anos consecutivos após pousio (com vegetação espontânea). Neste período o local foi roçado até três vezes ao ano, para controlar a infestação de plantas invasoras.

Utilizou-se o delineamento de blocos inteiramente casualizados, num esquema fatorial 2x4x3, com 2 tratamentos compostos por arado escarificador e enxada rotativa em 4 profundidades do solo (0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m) e três atributos físicos avaliados (densidade, resistência do solo à penetração e conteúdo de água no solo), com 4 repetições, resultando num total de 08 parcelas. Cada parcela constituiu-se de uma área útil de 100 m², separada por carregadores de mesmo tamanho que foram utilizados para manobras.

Para o preparo do solo em ambos os tratamentos utilizou-se um trator de pneus, com potência nominal do motor de 75 cv, operando a 1800 RPM. No preparo realizado com arado escarificador equipado com sete hastes, com 1,56 m de largura útil e peso de 660 kg, o trator operou na 4ª marcha reduzida, na profundidade média de 0,30 m. No preparo efetuado com enxada rotativa, equipada com seis flanges e lâmina tipo veloz, com 1,22 m de largura útil e peso total de 370 kg, o trator trabalhou na 2ª marcha reduzida, na profundidade média de 0,15 m.

A caixa seletora da enxada rotativa foi regulada para a rotação de 153 RPM, operando com o anteparo (tampa) traseiro levantado. Após as duas operações de preparo do solo, realizadas com umidade média de 0,25 kg kg⁻¹, procedeu-se à passagem de uma grade niveladora com 32 discos lisos de 0,457 m (18"), largura útil de 2,77 m e peso de 590 kg, acoplada ao referido trator, trabalhando em 1800 RPM em 1ª marcha simples. As amostragens descritas a seguir foram realizadas no dia anterior ao preparo, concomitantemente com as determinações de resistência do solo à penetração.

A densidade do solo (Ds) foi determinada em amostras com estrutura indeformada pelo método do anel volumétrico, que foram coletadas em anéis de 48 mm de diâmetro por 53 mm de altura, com o trado de Uhland, nas profundidades de 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, conforme Blake e Hartge (1986), sendo as amostras secas a 105 °C por 24 horas.

A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada com o uso de penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar, com capacidade de carga de 150 kgf, precisão de 0,001 kgf, provido de uma haste de 0,65 m de comprimento, equipado com cone confeccionado em aço (INOX AISI 516), com inclinação de 30° e diâmetro de 0,2027 m, com ângulo de ponteira cônica de 30° (Stolf, 1991). Em cada parcela realizou-se três determinações da RP. As subparcelas (profundidades) foram compostas pelas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30, 0,30-0,40, 0,40-0,50 e 0,50-0,60 m. Os dados de campo foram obtidos em números de impactos (dm^{-1}), tendo sido transformados em kgf cm^{-2} por meio da equação $R (\text{kgf cm}^{-2}) = 5,6 + 6,98 N$ (Sene et al., 1985). A seguir, estes valores foram multiplicados pela constante 0,098 para transformação em unidades MPa (Arshad et al., 1996).

Para determinação do conteúdo de água do solo, foram realizadas coletas nos mesmos dias e profundidades avaliadas para RP, sendo tomadas duas amostras por parcela e homogeneizadas, para obtenção do peso úmido e peso seco. Estas foram acondicionadas em latas de alumínio, pesadas e colocadas para secar em estufas de circulação forçada de ar a 105 °C por 24 horas. Com estes dados calculou-se a umidade volumétrica do solo (U_v).

Os resultados encontrados foram analisados quanto à normalidade e homogeneidade dos dados por meio dos testes de Lilliefors, Cochran e Bartlett, respectivamente. Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância com auxílio do programa estatístico SISVAR, aplicando-se o teste F para significância e as médias comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Resultados e discussão

Os conteúdos médios de água no solo apresentaram uniformidade em ambos os tratamentos e períodos amostrados, que variou entre 0,25 a 0,27 kg kg^{-1} , valores estes considerados ideais para mobilização (Tabela 1). Figueiredo et al. (2000) destacam que para esse solo o valor de umidade do solo deve ser menor que 0,29 kg kg^{-1} , pois menor será a possibilidade de ocorrer adensamento ou compactação na área. A manutenção desta umidade no presente estudo talvez seja justificada pela cobertura

vegetal e de maior proporção de resíduos vegetais sobre o solo, pois a área estava sob pousio há cinco anos e o preparo mínimo com arado escarificador e enxada rotativa incorporaram 28,4% e 58,8% da cobertura existente sobre o terreno, respectivamente, conforme destacado por Carvalho et al. (2007). A manutenção da umidade do solo na condição friável (abaixo do limite plástico) é recomendada para a realização das operações motomecanizadas, em função da mínima coesão entre as partículas do solo e da menor adesão do solo às ferramentas de preparo e de semeadura (Assis et al., 2009).

Ocorreram diferenças ($p < 0,05$) no conteúdo de água do solo somente entre as profundidades no ano avaliado, mas entre anos não houve diferenças ($p < 0,05$), que de forma geral, apresenta maiores valores na área do arado escarificador (Tabela 1). Esta condição de umidade do solo favorece a avaliação entre os sistemas de preparo, pois não influenciará qualquer alteração que tenha ocorrido com a densidade e a resistência do solo à penetração, conforme (Martins et al., 2010, Celik et al., 2011, Marasca et al., 2012 & Torres et al., 2012).

Em relação à D_s não foram verificadas diferenças ($p < 0,05$) entre os sistemas de preparo de solo, contudo, ocorreram diferenças ($p < 0,05$) entre as épocas de amostragem na profundidade até 0,30 m para o arado escarificador e 0,20 m para enxada rotativa após cinco anos de pousio (Tabela 2). Os valores observados podem ser justificados pela profundidade de atuação destes implementos, pois o escarificador apresenta maior capacidade de penetração e mobilização do solo quando comparado à enxada rotativa, pois esta tem seus órgãos ativos fixados em um mesmo eixo, característica que dificulta a penetração no solo, fato este destacado por Carvalho et al. (2007). Mesmo assim, os valores de D_s obtidos neste estudo ainda encontram-se abaixo do valor de 1,60 Mg m^{-3} , estabelecido por Silva e Rosolem (2001) como crítico para o desenvolvimento das culturas.

Estudando sistemas de manejo escarificado, escarificado com gradagem e enxada rotativa, Prevedello et al. (2013) observaram que estes implementos promovem a redução da resistência do solo à penetração e na densidade do solo até a profundidade de 0,30 m, não ocorrendo valores limitantes ao crescimento de raízes.

Independente do sistema de preparo do solo, os menores valores de Ds ocorreram na área antes da mobilização do solo (1992/2003) em ambos os sistemas (Tabela 2), pois ocorreu aumento da Ds em todas as profundidades

avaliadas, com maiores valores entre 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m, demonstrando que o preparo do solo com estes implementos influenciou negativamente este atributo físico.

Tabela 1- Valores de umidade volumétrica de água no solo (Uv) referente à época de amostragem em função dos dois sistemas de preparo e profundidades.

Ano	Uv				F	CV
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,30-0,40		
.....m.....						
Arado Escarificador						
..... kg kg ⁻¹						
1992/93	0,25 cA	0,25 cA	0,27 aA	0,26 bA	14,06**	2,40
1993/94	0,26 bA	0,26 bA	0,27 aA	0,26 bA		
1999/00	0,25 cA	0,27 aA	0,27 aA	0,26 bA		
F					3,91 ^{ns}	
CV (%)					3,50	
Enxada Rotativa						
1992/93	0,26 aA	0,27 bA	0,28 aA	0,27 bA	0,72	4,73
1993/94	0,25 aB	0,25 aB	0,26 aB	0,25 aB		
1999/00	0,25 aB	0,25 aB	0,26 aB	0,25 aB		
F					5,41*	
CV (%)					3,30	

^{ns} = Não significativo; * e ** = Significativo p<0,01 e p<0,05 (Tukey), respectivamente. Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha comparam profundidades e maiúsculas na coluna comparam épocas de amostragem e não diferem entre si (Tukey, p<0,05).

Tabela 2- Valores médios da densidade do solo (Ds) referentes à época de amostragem em função dos dois sistemas de preparo e profundidades.

Ano	Ds				F	CV
	0,0-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,30-0,40		
.....m.....						
Arado Escarificador						
..... Mg m ⁻³						
1992/93	1,33 aC	1,31 aC	1,23 cC	1,29 bB	0,30**	6,30
1993/94	1,36 bB	1,46 aA	1,46 aA	1,43 aA		
1999/00	1,40 bA	1,43 aB	1,42 aB	1,42 aA		
F					16,41**	
CV (%)					3,34	
Enxada Rotativa						
1992/93	1,32 aC	1,30 aC	1,26 bB	1,29 bB	0,09 ^{ns}	4,96
1993/94	1,40 aA	1,41 aB	1,41 aA	1,41 aA		
1999/00	1,39 aB	1,42 aA	1,41 aA	1,41 aA		
F					64,20**	
CV (%)					1,46	

^{ns} = Não significativo; ** = Significativo (Tukey, p<0,05). Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha comparam profundidades e maiúsculas na coluna comparam épocas de amostragem e não diferem entre si (Tukey, p<0,05).

A Ds aumentou nos anos de 1993/2004 e 1999/2000 quando comparado a 1992/1993, mesmo com a umidade do solo mantendo-se

constante (Tabela 1), isto provavelmente ocorreu devido ao intenso tráfego de máquinas e implementos na área, nas operações realizadas

no cultivo das culturas comerciais por dois anos consecutivos. Analisando os valores de resistência do solo à penetração (RP) observa-se que ocorreram diferenças significativas entre profundidades, épocas de amostragens e sistemas de preparo (Tabela 3). O cultivo por dois anos consecutivos utilizando o escarificador no

preparo do solo causou a diminuição da RP nos anos de 1992/1993 e 1993/2004 em todas as profundidades, enquanto que para a enxada rotativa o mesmo não ocorreu, pois os valores mantiveram-se próximos, sem diferenças significativas ($p < 0,05$), com exceção da profundidade entre 0,10-0,20 m.

Tabela 3 - Valores médios de resistência do solo à penetração (RP) referente aos sistemas de preparo em função da época de amostragem e profundidades.

Ano	RP				F	CV
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,30-0,40		
.....m.....						
Arado escarificador						
.....MPa.....						
1992/93	1,87 bC	1,98 aB	1,71 cB	1,86 bB	0,21**	5,02
1993/94	1,55 bB	1,31 cC	1,63 aC	1,50 bC		
1999/00	3,09 aA	2,76 cA	2,95 bA	2,94 bA		
Media SP	2,17 aA	2,02 bB	2,10 abB	2,10 abB		
F	163,7**					
CV (%)	9,68					
Enxada rotativa						
1992/93	1,92 aB	1,94 aB	1,73 cB	1,87 bB	0,44**	4,42
1993/94	1,85 aB	1,76 bC	1,73 bB	1,78 bB		
1999/00	2,68 cA	3,50 aA	3,61 aA	3,27 bA		
Média SP	2,15 bA	2,40 aA	2,36 aA	2,31 abA		
F	88,50**					
CV (%)	13,32					

** = Significativo (Tukey, $p < 0,05$). Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha comparam profundidades e maiúsculas na coluna comparam épocas de amostragem e sistemas de preparo (média SP) e não diferem entre si (Tukey, $p < 0,05$). Os valores para RP foram ajustados utilizando a fórmula: $(x+1)^{0,5}$ para atender os critérios de normalidade e homogeneidade para análise estatística.

Após o período de cinco anos de pousio, no ano de 1999/2000, independentemente do sistema de preparo e profundidade do solo, o valor da RP aumentou significativamente ($p < 0,05$) e atingiu índices acima de 2 MPa, que são considerados altos, segundo classificação proposta por Arshad et al. (1996) e devem estar causando efeitos restritivos ao crescimento das plantas. Segundo Beutler et al. (2006), valores de 2,0 a 3,0 MPa são limitantes à produtividade de soja, enquanto Drescher et al. (2012) constataram que valores acima de 2,0 MPa como limitantes em solo cultivado em longo prazo sob plantio direto.

Avaliando a produtividade da soja em área com diferentes níveis de compactação, Beutler e Centurion (2004) observaram que esta decresce quando a RP é superior a 0,85 MPa, enquanto que para o milho, Mahal et al. (2004) não

observaram diminuição na produtividade da cultura, quando comparou semeadura direta com preparo do solo com uso de escarificador, onde a RP variou entre 2,73-3,14 MPa e 2,31-3,11 MPa, respectivamente, 18 meses após a escarificação, até 0,40 m de profundidade, porém, Foloni et al. (2003) observaram impedimento no crescimento do sistema radicular do milho quando a RP atingiu 1,4 MPa.

Comparando os valores médios dos sistemas de preparo, observa-se que os valores de RP são menores na área preparada com o escarificador nas maiores profundidades (0,10 a 0,40 m) quando comparado a enxada rotativa (Tabela 3). Os maiores valores de RP nas camadas subsuperficiais, ocorreram na profundidade máxima que os implementos trabalham, de 0,30 m para o escarificador e de 0,15 m para a enxada rotativa. Segundo

(Carvalho et al., 2009), os elevados valores de RP provavelmente foram causados pela ação da soleira dos implementos agrícolas, que alteram as características físicas do solo como a densidade e a porosidade. Entretanto, Costa et al. (2012) observaram valores de RP entre 2,9 e 7,0 MPa e associou os maiores valores ao menor conteúdo de água no solo durante o período de coleta das amostras, e os menores valores a maior produção de raízes da Poácea utilizada.

Os valores obtidos para RP, Ds e Uv apresentaram correlações positivas e negativas entre si ($p < 0,05$) nos períodos avaliados (Tabela 4), contudo, somente no ano de 1999/00 a UV não apresenta correlação ($p < 0,05$) os valores de Ds. Alguns estudos têm evidenciado que o aumento dos valores de UV causa a diminuição da RP (Assis et al., 2009 & Iori et al., 2012).

Tabela 4 - Correlações de Pearson entre os valores de resistência do solo à penetração (RP), densidade do solo (Ds) e Umidade volumétrica (Uv) para arado escarificador e enxada rotativa, nos anos agrícolas de 1992/1993, 1993/1994 e 1999/2000, em Jaboticabal, SP.

Variável analisada	Coefficiente de correlação	Significância (%)
Arado escarificador		
.....1992/93.....		
RP x Ds	0,82	85*
RP x Uv	-0,89	99*
Ds x Uv	-0,97	97*
.....1993/94.....		
RP x Ds	-0,28	89*
RP x Uv	0,65	99*
Ds x Uv	0,46	99*
.....1999/00.....		
RP x Ds	-0,95	99*
RP x Uv	-0,81	99*
Ds x Uv	0,90	34 ^{ns}
Enxada rotativa		
.....1992/93.....		
RP x Ds	0,91	95*
RP x Uv	-0,82	99*
Ds x Uv	-0,98	90*
.....1993/94.....		
RP x Ds	-0,92	99*
RP x Uv	-0,65	99*
Ds x Uv	0,33	99*
.....1999/00.....		
RP x Ds	0,90	99*
RP x Uv	0,55	99*
Ds x Uv	0,13	84*

*Significativo e ^{ns} = não significativo ($p < 0,05$) pelo Teste t de Student (LSD).

A correlação negativa ($p < 0,05$) existente entre a RP e Ds para o arado escarificador (1993/1994 e 1999/2000) e para a enxada rotativa (1993/1994) indica que a medida que a Ds aumentou a RP diminuiu no período (Tabela 4). Esse comportamento talvez seja explicado pela forma de atuação destes implementos ao longo do perfil do solo, que atuam de forma diferenciada na área mobilizada, pois o arado escarificador apresenta maior capacidade de penetração e mobilização do solo, além de menor tendência de

formação de encrostamento superficial (Carvalho et al., 2007), enquanto que enxada rotativa causa a compactação subsuperficial do solo e isto ocorre devido a conformação das enxadas, que promovem um espelhamento logo abaixo do ponto de contato das enxadas com o solo.

Resultados semelhantes foram observados por Torres et al. (2011), que destacaram o aumento da Ds associado a diminuição da RP, cujo efeito da compactação foi potencializado nos períodos de maior umidade.

A correlação positiva entre RP e Ds indica que as variáveis aumentaram simultaneamente com o preparo do solo, ou seja, o aumento dos níveis de compactação do solo causado pelos implementos utilizados resultou no aumento da Ds (Tabela 4). Alguns estudos mostram que a compactação do solo é caracterizada pelo aumento da densidade, microporosidade, resistência do solo à penetração e pela redução da macroporosidade e que estes efeitos podem variar de acordo com a textura do solo, teor de matéria orgânica (aumento facilita a agregação do solo e penetração da haste do penetrômetro) e conteúdo de água no solo (água funciona como lubrificante diminuindo o atrito entre as partículas) (Magalhães et al., 2009 & Torres et al., 2012).

Conclusões

Os sistemas de preparo do solo com arado escarificador e enxada rotativa causam aumento da densidade e resistência do solo à penetração;

Independentemente do sistema de preparo e profundidade do solo, a resistência do solo à penetração aumentou após cinco anos da área em pousio para níveis acima de 2 MPa;

Para o arado escarificador a maior densidade do solo ocorreu nas profundidades de 0,10-0,40 m enquanto que para a enxada rotativa os valores se mantiverem próximos ou iguais em todas as profundidades avaliadas.

Por proporcionar menor mobilização do solo e pelos resultados apresentados o arado escarificador foi o melhor equipamento de preparo mínimo do solo.

Agradecimentos

Aos funcionários do departamento de Engenharia Rural da FCAV-UNESP, pelo apoio na execução do trabalho, à Fazenda Experimental pela cessão da área e ao Professor Doutor Osvaldo Coan que nos proporcionou a realização desse trabalho com seus valiosos conhecimentos.

Referências

Andrioli, I., & Prado, R. M. (2012). 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: Ciências Agrárias*, Londrina, 33 (3), 963-978.

Araújo, M. A., Tormena, C. A., Inoue, T. T., & Costa, A. C. S. (2004). Efeitos da escarificação na qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférico após trezes anos de semeadura direta. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 28 (3), 459-504.

Arshad, M. A., Lowery, B., & Grossman, B. (1996). Physical tests for monitoring soil quality. In: Doran, J.W. & Jones, A.J., (Eds). *Methods for assessing soil quality. Soil Science Society of America* (pp.123-141). Madison.

Assis, R. L., Lazarini, G.D., Lanças, K. P., & Cargnelutti Filho, A. (2009). Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, 29 (4), 558-568.

Beutler, A.N., & Centurion, J.F. (2006). Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 39 (6), 581-588.

Beutler, A. N., Centurion, J. F., Silva, A.P., & Barbosa, J. C. (2006). Intervalo hídrico ótimo e produtividade de cultivares de soja. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, 10 (3), 639-645.

Blake, G. R., Hartge, K. H., & Bulk Density. (1986). In: Klute, A., (Ed.) *Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods. American Society of Agronomy* (pp.363-375). Madison.

Carvalho Filho, A., Silva, R.P., Centurion, J. F., Carvalho, L. C. C., & Lopes, A. (2007). Agregação de um Latossolo Vermelho submetido a cinco sistemas de preparo do solo em Uberaba – MG. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, 27 (1), 317-325.

Carvalho Filho, A., Carvalho, L. C. C., Centurion, J. F., Beutler, A. N., Cortez, J. W., & Ribon, A. A. (2009). Qualidade física de um Latossolo Vermelho férrico sob sistemas de uso e manejo. *Bioscience Journal*, Uberlândia, 25, (6), 43-51.

- Celik, A., Boydas, M. G., & Altikat, S. (2011). A comparison of an experimental plow with a moldboard and a disk plow on the soil physical properties. *Applied Engineering in Agriculture*, Michigan, 27, 185-192.
- Coan, O. (1996). *Sistemas de preparo de solo: efeitos sobre a camada mobilizada e no comportamento das culturas do feijoeiro (Phaseolus vulgaris L.) e do milho (Zea mays L.), conduzidas em rotação* (138f). Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, SP, Brasil.
- Costa, M. A. T., Tormena, C. A., Lugão, S. M. B., Fidalski, J., Nascimento, W. G., & Medeiros, F.M. (2012). Resistência do solo à penetração e produção de raízes e de forragem em diferentes níveis de intensificação do pastejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 36 (3), 993-1004.
- Drescher, M.S., Eltz, F.L.F., Denardin, J.E., Faganello, A., & Drescher, G.L. (2012). Resistência à penetração e rendimento da soja após intervenção mecânica em Latossolo Vermelho sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 36, 1836-1844.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2013). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. (3 ed.) Brasília.
- Figueiredo, L. H. A., Dias Júnior, M. S., & Ferreira, M. M. (2000). Teor de água crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Vermelho eutrófico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 24 (3), 487-493.
- Foloni, J. S. S., Calonego, J. C., & Lima, S. L. (2003). Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 38 (8), 947-953.
- Iori, P., Dias Júnior, M. S., & Silva, R. B. (2012). Resistência do solo à penetração e ao cisalhamento em diversos usos do solo em áreas de preservação permanente. *Bioscience Journal*, Uberlândia, 28 (1), 185-195.
- Jadoski, S. O., Saito, L. R., Maggi, M.F., Wagner, M.V., & Reffatti, T.N. (2012). Formas de mecanização e manejo do solo para a cultura da batata. I – características da produção. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, 32 (5), 889-899.
- Magalhães, W. A., Cremon, C., Mapeli, N. C., Silva, W. M., Carvalho, J. M. & Mota, M. S. (2009). Determinação da resistência do solo a penetração sob diferentes sistemas de cultivo em um Latossolo sob Bioma Pantanal. *Agrarian*, Dourados, 2, 21-32.
- Mahal, D., Gamero, C. A., Benez, S. H., Furlani, C. E. A., & Silva, A. R. B. (2004). Demanda energética e eficiência da distribuição de sementes de milho sob variação de velocidade e condição de solo. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, 24 (1), 150-157.
- Marasca, I., Lanças, K. P., Silva, R. B. & Assis, R. L. (2012). Capacidade de suporte de carga e densidade do solo em áreas de plantio direto com e sem escarificação. *Energia na Agricultura*, 27 (4), 81-91.
- Martins, C. A. S., Pandolfi, F., Passos, R. R., Reis, E. F., & Cabral, M. B. G. (2010). Avaliação da compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes coberturas vegetais. *Bioscience Journal*, Uberlândia, 26 (1), 79-83.
- Prevedello, J., Kaiser, D. R., Reinert, D. J., Vogelmann, E. S., Fontanela, E., & Reichert, J. M. (2013). Manejo do solo e crescimento inicial de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden em Argissolo. *Ciência Florestal*, Santa Maria, 23 (1), 129-138.
- Prevedello, J., Vogelmann, E. S., Kaiser, D.R., Fontanela, E., Reinert, D. J., & Reichert, J.M. (Agregação e matéria orgânica de um argissolo sob diferentes preparos do solo para plantio de eucalipto. *Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo, 34 (78), 149-158.
- Sene, M., Vepraskas, M.J., Naderman, G.C., & Denton, H.P. (1985). Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. *Society Soil Science Society of America Journal*, Madison, 49 (2) 422-427.

Silva, R. H., & Rosolem, C. A. (2001). Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 25 (2), 53-260.

Silva, J. C., Wendling, B., Camargo, R., Freitas, L. B. C. M., & Freitas, M. C. M. (2011). Análise comparativa entre os sistemas de preparo do solo: aspectos técnicos e econômicos. *Enciclopédia Biosfera*, Goiânia, 7 (12), 1-11.

Stolf, R. (1991). Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 15 (1), 299-235.

Torres, J. L. R., Fabian, A. J., & Pereira, M. G. (2011). Alterações dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, 35 (3), 437-445.

Torres, J. L. R., Rodrigues Jr., D.J., Sene, G. A., Jaime, D. G., & Vieira, D.M.S. (2012). Resistência à penetração em área de pastagem de capim Tifton, influenciada pelo pisoteio e irrigação. *Bioscience Journal*, Uberlândia, 28 (1), 232-239.

Recebido em: 01/08/2014

Aceito em: 17/04/2016