

RESILIÊNCIA FÍSICA DE DOIS LATOSSOLOS VERMELHOS SOB PLANTIO DIRETO⁽¹⁾

Marina Araújo Bavoso⁽²⁾, Alvaro Pires da Silva⁽³⁾, Getulio Coutinho Figueiredo⁽⁴⁾ Cássio Antonio Tormena⁽⁵⁾ & Neyde Fabíola Balarezo Giarola⁽⁶⁾

RESUMO

A resiliência física de solos é proveniente de processos regenerativos que incluem ciclos de umedecimento e secamento, congelamento e descongelamento, assim como as atividades biológicas. Este estudo testou a hipótese de que as propriedades físicas do solo, como a permeabilidade do solo ao ar, densidade do solo, porosidade de aeração e porosidade total, são indicadores físicos eficientes para quantificar a resiliência de solos de diferentes texturas submetidos ao estresse mecânico (compactação) e após subsequentes ciclos de umedecimento e secamento. O objetivo foi avaliar o comportamento e a resiliência do solo por meio de propriedades físicas de dois Latossolos Vermelhos. Foram retiradas 25 amostras indeformadas (0,00-0,05 m) de dois solos: solo I, com textura argilosa, e solo II, com textura franco-argilo-arenosa, realizando as determinações das propriedades físicas nos tratamentos: antes da compactação (A), depois da compactação (C0) e após ciclos de umedecimento e secamento (C1, C2, C3 e C4). As propriedades densidade do solo e porosidade total não apresentaram recuperação da condição inicial após a compactação nos solos I e II; as propriedades conteúdo volumétrico de água e porosidade de aeração mostraram recuperação parcial apenas no solo I; e a permeabilidade do solo ao ar foi a propriedade que apresentou a melhor recuperação e a maior resiliência. Em relação ao distinto comportamento dos dois solos, observou-se que o solo I foi mais resiliente que o solo II nas propriedades que apresentaram recuperação.

Termos de indexação: permeabilidade do solo ao ar, ciclos de umedecimento e secamento, compactação.

⁽¹⁾ Trabalho extraído da dissertação de mestrado do primeiro autor apresentado à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo – ESALQ/USP. Recebido para publicação em 12 de abril de 2012 e aprovado em 03 de outubro de 2012.

⁽²⁾ Engenheira Agrônoma e Mestre em Ciências, ESALQ/USP. Av. Pádua Dias, 11, Caixa Postal 9. CEP 13418-900 Piracicaba (SP). E-mail: mah.bavoso@gmail.com

⁽³⁾ Professor Titular, Departamento de Ciência do Solo, ESALQ/USP. E-mail: apsilva@usp.br

⁽⁴⁾ Engenheiro Agrônomo e Pós-Doutor pelo Departamento de Ciência do Solo, ESALQ/USP. E-mail: figueiredo.gc@gmail.com

⁽⁵⁾ Professor Associado, Departamento de Agronomia da Universidade Estadual de Maringá – UEM, Maringá/PR. Av. Colombo, 5790, CEP 87020-900. Bolsista do CNPq. E-mail: catormena@uem.br

⁽⁶⁾ Professor Associado. Departamento de Ciência do Solo e Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Ponta Grossa – UEPG. Av. General Carlos Cavalcanti, 4748, CEP 84030-900 Ponta Grossa (PR). E-mail: neydef@uepg.br

SUMMARY: PHYSICAL RESILIENCE OF TWO RED OXISOLS UNDER NO-TILLAGE

The physical resilience of soil is the result of regenerative processes with cycles of wetting and drying, freezing and thawing, as well as of biological activities. This study tested the hypothesis that the physical properties of soil such as soil permeability, bulk density, aeration porosity, and total porosity are efficient physical indicators to quantify the resilience of soils with different textures exposed to mechanical stress (compression) and after subsequent wetting and drying cycles. The objective was to evaluate the behavior and soil resilience by means of physical properties of an Oxisol. Twenty-five undisturbed samples were taken (0.00-0.05 m) from two soils: a clayey soil and a soil with sandy clay loam texture, and the physical properties determined in the treatments: before compression (A), after compaction (C0) and after wetting and drying cycles (C1, C2, C3, C4). The properties bulk density and porosity did not return to the initial condition after compression in soil I and II, the volumetric content of water and air-filled porosity were only partially recovered in soil I, and soil permeability to air was the property with best recovery and resilience. Regarding the different behavior of the two soils, it was observed that soil I was more resilient than soil II in the properties with recovery.

Index terms: soil air permeability, wetting and drying cycles, soil compaction.

INTRODUÇÃO

As práticas de manejo do solo e das culturas provocam alterações nas propriedades físicas do solo, as quais podem ser permanentes ou temporárias. Assim, o interesse em avaliar a qualidade física do solo tem sido incrementado por considerá-lo um componente fundamental na manutenção e, ou, sustentabilidade dos sistemas de produção agrícola. A qualidade do solo está relacionada à degradação e à resiliência do solo. A resiliência do solo refere-se à sua habilidade em recuperar-se de degradação (ou do estresse a que foi submetido), a qual pode ser de origem antropogênica ou natural, e retornar a um novo equilíbrio semelhante à condição ou estado antecedente (Seybold et al., 1999).

A melhoria da estrutura do solo com o avanço do uso do sistema de plantio direto (SPD) tornou-se uma técnica frequente no controle das perdas de solo e de água. No entanto, nos últimos anos, o uso desse sistema tem sido repensado, pois solos sob esse tipo de manejo têm demonstrado problemas de compactação (Klein & Boller, 1995; Håkansson & Medvedev, 1995; Silva et al., 2000, 2003; Håkansson, 2005; Silveira et al., 2008; Collares et al., 2008; Reichert et al., 2009), causando até mesmo o retorno ao sistema convencional de preparo do solo (Tormena et al., 1998).

Nesse contexto, alguns agricultores têm mobilizado o solo utilizando escarificadores (Rosa et al., 2008) e realizando aração e gradagem em solos sob SPD, devido ao surgimento de camadas superficiais (0,00-0,15 m) compactadas (Reichert et al., 2009). Entretanto, na avaliação da compactação, o tempo de adoção do SPD deve ser considerado, visto que as alterações dos atributos físicos do solo podem modificar o seu comportamento compressivo ao longo do tempo (Assis & Lanças, 2005; Silveira et al., 2008).

As classes de solos apresentam comportamentos

distintos quando eles são submetidos ao processo de compactação. Isso decorre de sua dependência da energia de compactação, da textura, do teor de matéria orgânica, da umidade do solo e da história de tensão, induzida pelos processos pedogenéticos ou pelo manejo do solo no passado (Dias Junior & Pierce, 1996), determinando a profundidade de transmissão e a persistência da compactação (Silva et al., 1986; McBride & Watson, 1990). A compactação do solo geralmente reduz a quantidade de água disponível para as plantas, pois provoca a redução dos macro e dos microporos, levando à diminuição da porosidade total, o que dificulta o aproveitamento de água pelas raízes (Brady & Weil, 2002).

Considerando os vários aspectos da qualidade do solo (QS), têm-se os componentes ligados à resistência ou estabilidade do solo e aqueles ligados à resiliência do solo. A resistência, segundo Seybold et al. (1999), é a capacidade de o solo resistir a mudanças causadas por um distúrbio ou, como Lal (1993) a conceitua, é a estabilidade do solo aos estresses aplicados, referindo-se diretamente como a suscetibilidade do solo à degradação. Já a resiliência do solo refere-se à habilidade intrínseca do solo em recuperar-se de degradação ou do estresse aplicado, a qual pode ser de origem antropogênica ou natural, e retornar a um novo equilíbrio semelhante ao estado antecedente (Blanco & Lal, 2010). Também pode ser definida como a habilidade do sistema em recuperar sua integridade estrutural e funcional (Seybold et al., 1999).

A resiliência do solo é uma propriedade dinâmica muito dependente do *status* do solo na época de avaliação (Seybold et al., 1999). Gregory et al. (2009) observaram que solos mais resistentes a estresses são também mais resilientes. Em sistemas agrícolas, os estresses impostos aos solos podem ser de origem natural e, ou, antropogênica. Blanco & Lal (2010) incluem tráfego de máquinas, veículos e animais,

pastejo inadequado, práticas de cultivo e manejo - como o preparo do solo, fertilizações excessivas, irrigação com água de baixa qualidade, aplicação de pesticidas e desmatamento para abertura de áreas -, assim como o desenvolvimento urbano desordenado e a prática da mineração, como algumas das causas antropogênicas de perturbação que mais degradam os solos.

Os parâmetros climáticos influenciam na magnitude e na velocidade da capacidade de recuperação dos distúrbios no solo, sendo esta menor em climas secos que em úmidos. Os fenômenos climáticos que alteram a resiliência incluem precipitação, temperatura, radiação, umidade do ar e demanda evaporativa, além de processos ligados ao intemperismo, tempestades, terremotos, fogo, furacões e alagamentos, os quais não são controlados pelo homem. O clima também comanda as atividades biológicas, corroborando o crescimento mais rápido de plantas em solos degradados sob clima úmido e temperado que em climas áridos e semiáridos (Lal, 1994).

A resiliência biológica do solo pode ser medida pelas mudanças na mineralização de resíduos de plantas (Griffiths et al., 2000), no tamanho e na atividade da biomassa microbiana (Franco et al., 2004). Sob cobertura vegetal o solo é mais resiliente do que quando está nu; quando coberto, os impactos das gotas de chuva são menores, evitando-se a erosão (Vezzani, 2001).

Com fluxo alto de compostos orgânicos, o sistema solo tem condições de se auto-organizar em macroagregados com grande capacidade de reter energia e matéria adicionada na forma de C. Nessa condição, há melhorias na resistência à erosão hídrica e eólica; infiltração e retenção de água no solo; sequestro de C; capacidade de retenção de cátions; aumento do estoque de nutrientes; adsorção e complexação de compostos orgânicos e inorgânicos; favorecimento da biota do solo; promoção da ciclagem dos elementos químicos; e resistência a perturbações e aumento da resiliência. Quando a magnitude do fluxo é baixa, o sistema solo se auto-organiza em estados de ordem menores e mais simples (microagregados). Nessa condição, o solo perde sua habilidade para exercer suas funções e tem sua qualidade reduzida (Vezzani, 2001).

A resiliência física vem de uma variedade de processos regenerativos que incluem ciclos de umedecimento e secamento, congelamento e descongelamento, assim como as atividades biológicas, como o crescimento de raízes e a atividade da fauna edáfica, que também influenciam a resiliência química e biológica (Seybold et al., 1999; Gregory et al., 2007).

Neste trabalho, a hipótese avaliada é de que as propriedades físicas, como porosidades total e de aeração, conteúdo volumétrico de água, teor de carbono orgânico, permeabilidade ao ar e densidade do solo, são indicadoras do estado da qualidade e, ou, da resiliência de solos sob plantio direto. Assim, o objetivo

foi avaliar a qualidade e a resiliência do solo a partir da mensuração dessas propriedades físicas de dois Latossolos Vermelhos, de diferentes texturas e em distintos estados de compactação e intensidades de ciclos de umedecimento e secamento.

MATERIALE MÉTODOS

As amostragens foram realizadas na Fazenda Escola Capão da Onça, pertencente à Universidade Estadual de Ponta Grossa (25° 05' 47" de latitude sul; 50° 03' 11" de longitude oeste), localizada no município de Ponta Grossa - PR. A altitude média da região é de 1.025 m, sendo o clima classificado como subtropical úmido mesotérmico (Cfb). A precipitação pluvial média anual é de 1.545 mm, e a temperatura média anual, de 18,7 °C (Caviglione et al., 2000).

O experimento foi definido como um "on farm research", onde as áreas de estudo foram delimitadas dentro das áreas de produção. A amostragem foi realizada em maio/2010, entre as safras de verão e inverno; portanto, as culturas de inverno não haviam sido semeadas e as de verão tinham sido colhidas em abril. Essas áreas possuem histórico de rotação de culturas há 15 anos, que incluem culturas de verão, como milho (*Zea mays* L.), soja (*Glycine max* L.) e feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), e culturas de inverno, como trigo (*Triticum aestivum* L.), aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb) e ervilhaca (*Vicia sativa* L.).

Foram delimitadas duas áreas de amostragem, em dois Latossolos Vermelhos, sendo o solo I de textura argilosa (501 g kg⁻¹ de argila, 75 g kg⁻¹ de silte e 424 g kg⁻¹ de areia) e o solo II de textura franco-argilo-arenosa (226 g kg⁻¹ de argila, 32 g kg⁻¹ de silte e 742 g kg⁻¹ de areia). A textura foi determinada pelo método do hidrômetro (Gee & Bauder, 1986).

De cada solo foram retiradas 25 amostras indeformadas, utilizando anéis volumétricos de 96,2 cm³ (7,0 x 2,5 cm) e um dispositivo eletromecânico (Figueiredo, 2010), com o objetivo de melhorar a qualidade da amostragem pela não aplicação de percussão. Os pontos de amostragem foram aleatórios, sendo descartadas áreas marginais. A profundidade de amostragem correspondeu ao centro da camada superficial de 0-5 cm. Realizou-se também a retirada de uma amostra composta de cada solo.

As amostras indeformadas foram preparadas no Laboratório de Física do Solo da ESALQ/USP, retirando-se o excesso de solo das extremidades das amostras, de modo que o volume de solo equivallesse às dimensões do anel.

Estabeleceu-se o primeiro tratamento, denominado de - antes da compactação (A) - onde as amostras foram saturadas com água por capilaridade durante 24 h, submetidas ao potencial mátrico de -10 kPa durante 24 h, em uma mesa de tensão descrita por Ball et al.

(1988), e pesadas; foram feitas medições de permeabilidade do solo ao ar (k_a), por meio de permeâmetro portátil de carga constante de ar, desenvolvido por Figueiredo (2010), cujo princípio de funcionamento consiste na utilização de uma amostra de solo, confinada em anel volumétrico e com livre fluxo de gases em suas extremidades, a qual é submetida a incrementos sucessivos e constantes de taxas de fluxo de ar, gerando gradientes de pressão. O permeâmetro possui um reservatório de ar comprimido, com a finalidade de fornecer gás sob pressão maior que a atmosférica ao sistema pneumático do permeâmetro. Adicionalmente, o equipamento também possui um controlador de vazão mássica de gases com medidor eletrônico do processo, que mantém uma vazão de ar constante e predefinida entre 0 e 20 mL min⁻¹, a qual atravessa uma determinada amostra de solo.

Estabelecendo-se um determinado fluxo de ar e a respectiva diferença de potencial necessária para que esse fluxo transpasse uma amostra e a partir da Lei de Darcy, a densidade de fluxo de ar (q) pode ser descrita como:

$$q = -\frac{k_a}{\eta} \left(\frac{dP}{dZ} + \rho g \right) \quad (1)$$

sendo q [L/T], k_a [L²], P a pressão de ar [M/LT²]; Z , a distância [L] na direção do movimento de ar no sistema poroso; η , a viscosidade do ar [M/LT]; ρ , a densidade do ar [M/L³]; e g , a aceleração da gravidade [L/T²]. A densidade de fluxo corresponde à vazão de ar (Q) [L³/T] por área perpendicular ao movimento do fluido (A_s) [L²]; considerando como desprezível a influência da densidade do ar (Springer et al., 1995), a equação (2) foi utilizada para as estimativas da k_a :

$$k_a = \frac{Q\eta}{A_s} \left(\frac{dZ}{dP} \right) \quad (2)$$

A medida de Z de cada amostra foi considerada no tratamento A igual à altura do anel (0,025 m).

No segundo tratamento, as amostras foram novamente saturadas por capilaridade durante 24 h e submetidas ao potencial mátrico de -10 kPa em mesa de tensão durante 24 h; realizou-se em seguida a compressão uniaxial, que consistiu na aplicação contínua de uma pressão preestabelecida de 200 kPa, por meio da aplicação de uma força vertical de 76,28 kgf sobre amostra, em um sistema de consolidação e aquisição de dados automatizados (marca Satron, modelo MCT 2000, MIRAE Engineering Inc., Buscan Korea®). Essa força simula um estresse típico de compactação em campo; por exemplo, a pressão exercida por um pneu de trator em um estudo de compactação em campo descrito por Gregory et al. (2007) foi igual a 180 kPa. A pressão foi aplicada por 5 min, conforme sugerido por Silva et al., 2000.

Posteriormente ao ensaio de compressão uniaxial, as amostras foram novamente saturadas por 4 h e,

então, submetidas ao potencial mátrico de -10 kPa em mesa de tensão durante 24 h; foram realizadas pesagens e, imediatamente, medições de k_a - este segundo tratamento foi chamado de pós-compactação - C0.

A medida de Z , utilizada na determinação da permeabilidade do solo ao ar, para o tratamento C0 foi aferida considerando a diferença entre a altura do anel e a superfície superior do solo; para isso, foi utilizado um micrômetro digital (marca Digimess®), com capacidade de 0-25 mm e resolução de 0,001 mm, e um disco metálico de 0,7 mm de espessura e diâmetro de 50 mm, colocado entre as superfícies do solo e da haste de medição do micrômetro com o objetivo melhorar a quantificação da deformação do solo, já que o diâmetro da haste de medição é relativamente diminuto em relação ao da amostra de solo, o que poderia incrementar os erros sistemáticos das medições.

Na sequência, iniciou-se um ciclo de umedecimento e secamento, conforme indicações de Gregory et al. (2009). Esse procedimento consistiu em umedecimento das amostras com água por capilaridade durante 3 h; drenagem em mesa de tensão ao potencial mátrico de -0,5 kPa durante 24 h; secagem em estufa a 40 °C por 24 h; umedecimento com água por capilaridade durante 12 h; drenagem ao potencial mátrico de -10 kPa por 24 h; pesagem; e medição de k_a . Na medição de k_a considerou-se a medida de Z , conforme descrito para C0. Este tratamento foi denominado primeiro ciclo (C1). Foram realizados mais três tratamentos repetindo os procedimentos de C1, os quais foram denominados: segundo ciclo (C2), terceiro ciclo (C3) e quarto ciclo (C4). Em resumo, a sequência dos tratamentos e os respectivos procedimentos são mostrados no quadro 1. Os ciclos foram procedimentos padronizados e realizados em sequência.

Com os dados de pesagem e volume de solo, para cada tratamento, foram determinadas a densidade do solo (ρ_s), em g cm⁻³ (Blake & Hartge, 1986), e a umidade volumétrica (θ), obtida por:

$$\theta = \left(\frac{\rho_s}{\rho_a} \right) \times U \quad (3)$$

em que ρ é a densidade da água (g cm⁻³) e U a umidade gravimétrica em g g⁻¹, conforme Gardner (1986).

A porosidade total do solo (α), em cm³ cm⁻³, a porosidade livre de água ou porosidade de aeração (ϵ_a), em cm³ cm⁻³, e a porosidade total foram calculadas segundo Libardi (2005).

As amostras passaram por secagem em estufa a 105 °C por 24 h, para obtenção da massa de solo seco. Com a amostra composta de cada solo, determinou-se o carbono orgânico (CO) pelo método de combustão via seca, utilizando um analisador elementar (Thermo® Flash EA 1112), onde a medida do C do solo é baseada na quantificação do CO₂ por infravermelho médio, sendo o CO₂ formado pela oxidação dos constituintes orgânicos da amostra. Para a quantificação da densidade de partícula (D_p),

Quadro 1. Descrição dos tratamentos aplicados aos dois Latossolos Vermelhos distróficos sob plantio direto

Etapa	Tratamento	Sequência de procedimento
1	Antes da compactação (A)	Saturação ⁽¹⁾ , drenagem _{-10kPa} , pesagem, medição de ka ⁽²⁾
2	Pós-compactação (C0)	Compactação ⁽³⁾ , saturação ⁽¹⁾ , drenagem _{-10 kPa} , pesagem, medição de ka
3	1º Ciclo (C1)	Umedecimento ⁽⁴⁾ , drenagem _{-0,5 kPa} , secagem _{40 °C} , umedecimento ⁽⁵⁾ , drenagem _{-10kPa} , pesagem, medição de ka
4	2º Ciclo (C2)	Umedecimento ⁽⁴⁾ , drenagem _{-0,5 kPa} , secagem _{40 °C} , umedecimento ⁽⁵⁾ , drenagem _{-10kPa} , pesagem, medição de ka
5	3º Ciclo (C3)	Umedecimento ⁽⁴⁾ , drenagem _{-0,5 kPa} , secagem _{40 °C} , umedecimento ⁽⁵⁾ , drenagem _{-10kPa} , pesagem, medição de ka
6	4º Ciclo (C4)	Umedecimento ⁽⁴⁾ , drenagem _{-0,5 kPa} , secagem _{40 °C} , umedecimento ⁽⁵⁾ , drenagem _{-10kPa} , pesagem, medição de ka

Drenagem_{-10kPa}, amostras equilibradas no potencial mátrico de -10 kPa durante 24 h; Drenagem_{-0,5kPa}, amostras equilibradas no potencial mátrico de -0,5 kPa durante 24 h; Secagem_{40 °C}, amostras secas em estufa a 40 °C durante 24 h. ⁽¹⁾Amostras umedecidas com água, por capilaridade, durante 24 h; ⁽²⁾ ka é a permeabilidade do solo ao ar; ⁽³⁾ Amostras submetidas à compressão uniaxial de 200 kPa durante 5 min; ⁽⁴⁾ Amostras umedecidas com água, por capilaridade, durante 3 h. ⁽⁵⁾: Amostras umedecidas com água, por capilaridade, durante 12 h.

retirando-se uma alíquota de solo de terra fina, a qual foi seca em estufa, utilizando o método de deslocamento de gás através de um picnômetro a gás Hélio (modelo ACCUPYC 1330, marca Micrometrics Instrument Corporation®); partindo do princípio de um volume e massa conhecidos, foram processados 8 g de cada amostra composta em triplicata.

Os índices de resiliência do solo (taxa de recuperação) foram calculados para as propriedades densidade do solo (ρ_s), conteúdo volumétrico de água, porosidades total e de aeração e permeabilidade do solo ao ar, segundo Herrick & Wander (1998), pela seguinte equação:

$$\text{Resiliência (recuperação)} = (B-C)/(A-C) \quad (4)$$

em que A é a capacidade do solo de funcionar em pré-distúrbio (antes da compactação - tratamento A); B, o nível de recuperação (medido após o quarto ciclo - C4); e C, o nível de funcionamento do solo imediatamente após o distúrbio (após a compactação - tratamento C0).

Pela condução diferenciada do experimento, adotou-se o intervalo de confiança da média 85 % como critério para discriminação e comparação dos tratamentos, considerando que houve diferença significativa quando não ocorreu sobreposição dos limites superior e inferior. O intervalo de confiança representa os limites em que a média dos valores de um conjunto de dados está contida vem a ser útil e confiável para a interpretação de diferenças significativas (Payton et al., 2000).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios dos teores de carbono orgânico (CO) (Quadro 2) não diferiram entre os solos ($p > 0,05$) pelo teste t. Esses resultados podem ser justificados

Quadro 2. Valores médios dos atributos físicos de dois Latossolos Vermelhos distróficos sob plantio direto

Atributo	Solo	
	I	II
Areia, g kg ⁻¹	424	742
Silte, g kg ⁻¹	75	32
Argila, g kg ⁻¹	501	226
Carbono Orgânico, %	3,80	4,30 ns
Densidade de partícula, Mg m ⁻³	2,56	2,58 ns

ns= não significativo a 5 %; N=25.

pelo fato de que ambos os solos vêm sendo manejados sob plantio direto com rotação de culturas e as práticas de manejo utilizadas seguem os preceitos de manutenção de resíduos sobre a superfície e não revolvimento do solo.

Os valores de densidade de partícula (D_p) encontrados também não diferiram entre si ($p > 0,05$). Esse atributo do solo possui grande estabilidade por ser dependente das proporções relativas das frações mineral e orgânica, assim como da composição mineralógica dos solos, e encontra-se dentro da faixa em que se enquadra a maior parte dos solos minerais: de 2,6 a 2,75 Mg m⁻³ (Brady & Weil, 2007).

No quadro 3 são apresentados os resultados da análise estatística descritiva para a densidade do solo (ρ_s). Os valores do solo I variaram de 0,99 a 1,40 g cm⁻³, e os do solo II, de 1,07 a 1,55 g cm⁻³, apresentando baixa variabilidade, sendo o coeficiente de variação (CV) em torno de 6 % para ambos os solos. Valores de CV inferiores a 15 %, conforme Warrick (1998), são normalmente encontrados para essa propriedade, assim como os valores médios de 1,27 g cm⁻³ para o solo I e 1,38 g cm⁻³ para o solo II. Esses resultados

concordam com os de Cavalieri et al. (2009) e Figueiredo et al. (2011) para Latossolos Vermelhos dessa região, similares ao do presente estudo.

O conteúdo de água no solo apresentou valores médios de 0,39 e 0,28 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, respectivamente para os solos I e II. A porosidade total foi em média de 0,50 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ no solo I e 0,47 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ no solo II, com variação em torno de 6 % em ambos os solos. A variável porosidade de aeração apresentou CV de 33,69 % para o solo I, porque o solo argiloso mostrou drenagem mais lenta; já o solo II apresentou CV de 7,28 % (Quadro 3).

A k_a , por se tratar de uma propriedade dinâmica, foi altamente variável, como indica o coeficiente de variação de 109,02 % para o solo I e 78,70 % para o solo II, valores estes elevados, assim como em Cavalieri et al. (2009) (Quadro 3).

Na figura 1, observa-se que em ambos os solos houve diferença significativa de densidade do solo entre

o tratamento A e os demais; após a compactação, a densidade manteve-se praticamente constante.

Em relação aos valores de densidade restritivos ao crescimento de raízes, considerados para solos argilosos entre 1,3 e 1,4 g cm^{-3} (Reichardt et al., 2003) e para solos arenosos acima de 1,75 g cm^{-3} (Corsini & Ferraud, 1999), observa-se que as amostras não apresentaram valores de ρ_s elevados após a compactação, enquadrando-se abaixo dos limites restritivos.

Os estresses induzidos aumentaram a ρ_s e alteraram a sua estrutura, mesmo após C4, por se tratar de uma propriedade de difícil recuperação após um distúrbio; a ρ_s não recuperou sua condição inicial, não sendo, portanto, influenciada pelos ciclos de umedecimento e secamento. Essa condição de incremento da ρ_s após a compactação - observada em ambos os solos, mensurada pelo índice de resiliência

Quadro 3. Momentos estatísticos para os atributos físicos de dois Latossolos Vermelhos distróficos sob plantio direto, um argiloso (solo I) e um franco-argilo-arenoso (solo II)

Atributo	Solo	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	DP ⁽⁶⁾	CV(%)
ρ_s (g cm^{-3}) ⁽¹⁾	I	0,99	1,40	1,27	1,30	0,09	6,31
	II	1,07	1,55	1,38	1,39	0,11	6,38
θ_{cc} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) ⁽²⁾	I	0,34	0,45	0,39	0,39	2,15	4,35
	II	0,20	0,39	0,28	0,28	3,17	10,49
α ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) ⁽³⁾	I	0,45	0,61	0,50	0,49	3,57	6,22
	II	0,40	0,59	0,47	0,46	4,13	6,38
ϵ_a ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) ⁽⁴⁾	I	0,02	0,26	0,11	0,11	4,41	33,69
	II	0,08	0,39	0,19	0,18	6,10	7,28
k_a (μm^2) ⁽⁵⁾	I	0,10	79,69	14,29	7,76	16,91	109,02
	II	0,74	75,60	13,28	9,42	11,99	78,70

⁽¹⁾Densidade do solo; ⁽²⁾Conteúdo volumétrico de água do solo na capacidade de campo; ⁽³⁾Porosidade total do solo; ⁽⁴⁾Porosidade de aeração do solo; ⁽⁵⁾Permeabilidade do solo ao ar; ⁽⁶⁾DP: desvio-padrão; N=25.

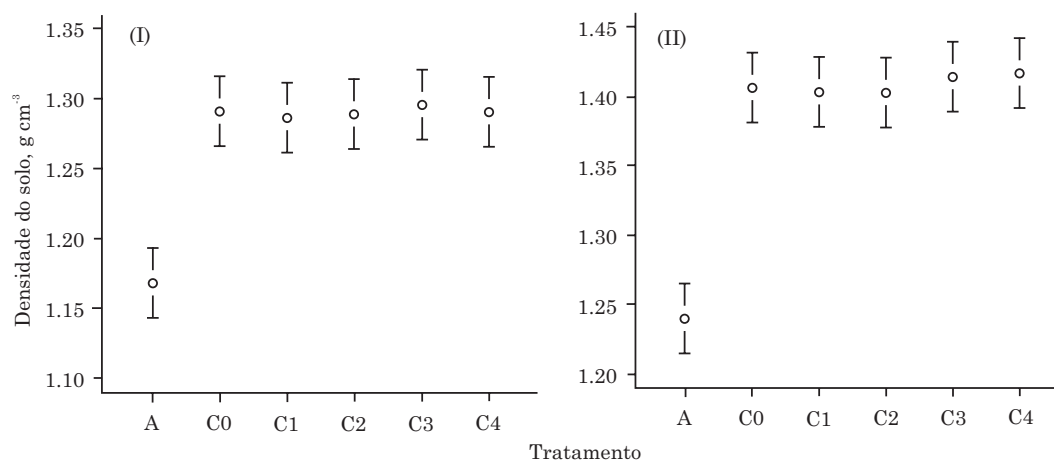


Figura 1. Valores médios de densidade de dois Latossolos Vermelhos distróficos, um argiloso (I) e um franco-argilo-arenoso (II), nos tratamentos A, C0, C1, C2, C3 e C4. As barras representam o intervalo de confiança da média (85 %).

(Figura 2) - apresentou valores médios próximos a zero, o que demonstra que, quando alterada, a ρ_s necessita de práticas de manejo e tempo maior de recuperação.

Alguns autores relatam aumento da densidade de solos sob plantio direto devido à compactação causada pelo tráfego de máquinas e ao seu não revolvimento (Håkansson et al., 1988; Streck et al., 2004; Giarola et al., 2009), ocasionando um rearranjo das partículas, o que pode ser evidenciado em ambos os solos, pois a ρ_s permaneceu com valores mais elevados após a compactação mesmo quando exposta à força dos ciclos de umedecimento e secamento (Figura 1).

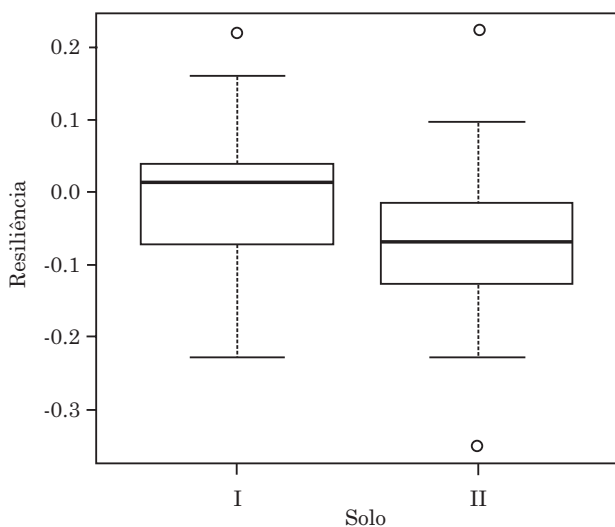


Figura 2. Distribuição dos índices de resiliência da densidade de dois Latossolos Vermelhos distróficos, um argiloso (I) e um franco-argilo-arenoso (II). As barras representam o intervalo de confiança da média (85 %).

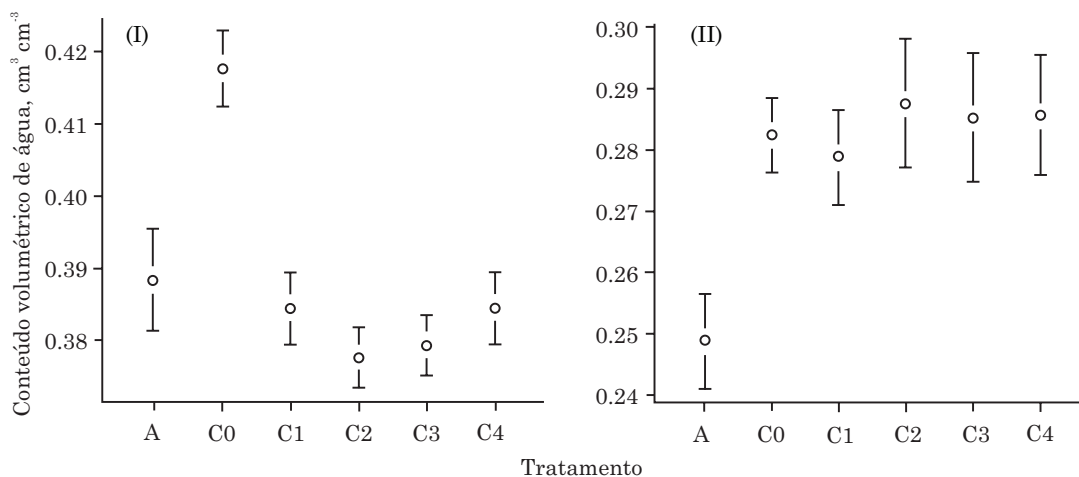


Figura 3. Valores médios de conteúdo volumétrico de água de dois Latossolos Vermelhos distróficos, um argiloso (I) e um franco-argilo-arenoso (II), nos tratamentos A, C0, C1, C2, C3 e C4. As barras representam o intervalo de confiança da média (85 %).

A retenção de água foi alterada pela compactação das amostras em ambos os solos (Figura 3). Observa-se que o conteúdo volumétrico de água nas amostras do solo I mostrou diferença significativa do tratamento C0 em relação aos demais, ou seja, na condição após a compactação apresentou incremento, alcançando valores médios em torno de $0,41 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Nos tratamentos C1 a C4, observa-se que o conteúdo volumétrico de água retorna a valores semelhantes aos da condição inicial, representada pelo tratamento A, antes da compactação.

No solo II houve diferença significativa do tratamento A em relação aos demais; após a compactação esse solo apresentou valores médios de conteúdo volumétrico de água mais elevados (em torno de $0,28 \text{ cm}^3 \text{ m}^{-3}$) e permaneceu após os ciclos de umedecimento e secamento (Figura 3).

O comportamento distinto dessa variável nos dois solos deve-se à maior capacidade de retenção de água nos solos com maior teor de argila, os quais possuem maior área superficial e microporosidade, retendo água na forma de pequenos filmes aderidos à superfície das partículas do solo (Roseberg & McCoy, 1992; Brady & Weil, 2002).

O solo I apresentou índices de resiliência próximos a 3, e o solo II, valores negativos (Figura 4), o que demonstra a maior resiliência do primeiro; provavelmente, devido ao maior teor de argila, no processo de umedecimento haja maior retenção de água mesmo após a compactação (Dexter, 1991).

Os valores de porosidade de aeração (ϵ_a) (Figura 5) demonstraram que no solo I há recuperação significativa após C1 em relação a C0, porém os valores não alcançam o estado inicial A. No solo II não houve recuperação após C0; a redução significativa da (ϵ_a) do tratamento A em relação aos demais não foi recuperada nos demais tratamentos. Essa recuperação

parcial da (ϵ_a) após os ciclos de umedecimento e secamento demonstra que solos com maior teor de argila apresentam maior resiliência em relação à estrutura porosa do solo que aqueles mais arenosos.

Segundo Chan (2002), valores de ϵ_a entre 0,05 e 0,15 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) podem ser comumente usados como limites críticos; abaixo desse intervalo a aeração é insuficiente para o crescimento das raízes. Neste estudo foram observados valores médios para o solo I em torno de 0,07 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ em C0; portanto, o crescimento das raízes poderia ser limitado pela baixa aeração.

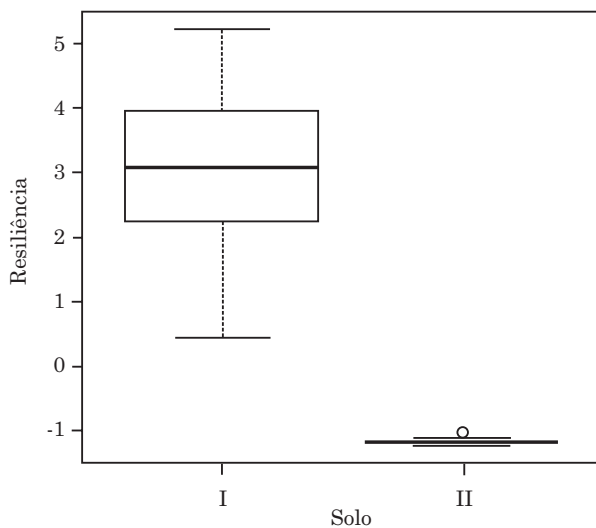


Figura 4. Distribuição dos índices de resiliência do conteúdo volumétrico de água de dois Latossolos Vermelhos distróficos, um argiloso (I) e um franco-argilo-arenoso (II). As barras representam o intervalo de confiança da média (85 %).

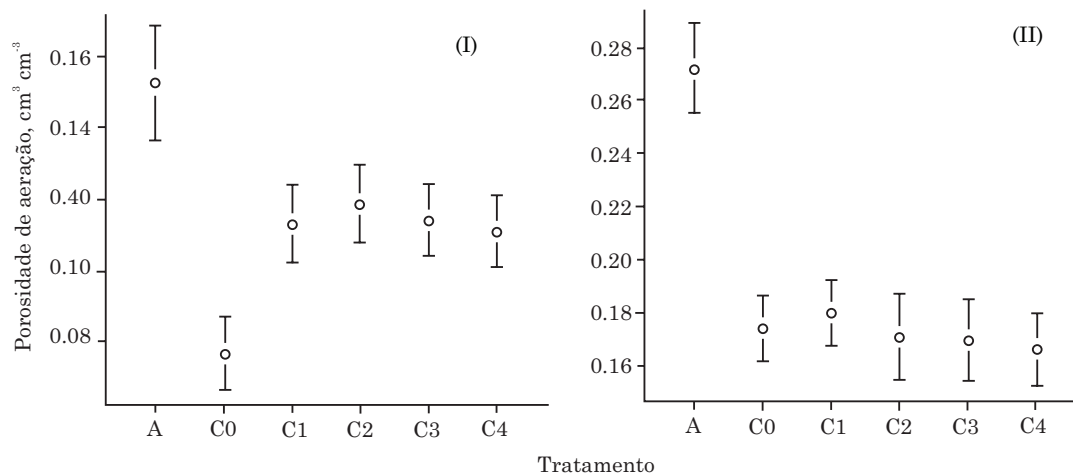


Figura 5. Valores médios de porosidade de aeração de dois Latossolos Vermelhos distróficos, um argiloso (I) e um franco-argilo-arenoso (II), para os tratamentos A, C0, C1, C2, C3 e C4. As barras representam o intervalo de confiança da média (85 %).

Assim como o conteúdo volumétrico de água, a capacidade de recuperação da porosidade de aeração do solo está diretamente relacionada com a capacidade de agregação, que favorece a reorganização do sistema poroso a partir de um impacto hidráulico (Horn & Baumgartl, 2002). Esse impacto causado pelos ciclos de umedecimento e secamento, ou seja, dependendo das alterações no conteúdo de água no solo, aliado ao manejo, faz com que a estrutura do solo, bem como suas propriedades relacionadas ao sistema poroso, como índice de vazios (Dörner et al., 2009), capacidade de aeração, condutividade hidráulica e resistência a penetração (Dec et al., 2011), apresentem comportamento dinâmico e mudem temporária e espacialmente.

Já a redução significativa na porosidade total (PT) nos solos I e II após a compactação (C0), em relação ao tratamento A (Figura 6), pode ser explicada pelo fato de os macroporos sofrerem maior redução e conseqüente aumento dos microporos quando submetidos a estresses mecânicos, reduzindo a porosidade total (Araújo, 2004).

Não há recuperação da PT mesmo após os ciclos de umedecimento e secamento (C1 a C4); assim, pode-se afirmar que a PT dos solos dependente da estrutura é muito vulnerável aos estresses mecânicos, conforme salientado por Baumgartl & Köck (2004).

O índice de resiliência próximo a zero demonstra que a PT e a ϵ_a não apresentaram recuperação - portanto, foram alteradas pela compactação - e os ciclos de umedecimento e secamento não foram suficientes para o retorno à condição inicial.

Os dados de k_a foram ajustados às distribuições mais próximas da normalidade, por meio da aplicação do logaritmo de k_a , visto que a distribuição dos valores de k_a para os dois solos avaliados apresentou-se assimétrica e não normal usando o teste de Shapiro

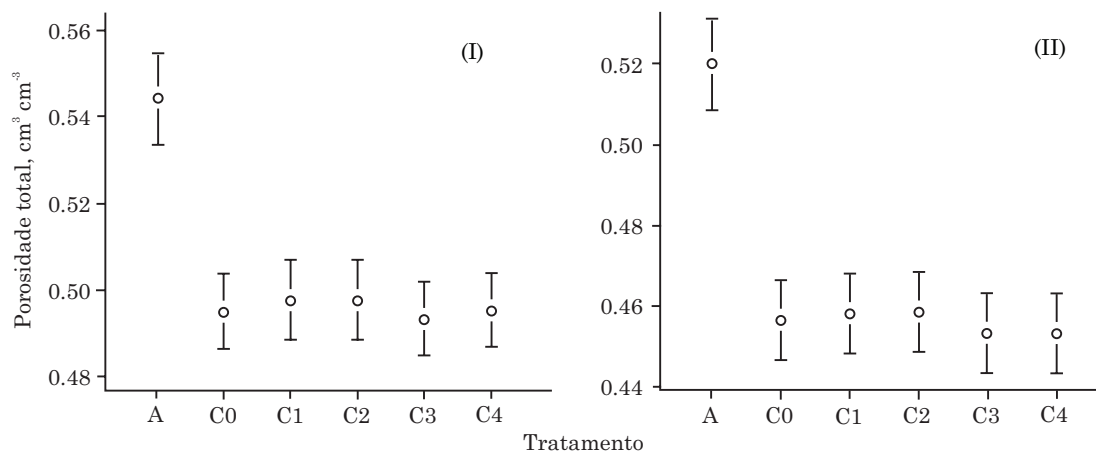


Figura 6. Valores médios de porosidade total de dois Latossolos Vermelhos distróficos, um argiloso (I) e um franco-argilo-arenoso (II), nos tratamentos A, C0, C1, C2, C3 e C4. As barras representam o intervalo de confiança da média (85 %).

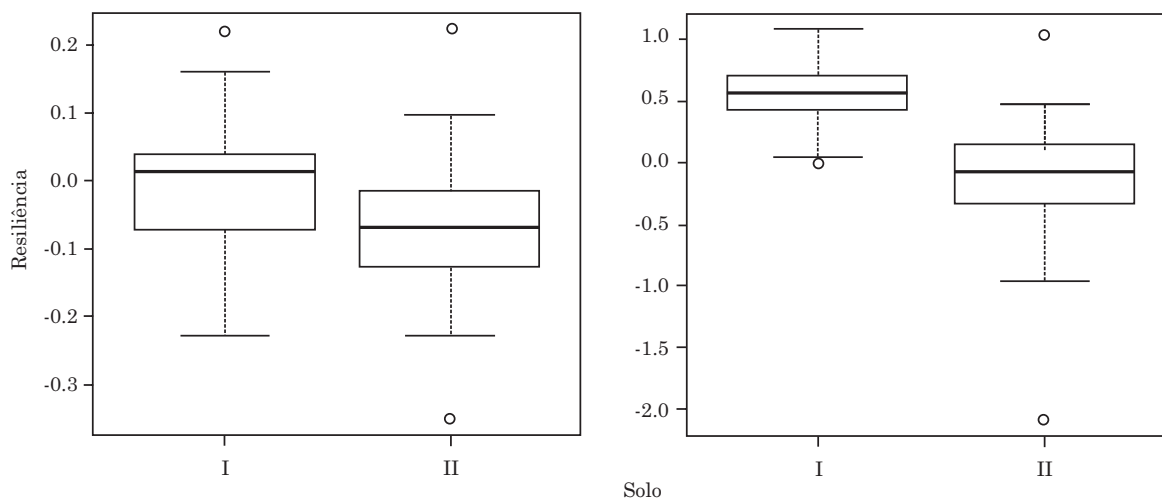


Figura 7. Distribuição dos índices de resiliência da porosidade total e de aeração dois Latossolos Vermelhos distróficos, um argiloso (I) e um franco-argilo-arenoso (II). As barras representam o intervalo de confiança da média (85 %).

& Wilk (1965), em acordo com Groenvelt et al. (1984), Ball et al. (1988) e Rodrigues et al. (2011). Os valores médios de $\log k_a$, em todos os tratamentos e para os solos I e II, estão apresentados na figura 8.

No solo I, no tratamento C0, observa-se valor de $\log k_a$ menor que zero (Figura 8); nessa situação, o solo, segundo McQueen & Shepard (2002), pode ser considerado impermeável. Esses autores afirmam que os poros estão bloqueados e não fazem parte do transporte convectivo do ar quando apresentam $k_a \leq 1 \mu\text{m}^2$ ($\log k_a \leq 0$).

As diferenças significativas entre tratamentos no solo I e II demonstraram que o estresse ao ser aplicado fez com que permeabilidade do solo ao ar diminuísse em consequência da compactação e aumentasse após os ciclos. Essa condição de aumento da permeabilidade

ao ar, segundo Dörner et al. (2011), ocorre porque, enquanto os estresses mecânicos diminuem a permeabilidade ao ar como uma consequência da redução de macroporos, o ciclo de secamento permite que o solo transporte mais ar a partir da formação de fendas entre os agregados.

A partir da relação da variável permeabilidade do solo ao ar, obteve-se a distribuição dos valores da resiliência física dos solos, calculados conforme Herrick & Wander (1998), indicada na figura 9 para melhor visualização dos dados, mostrando a variação entre os dois solos e a amplitude dos valores.

Os resultados demonstram que o solo argiloso foi altamente resiliente, apresentando diferença significativa em relação à recuperação do solo franco-argilo-arenoso; isso se deve às características de solos

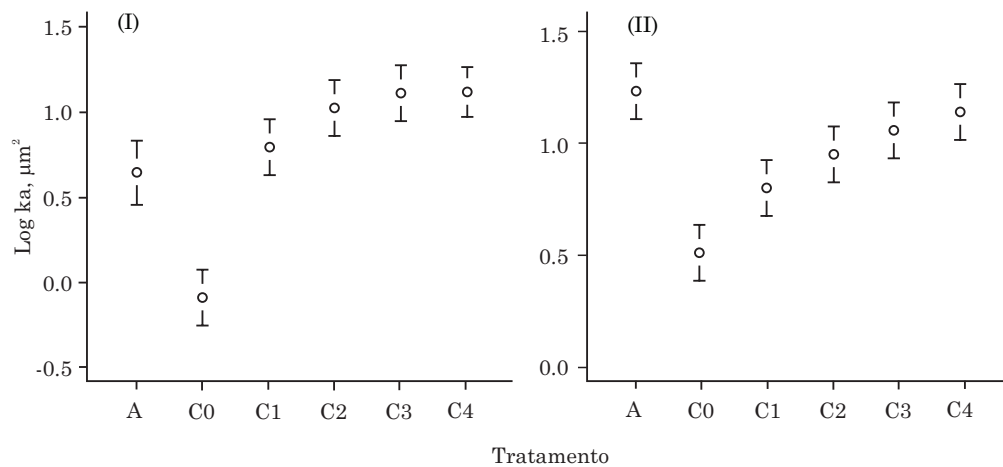


Figura 8. Valores médios de log de permeabilidade ao ar de dois Latossolos Vermelhos distróficos, um argiloso (I) e um franco-argilo-arenoso (II), para os tratamentos A, C0, C1, C2, C3 e C4. As barras representam o intervalo de confiança da média (85 %).

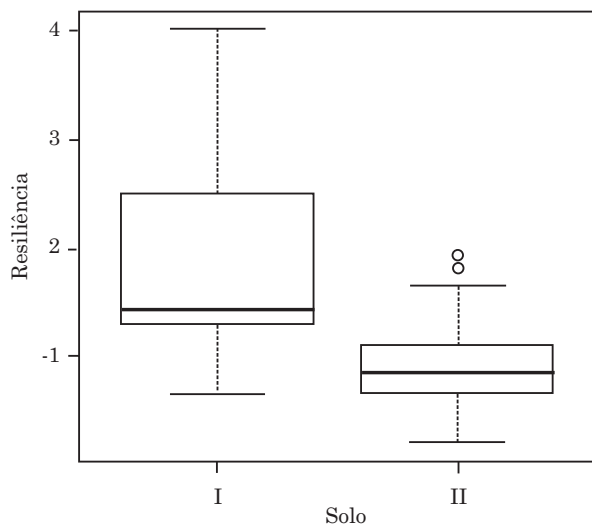


Figura 9. Distribuição dos valores de resiliência da permeabilidade do solo ao ar de dois Latossolos Vermelhos distróficos, um argiloso (I) e um franco-argilo-arenoso (II). As barras representam o intervalo de confiança da média (85 %).

com menor percentagem de argila mais suscetíveis à compactação (Shestak & Busse, 2005) e com menor capacidade de recuperação (Tobias et al., 2001). No entanto, a recuperação do solo II pode estar relacionada com a presença de matéria orgânica, já observada pelo retorno do volume do solo depois de estresses físicos e na mudança de manejo (Zhang et al., 2005).

Dörner et al. (2011) também encontraram relação significativa entre a permeabilidade do solo ao ar medida depois do estresse compressivo e a recuperação da estrutura do solo, propondo que essa relação seja um indicador da resiliência funcional dos poros do solo, já que transmite a capacidade do solo de recuperar

seu volume inicial de garantir o transporte de ar, ou seja, a resiliência funcional dos poros aumenta com a recuperação do volume do solo, sendo solos mais bem estruturados e com maior capacidade de recuperação, devido a uma maior continuidade de poros.

Essa quantificação que relaciona o impacto do manejo sobre as funções dos poros do solo e a sua capacidade para se recuperar (Peth & Horn, 2006; Gregory et al., 2007, 2009; Dörner et al., 2009) vem, segundo Dörner et al. (2011), de encontro às prioridades atuais, como a melhoria na qualidade dos solos para aumento da produção de alimentos, o controle de tráfego devido ao aumento do peso das máquinas, o qual sujeita o solo a maiores estresses mecânicos, e a exposição do solo à seca em muitas áreas devido à mudança do clima, principalmente nos trópicos e subtropicais, onde o risco de degradação do solo é um problema severo e são raras as informações em relação à recuperação de áreas degradadas e ao impacto econômico na produção (Blanco & Lal, 2010).

CONCLUSÕES

1. A estrutura dos dois Latossolos Vermelhos apresenta comportamento dinâmico e muda em consequência da compactação, assim como dos ciclos de umedecimento e secamento.

2. Os ciclos de umedecimento e secamento contribuem para a recuperação da permeabilidade do solo ao ar, mas não o suficiente para a porosidade total e a densidade do solo.

3. Solos argilosos, como o solo I, apresentam maior recuperação e são considerados mais resilientes fisicamente que solos franco-argilo-arenosos, como o solo II.

LITERATURA CITADA

- ARAÚJO, A.G. Estimativa e classificação da compactação do solo pelo tráfego de máquinas agrícolas através da modelagem nebulosa. São Paulo, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2004. 224p. (Tese de Doutorado)
- ASSIS, R.L. & LANÇAS, K.P. Avaliação da compressibilidade de um Nitossolo Vermelho distroférico sob plantio direto, preparo convencional e mata nativa. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:515-522, 2005.
- BALL, B.C.; O'SULLIVAN, M.F. & HUNTER, R. Gas diffusion, fluid flow and derived pore continuity indices in relation to vehicle traffic and tillage. *J. Soil Sci.*, 39:327-339, 1988.
- BAUMGARTL, T. & KÖCK, B. Modeling volume change and mechanical properties with hydraulic models. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68:57-65, 2004.
- BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis; physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.363-375.
- BLANCO, H. & LAL, R. Soil resilience and conservation. In: BLANCO, H. & LAL, R., eds. *Principles of soil conservation and management*. Columbus, Springer Science Business Media B.V., 2010. p.15-33.
- BRADY, N. & WEIL, R.R. *The nature and properties of soils*. 14th ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2007. 980p.
- BRADY, N.C. & WEIL, R.R. *The nature and properties of soils*. 13.ed. New Jersey, Prentice Hall, 2002. 960p.
- CAVIGLIONE, J.H.; KIIHL, L.R.B.; CARAMORI, P.H. & OLIVEIRA, D. *Cartas climáticas do Paraná*. Londrina, IAPAR, 2000. CD-ROM.
- CHAN, K.Y. Bulk density. In: LAL, R., ed. *Encyclopedia of soil science*. New York, Marcel Dekker, 2002. p.128-130.
- 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 physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. *Soil Tillage Res.*, 103:158-164, 2009.
- COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & KAISER, D.R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:933-942, 2008.
- CORSINI, P.C. & FERRAUDO, A.S. Efeitos de sistemas de cultivos densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo roxo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 34:289-98, 1999.
- DEXTER, A.R. Amelioration of soil by natural processes. *Soil Tillage Res.*, 20:87-100, 1991.
- DEC, D.; DÖRNER, J. & BALOCCHI, O. Temporal and spatial variability of structure dependent properties of a volcanic ash soil under pasture in southern Chile. *Chilean J. Agric. Res.*, 71:293-303, 2011.
- DIAS JUNIOR, M.S. & PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:175-182, 1996.
- DÖRNER, J.; DEC, D.; PENG, X. & HORN, R. Efecto del cambio de uso en la estabilidad de la estructura y la función de los poros de un Andisol (Typic Hapludand) del sur de Chile. *R. Ci. Suelo Nutr. Veg.*, 9:190-209, 2009.
- DÖRNER, J.; DEC, D.; ZÚÑIGA, F.; SANDOVAL, P. & HORN, R. Effect of land use change on Andosol's pore functions and their functional resilience after mechanical and hydraulic stresses. *Soil Tillage Res.*, 115/116:71-79, 2011.
- FIGUEIREDO, G.C. Avanços metodológicos e instrumentais em física do solo. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2010. 163p. (Tese de Doutorado)
- FIGUEIREDO, G.C.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; GIAROLA, N.F.B.; MORAES, S.O. & ALMEIDA, B.G. Desenvolvimento de um consolidômetro pneumático: Modelagem da compactação, penetrometria e resistência tênsil de agregados de solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 35:389-402, 2011.
- FRANCO, I.; CONTIN, M.; BRAGATO, G. & DE NOBILI, M. Microbiological resilience of soils contaminated with crude oil. *Geoderma*, 121:17-30, 2004.
- GARDNER, W.H. Water content. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. Part 1. p.493-544.
- GEE, G. & BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. 2.ed. Madison, ASA/SSSA, 1986. Part 1. p.383-411. (Agronomy Monograph, 9)
- GIAROLA, N.F.B.; BRACHTVOGEL, E.L.; FONTANIVA, S., PEREIRA, R.A. & FIOREZE, S.L. Cultivares de soja sob plantio direto em Latossolo Vermelho compactado. *Acta Sci. Agron.*, 31:641-646, 2009.
- GREGORY, A.S.; WATTS, C.W.; WHALLEY, W.E.; KUAN, H.L.; GRIFFITHS, B.S.; HALLET, P.D. & WHITMORE, A.P. Physical resilience of soil to field compaction and the interactions with plant growth and microbial community structure. *Eur. J. Soil Sci.*, 58:1221-1232, 2007.
- GREGORY, A.S.; WATTS, C.W.; GRIFFITHS, B.S.; HALLET, P.D.; KUAN, H.L. & WHITMORE, A.P. The effect of long-term soil management on the physical and biological resilience of a range of arable and grassland soils in England. *Geoderma*, 153:172-185, 2009.
- GRIFFITHS, B.S.; RITZ, K.; BARDGETT, R.D.; COOK, R.; CHRISTENSEN, S.; EKELUND, F.; SORENSEN, S.J.; BAATH, E.; BLOEM, J.; DE RUITER, P.C.; DOLFING, J. & NICOLARDIT, B. Ecosystem response of pasture soil communities to fumigation-induced microbial diversity reductions; an examination of the biodiversity-ecosystem function relationship. *Oikos*, 90:279-294, 2000.
- GROENVELT, P.H.; KAY, B.D. & GRANT, C.D. Physical assessment of soil with respect to rooting potential. *Geoderma*, 34:101-114, 1984.

- HÅKANSSON, I.; VOORHEES, W.B. & RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop responses in different traffic regimes. *Soil Tillage Res.*, 11:239-282, 1988.
- HÅKANSSON, I. & MEDVEDEV, V.W. Protection of soils from mechanical overloading by establishing limits for stresses caused by heavy vehicles. *Soil Tillage Res.*, 35:85-97, 1995.
- HÅKANSSON, I. Machinery-induced compaction of arable soils: Incidence, consequences, counter-measures. Sweden, Dept. of Soil Sciences, Division of Soil Management, Uppsala, 2005. 153p.
- HERRICK, J.E. & WANDER, M.M. Relationships between soil organic carbon and soil quality in cropped and rangeland soils: The importance of distribution, composition and soil biological activity. In: LAL, R.; KIMBLE, J.M.; FOLLET, R.F. & STEWART, B.A., eds. *Soil processes and carbon cycle: Advances in soil science*. Boca Raton, CRC Press, 1998. p.405-426.
- HORN, R. & BAUMGARTL, T. Dynamic properties of soils. In: WARRICK, A.W., ed. *Soil physics companion*. Boca Raton, CRC Press, 2002. p.17-48.
- KLEIN, V.A. & BOLLER, W. Avaliação de diferentes manejos de solo e métodos de semeadura em áreas sob sistema plantio direto. *Ci. Rural*, 25:395-398, 1995.
- LAL, R. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality, and sustainability. *Soil Tillage Res.*, 27:1-8, 1993.
- LAL, R. Sustainable land use systems and soil resilience. In: GREENLAND, D.J. & SZABOLCS, I., eds. *Soil resilience and sustainable land use*. Wallingford, CAB International, 1994. p.41-67.
- LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no solo. São Paulo, EDUSP, 2005. 335p.
- McBRIDE, R.A. & WATSON, G.C. An investigation of re-expansion of unsaturated, structured soils during cycles static loading. *Soil Tillage Res.*, 17:241-253, 1990.
- McQUEEN, D.J. & SHEPHERD, T.G. Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (Typic Endoaquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region. *Soil Tillage Res.*, 25:217-230, 2002.
- PAYTON, M.E.; MILLER, A.E. & RAUN, W.R. Testing statistical hypothesis using standard error bars and confidence intervals. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 31:547-551, 2000.
- PETH, S. & HORN, R. The mechanical behavior of structured and homogenized soil under repeated loading. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 169:401-410, 2006.
- REICHARDT, K.; DOURADO-NETO, D.; TIMM, L.C.; BASANTA, M.V.; CAVALCANTE, L.F.; TERUEL, D.A.; BACCHI, SANTOS, O.O.; TOMINAGA, T.T.; CERRI, C.C. & TRIVELIN, P.C.O. Management of crop residues for sustainable crop production. IAEA-TECDOC, 1354:149-169, 2003.
- 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 Res.*, 102:242-254, 2009.
- RODRIGUES, S.; DA SILVA, A.P.; GIAROLA, N.F.B. & ROSA, J.A. Permeabilidade ao ar em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo* 35:105-114. 2011.
- ROSA, D.P.; REICHERT, J.M.; SATTTLER, A.; REINERT, D.J.; MENTGES, M.I. & VIEIRA, D.A. Esforços e mobilização provocada pela haste sulcadora de semeadora, em Latossolo escarificado em diferentes épocas. *Pesq. Agropec. Bras.*, 43:396-400, 2008.
- ROSEBERG, R.J. & McCOY, E.L. Measurement of soil macropore air permeability. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:969-974, 1990.
- SEYBOLD, C.A.; HERRICK, J.E. & BREJDA, J.J. Soil resilience: A fundamental component of soil quality. *Soil Sci.*, 164:224-234, 1999.
- SHAPIRO, S.S. & WILK, M.B. Analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*. 52:591-611, 1965.
- SHESTAK, C.J. & BUSSE, M.D. Compaction alters physical but not biological indices of soil health. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69:236-246, 2005.
- SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. & CAMARGO, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. *R. Bras. Ci. Solo*, 10:91-95, 1986.
- SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:239-249, 2000.
- SILVA, R.B.; DIAS JUNIOR, M.S.; SANTOS, F.L. & FRANZ, C.A.B. Influência do preparo inicial sobre a estrutura do solo quando da adoção do sistema plantio direto, avaliada por meio da pressão de preconsolidação. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:961-971, 2003.
- SILVEIRA, P.M.; STONE, L.F.; ALVES JÚNIOR, J. & SILVA, J.G. Efeitos do manejo do solo sob plantio direto e de culturas na densidade e porosidade de um Latossolo. *Biosci. J.*, 24:53-59, 2008.
- SPRINGER, D.S.; CULLEN, S.J. & EVERETT, L.G. Laboratory studies on air permeability. In: EVERETT, L.G. & CULLEN, S.J., eds. *Handbook of vadose zone characterization and monitoring*. Boca Raton, Lewis Publishers, 1995. p.217-248.
- STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & KAISER, D.R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. *Ci. Rural*, 34:755-760, 2004.
- TOBIAS, S.; HENNES, M.; MEIER, E. & SCHULIN, R. Estimating soil resilience to compaction by measuring changes in surface and subsurface levels. *Soil Use Manage.*, 17:229-234, 2001.

- TORMENA, C.A.; ROLLOF, G. & SÁ, J.C.M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:301-309, 1998.
- VEZZANI, F.M. Qualidade do sistema solo na produção agrícola. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. 184p. (Tese de Doutorado)
- WARRICK, A.W. Spatial variability. In: HILLEL, D., ed. *Environmental soil physics*. New York, Academic Press, 1998. p.655-675.
- ZHANG, B.; HORN, R. & HALLET, P.D. Mechanical resilience of degraded soil amended with organic matter, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69: 864-871, 2005.