

Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo

Gilberto Loguércio Collares⁽¹⁾, Dalvan José Reinert⁽²⁾, José Miguel Reichert⁽²⁾ e Douglas Rodrigo Kaiser⁽²⁾

⁽¹⁾Universidade Federal de Pelotas, Dep. de Ciências Agrárias, CAVG, CEP 96015-560 Pelotas, RS. E-mail: collares@ufpel.tche.br ⁽²⁾Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Dep. de Solos, CEP 97105-900 Santa Maria, RS. E-mail: dalvan@ccr.ufsm.br, reichert@smail.ufsm.br, kaiser@mail.ufsm.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi determinar as propriedades físicas e o intervalo hídrico ótimo (IHO) de um Argissolo, sob diferentes estados de compactação, cultivado com feijoeiro. Foram utilizados três experimentos, cujos tratamentos constituíram-se de: plantio direto (PD); plantio direto compactado pelo tráfego de quatro passadas de máquina (PDc); e escarificação em área anteriormente sob plantio direto (Esc). Avaliaram-se a densidade, a porosidade, a umidade volumétrica e a resistência à penetração do solo. Nas plantas, avaliaram-se a distribuição do sistema radicular e a produtividade. A densidade crítica obtida pelo IHO foi de 1,75 Mg m⁻³. No PDc a densidade do solo foi superior à crítica na maioria das camadas, enquanto o PD e Esc apresentaram densidade acima da crítica em poucas camadas. A umidade do solo ficou fora dos limites do IHO na maior parte do ciclo da cultura. A resistência à penetração ficou acima da crítica no PDc em todas as avaliações. O sistema radicular concentrou-se superficialmente no PDc com melhor distribuição e desenvolvimento no PD e Esc. Nos três experimentos, a produtividade do Esc foi de 2 a 12% menor, e a do PDc foi de 30 a 62% menor do que no PD. A escarificação não foi necessária para as condições físicas do PD.

Termos para indexação: *Phaseolus vulgaris*, compactação do solo, intervalo hídrico ótimo, porosidade de aeração, resistência à penetração, desenvolvimento radicular.

Soil physical quality on black beans yield in an Alfisol

Abstract – In this work, soil properties and least limiting water range (LLWR) were determined for an Alfisol under three states of compaction with black beans crop. Three experiments were used, comprising the following treatments: 12 years of no-tillage – NT; 12 years, of no-tillage compacted by four passes of a bucket loader – NTc; and chiseling of soil previously under no-tillage for 12 years – Ch. Throughout the plant cycle, bulk density, total porosity, volumetric water content, air filled porosity and soil resistance to penetration were evaluated. Plant root distribution and yield were also evaluated. The critical bulk density obtained by LLWR was 1.75 Mg m⁻³. In the NTc the bulk density was higher than critical value for most soil layers, whereas the PD and Ch presented higher value in a few layers. Soil water content was out of LLWR range for most part of plant cycle. Soil resistance to penetration in the NTc was higher than critical value in all evaluated dates, while in roots concentrated superficially. For the three experiments, higher compaction levels (NTc) induced yield reduction from 30 to 62% and soil chiseling (Ch) induced yield reduction from 2 to 12% compared to crops under no-tillage (PD). Compaction alleviation by chiseling was not necessary to improve crop yield for soil physical conditions of this area.

Index terms: *Phaseolus vulgaris*, compaction, least limiting water range, air filled porosity, resistance to penetration, root growth.

Introdução

As plantas necessitam de solos com condições físicas favoráveis para o seu desenvolvimento adequado. Essas condições determinam os fluxos de água, calor e gases no solo. A umidade do solo, por sua vez, controla a aeração, a temperatura e a resistência mecânica do solo,

as quais são afetadas pela densidade do solo e distribuição do tamanho de poros. Esses fatores físicos interagem e regulam o crescimento e a funcionalidade das raízes, com reflexo no crescimento e produtividade dos cultivos.

A estrutura do solo pode ser alterada por práticas de manejo, influenciando a produtividade das culturas por

meio das alterações na disponibilidade de água, na difusão de oxigênio e na resistência do solo à penetração das raízes (Tormena et al., 1998). A capacidade do solo em promover condição adequada para o crescimento e desenvolvimento da planta é considerada uma qualidade física do solo.

A expansão do sistema plantio direto, com área plantada superior a 21 milhões de hectares, no Brasil, em 2004, segundo a Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha, suscitou questionamentos relacionados à dinâmica da água no solo e seus efeitos na resistência à penetração e na aeração do solo, e sobre se o maior armazenamento de água proporcionado por esse sistema se traduz em maior disponibilidade às plantas.

O plantio direto modifica as condições do solo, em taxas e direções diferentes das observadas em sistemas de manejo que incluem o seu revolvimento (Reichert et al., 2003). O solo é minimamente revolvido e o aporte de resíduos na superfície induz aumento da matéria orgânica (Bayer & Mielniczuk, 1997), a qual, associada a raízes em decomposição, proporciona recuperação da estrutura do solo e maior distribuição e continuidade dos poros. Os resíduos que permanecem na superfície do solo dissipam a energia cinética das gotas da chuva e proporcionam maior percurso ao escoamento da água de superfície (Seganfredo et al., 1997). Assim, a infiltração da água no solo pode aumentar e, conseqüentemente, o armazenamento. No entanto, a ausência de revolvimento do solo, associada à maior intensidade de uso da terra, expõe o solo a intenso tráfego de máquinas em condições inadequadas de umidade e contribui para alterar a qualidade estrutural do solo, o que acarreta aumento da compactação em muitas áreas manejadas sob esse sistema.

A compactação acarreta aumento da densidade e da resistência do solo à penetração e redução da macroporosidade ou porosidade de aeração. O maior estado de compactação na semeadura direta verifica-se próximo aos 0,10 m de profundidade (Genro Junior et al., 2004), principalmente em virtude do confinamento das pressões resultantes do tráfego de máquinas. O grau de compactação pode se tornar limitante, de acordo com a densidade e conforme flutuações na umidade do solo, que afetam a resistência do solo e sua porosidade de aeração. Esses fatores, muitas vezes, são usados de forma isolada na caracterização da compactação, no entanto, no solo, ocorrem interligados, e a resposta das plantas é resultante de complexa interação entre essas

propriedades, o que torna difícil a definição de limites críticos para cada propriedade de forma isolada.

O aumento na umidade do solo causa decréscimo na sua aeração e resistência à penetração. O primeiro efeito é indesejável quando abaixo de 10%, valor que limita o processo de respiração radicular e as trocas gasosas no solo (Grable & Siemer, 1968). O segundo efeito é desejável por facilitar o processo de penetração das raízes no solo (Taylor et al., 1966).

Em virtude da complexa interação entre os fatores físicos, em cada condição estrutural do solo, existe uma faixa ótima de umidade que favorece o crescimento vegetal (Letey, 1985). Em razão dessas interações, Silva et al. (1994) propuseram um índice para avaliar a qualidade estrutural do solo denominado intervalo hídrico ótimo (IHO). Esse índice considera a faixa de umidade do solo como sendo aquela onde as limitações ao crescimento vegetal, associadas à umidade, aeração e resistência mecânica à penetração de raízes, são minimizadas. O IHO serve como indicativo da qualidade física do solo e na avaliação do manejo do solo e culturas. Procura-se adotar práticas que visam a aumentar a água disponível às plantas, controlando os parâmetros que interferem direta ou indiretamente nesse processo, tais como a densidade do solo e o espaço poroso.

O objetivo deste trabalho foi determinar as propriedades físicas e o intervalo hídrico ótimo (IHO) de um Argissolo, sob diferentes estados de compactação, cultivado com feijoeiro.

Material e Métodos

Este estudo foi realizado na área experimental do Dep. de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, na região fisiográfica da Depressão Central do Rio Grande do Sul, localizada a 29°41'S, 53°48'W e altitude de 95 m. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é subtropical úmido, do tipo Cfa. As médias anuais de temperatura, precipitação e umidade relativa são de 19,3°C, 1.561 mm e 82%, respectivamente.

O solo do local é classificado como Argissolo Vermelho distrófico arênico (Embrapa, 1999) (Typic Hapludalf). A análise granulométrica indicou valores médios de 89 g kg⁻¹ de argila, 297 g kg⁻¹ de silte e 614 g kg⁻¹ de areia (classe textural franco arenosa) até a profundidade de 0,3 m.

A área utilizada para o experimento vinha sendo cultivada há 12 anos no sistema de semeadura direta

com a rotação cultural, incluindo aveia-preta, soja e milho. No momento da aplicação dos tratamentos, a área se encontrava cultivada com aveia-preta, a qual foi dessecada antes da semeadura da cultura do feijoeiro, em 16 de dezembro de 2002.

Foram utilizados três experimentos, com delineamento experimental em blocos ao acaso, e cada um contava com três tratamentos e quatro repetições. Os experimentos simularam condições extremas impostas pelo manejo do solo, quando trafegado intensamente em sistema plantio direto. Criou-se, assim, uma condição ambiental em que a estrutura do solo, associada à dinâmica da água, permitisse ampla variação da qualidade física, refletindo no desempenho produtivo da cultura.

Em parcelas de 6x7 m, foram aplicados os tratamentos, que se constituíram de três manejos do solo, induzindo diferentes estados de compactação. Os tratamentos foram os seguintes: PD, plantio direto sem compactação adicional; Esc, plantio direto que recebeu escarificação; e PDc, plantio direto sobre compactação adicional de quatro passadas de máquina de 9 Mg. O termo residual de compactação refere-se à aplicação de carga sobre o solo em anos anteriores, ao passo que a compactação adicional refere-se à compactação recente.

No experimento 1 houve comparação de: (1) compactação adicional com máquina de 9 Mg, em dezembro de 2002, sobre residual de compactação aplicada por quatro passadas de máquina de 10 Mg em dezembro de 2001 (PDc); (2) escarificação e gradagem em dezembro de 2002 numa área com residual de compactação adicional de duas passadas de máquina de 10 Mg aplicadas em dezembro 2001 (Esc); (3) compactação residual pelo histórico de 12 anos de manejo em plantio direto (PD).

O experimento 2 consistiu na comparação de: (1) residual de compactação aplicada por quatro passadas de máquina de 10 Mg em dezembro de 2001 (PDc); (2) escarificação e gradagem em dezembro de 2002, numa área com residual de compactação adicional de duas passadas de máquina de 10 Mg, aplicadas em dezembro 2001; (3) compactação residual pelo histórico de 12 anos de manejo em plantio direto (PD).

O experimento 3 consistiu na comparação de: (1) compactação adicional aplicada, por máquina de 9 Mg, em dezembro de 2002 (PDc); (2) escarificação e gradagem em dezembro de 2002 sobre residual histórico

da compactação provocada por 12 anos de manejo em plantio direto (Esc); (3) residual histórico da compactação provocada por 12 anos de manejo em plantio direto (PD).

No momento da aplicação dos tratamentos, a umidade volumétrica do solo foi de 0,24, 0,22, 0,23, 0,25 e 0,22 m³ m⁻³, nas camadas de 0–0,05, 0,05–0,1, 0,1–0,2, 0,2–0,3 e 0,3–0,4 m, respectivamente. A profundidade de trabalho do escarificador ficou próxima aos 0,2 m, nos experimentos 1 e 2, e 0,30 m, no experimento 3. Essa variação ocorreu em virtude de as parcelas escarificadas nos experimentos 1 e 2 terem recebido tráfego adicional em 2001, em experimento realizado por Streck (2003).

O tratamento PD (3) reflete o histórico das tensões sofridas pelo solo em anos anteriores, principalmente pelas operações de semeadura e colheita, criando um estado de compactação residual. O tratamento Esc (2) procurou reduzir a compactação existente por pressões de anos anteriores, criando um estado considerado descompactado imediatamente depois da operação. O tratamento PDc (1) retrata maiores estados de compactação, criando um estado de compactação considerado excessivo.

A máquina utilizada para produzir, no solo, os efeitos da compactação foi uma pá-carregadeira, marca Clark – Michigan 75III, com massa total de 9,046 Mg. Os pneus eram Pirelli, PN 14 G2/L2, 13.00-24 10PR, com 0,33 m de largura e 1,05 m de diâmetro, radiais com garradeiras desgastadas pelo uso, evitando o cisalhamento superficial. O tráfego foi realizado por toda a parcela, de forma que os pneus comprimissem áreas paralelas entre si, e as passadas foram sobrepostas às anteriores, de forma que toda a área fosse igualmente trafegada.

A escarificação foi realizada com escarificador de quatro hastes parabólicas, com espaços de 0,4 m e equipadas com ponteiros estreitos. A gradagem foi realizada logo depois da escarificação, utilizando-se uma grade em “V”, de 28 discos lisos. A semeadura da cultura foi realizada com semeadora de arraste com cinco linhas, equipada com disco duplo desencontrados, da marca Sfil, modelo PSMT 5311-A. Em todas as operações, usou-se um trator MF 275.

A fim de avaliar a densidade e a porosidade, foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada em cilindros metálicos com 0,0536 m de diâmetro e 0,03 m de altura, nas camadas de 0–0,05, 0,05–0,10, 0,10–0,15, 0,15–0,20, 0,20–0,30 e 0,30–0,40 m.

As determinações foram realizadas, seguindo métodos descritos em Oliveira (1968) e Embrapa (1979). Essas amostragens foram realizadas no final do ciclo da cultura (fevereiro de 2003).

A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada com penetrômetro de taxa constante de penetração, com armazenamento eletrônico de dados, dotado de ponta cônica, com ângulo de penetração de 30°, e 12,83 mm de diâmetro da base. As leituras foram realizadas a cada 0,015 m de profundidade. Em todas as situações, a resistência à penetração foi determinada até a profundidade de 0,55 m, em diferentes estádios de desenvolvimento das plantas e em diferentes condições de umidade, para medida real, no campo, ao longo do ciclo da cultura.

Simultaneamente à determinação da resistência à penetração, realizou-se a determinação da umidade do solo, com o uso de um TDR (Time Domain Reflectometry) TRASE da Soil Moisture. Os sensores do TDR foram inseridos no solo na direção da linha de semeadura, com inclinação que integrasse uma área, de acordo com as camadas de 0–0,06, 0,06–0,12, 0,12–0,24 e 0,24–0,48 m de profundidade, onde se desenvolve o sistema radicular. Esses sensores permaneceram nas parcelas durante todo o ciclo da cultura, permitindo avaliar a flutuação da umidade do solo ao longo do tempo.

Para estimar o intervalo hídrico ótimo (IHO), foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada, com amostrador de solo tipo Uhland, em cilindros metálicos com volume de 331,34 cm³, na camada de 0–0,20 m de profundidade, em diferentes condições de umidade e densidade do solo. A amplitude de variação da densidade foi atingida pela estratégia, na coleta das amostras, as quais totalizaram 206 anéis, extraídos dos mais variados locais, dentro e à margem das parcelas experimentais – pontos do terreno que estavam sob influência dos tratamentos aplicados. A variação da umidade foi obtida pela variação temporal na coleta de amostras do solo com anéis, com amplitude de umidade nas condições de campo. Em todas as amostragens, os cilindros metálicos foram armazenados individualmente e colocados em caixas hermeticamente fechadas para o transporte até o laboratório. No laboratório, depois do preparo de rotina, foram imediatamente submetidas ao ensaio de penetração mecânica, empregando o penetrômetro de taxa constante de penetração, para obtenção da resistência do solo à penetração na umidade em que se encontravam.

Depois da determinação da resistência à penetração (RP), as amostras foram pesadas e colocadas em estufa a 105°C por 24 horas, para a determinação da umidade gravimétrica (Ug) e cálculo da densidade do solo (Ds). Com essas avaliações, ajustou-se a resistência à penetração (RP, MPa) em relação à umidade volumétrica (θ , m³ m⁻³) e densidade do solo (Ds, Mg m⁻³), utilizando-se o modelo não-linear proposto por Busscher (1990), expresso na equação 1, empregando o SAS (SAS Institute, 1998).

$$RP = 0,02499 \times \theta^{-1,0896} \times Ds^{4,9261} \quad (1)$$

O IHO foi determinado conforme método proposto por Silva et al. (1994) com modificações: o limite inferior do IHO considerado foi a umidade do solo em que a resistência à penetração atingisse 2 MPa (θ_{RP}) ou a umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}); o limite superior do IHO considerado foi a umidade do solo com porosidade de aeração de 0,10 m³ m⁻³ ($\theta_{A10\%}$) ou umidade do solo na capacidade de campo (θ_{CC}).

O ponto de murcha permanente foi determinado pelo método fisiológico (Embrapa, 1979), em dois experimentos, em 2002 e 2003. Foram extraídas amostras de solo de vários pontos dentro das parcelas experimentais, na camada de 0–0,2 m. O solo, depois de destorroado e homogeneizado, foi colocado em vasos com volume de 921,6 mL, num total de 25 repetições para três espécies vegetais: feijão, soja e girassol.

A média da umidade gravimétrica no ponto de murcha permanente para o feijoeiro, na camada de 0–0,20 m do Argissolo, foi de 0,051 kg kg⁻¹. Esse valor de umidade gravimétrica foi transformado em umidade volumétrica, de acordo com a densidade do solo, para indicar o ponto de murcha permanente no cálculo do IHO.

A capacidade de campo foi obtida pelo método do perfil instantâneo (Hillel et al., 1972), nas parcelas dos experimentos. A umidade do solo foi monitorada pelo método da reflectância de domínio do tempo, usando um TDR 100, conectado por cabo co-axial de 50 ohms a quatro sensores de duas hastes metálicas por parcela, instaladas até a profundidade de 0,48 m. Os dados foram armazenados em um CR10X, conectado ao TDR100 e a multiplexadores, obtendo-se medidas simultâneas de 48 sensores (12 parcelas), em cada experimento.

Os locais em que estavam instalados os sensores foram inundados com o auxílio de um anteparo físico de forma circular, construído em PVC rígido, disposto no entorno de cada ponto de observação, com a base enterrada 0,20 m no solo, para impedir os movimentos laterais de água, permitindo colocar uma lâmina de

300 mm de água por parcela, que saturou o solo até aproximadamente 0,60 m de profundidade. No momento em que a lâmina de água infiltrou totalmente, considerado como tempo zero, as coletas de dados de umidade foram iniciadas. As determinações foram simultâneas, a cada 5 min, e realizadas até 96 horas do tempo zero.

Considerou-se como valor de umidade correspondente à capacidade de campo, medida no campo, o valor ajustado na curva descendente de umidade com o tempo em que a drenagem praticamente cessava e, portanto, a umidade se aproximava de uma constante. Os valores de umidade volumétrica correspondentes à capacidade de campo (θ_{CC}) e de densidade do solo (D_s) de cada parcela foram ajustados ao modelo linear, gerando a equação $\theta_{CC} = 0,1387 + 0,0492 D_s$. Essa equação foi usada para determinar o valor da umidade na capacidade de campo na obtenção do IHO.

O TDR usado foi calibrado de acordo com o Argissolo em estudo, ajustando-se uma função, conforme Topp et al. (1980), com a qual se obteve a umidade volumétrica (θ) corrigida para o solo estudado.

Nos três experimentos, foi implantada a cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L. cv. FT Bio nobre), em 16 de dezembro de 2002, usando uma densidade de semeadura de 250 mil sementes por hectare em um espaçamento de 45 cm entre linhas. A adubação de base seguiu a recomendação da Comissão de Fertilidade do Solo, Núcleo Regional Sul (Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1995). Os demais tratamentos culturais constituíram-se na aplicação de herbicida pós-emergente para o controle das plantas daninhas, aplicação preventiva de fungicida contra a antracnose do feijoeiro e uma capina manual, para controle das plantas daninhas, no final do ciclo.

Quando a cultura se encontrava em plena floração, realizou-se a avaliação do desenvolvimento e da distribuição do sistema radicular nos diferentes tratamentos, por meio do método do perfil proposto por Böhm (1979). Na maturação fisiológica, avaliou-se a produtividade, colhendo-se uma área útil de 3x2 m na parte central das unidades experimentais e corrigindo-se a umidade dos grãos para 13%.

A análise de variância das médias entre os distintos manejos de solo foi realizada pelo teste F e, na comparação de médias, usou-se a diferença mínima significativa (DMS), com probabilidade de erro de 5%, utilizando o SAS (Institute SAS, 1998).

Resultados e Discussão

A capacidade de campo (θ_{cc}) e o ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) aumentaram com o aumento da densidade do solo, pois em valores mais elevados de densidade ocorre redistribuição dos tamanhos de poros, com redução da macroporosidade e aumento da microporosidade do solo. Esse processo deve ocorrer até que os valores de microporosidade alcancem valores próximos à porosidade total. Entretanto, o aumento da umidade com a compactação foi pequeno, cerca de $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para cada unidade de incremento de densidade. O contrário foi observado na porosidade de aeração ($\theta_{AR10\%}$), em que ocorreu redução progressiva com o aumento da densidade do solo.

A umidade do solo correspondente a 2 MPa de RP aumentou progressivamente com o aumento da densidade do solo, indicando que a RP foi a responsável pelo limite inferior do IHO para densidades do solo acima de $1,38 \text{ Mg m}^{-3}$. O limite superior do IHO foi a capacidade de campo, similarmente ao observado por Tormena et al. (1999), em Latossolo Roxo. O IHO sofreu redução progressiva com o aumento da densidade, até se tornar nulo, na densidade de $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$ (Figura 1), implicando altos riscos na produtividade das culturas agrícolas exigentes em aeração do solo e suscetíveis à resistência do solo à penetração.

A densidade do solo elevou-se a partir dos 0,05 m de profundidade, atingindo valores acima do limite crítico estabelecido no IHO, principalmente no PDc (Figura 2). A densidade máxima ($1,93 \text{ Mg m}^{-3}$) foi verificada no experimento 1 para o PDc, na camada dos 0,17 m, o que mostra que ocorreu transmissão das pressões impostas pelo tráfego às camadas mais profundas.

Nos experimentos 2 e 3, o PDc alcançou valores máximos de densidade aos 0,12 m de profundidade. O PD apresentou a maior densidade aos 0,075 m, o que corrobora resultados encontrados por Silva (2003) e Streck et al. (2004), mostrando que a maior compactação no PD ocorre na profundidade próxima aos 0,10 m. Quanto ao Esc, a densidade foi máxima aos 0,12 m, no experimento 2, e aos 0,17 m, nos experimentos 1 e 3. Dessa forma, os efeitos da escarificação atingiram menor profundidade no experimento 2, em que o estado de compactação era maior em virtude do tráfego de máquinas, no ano anterior (2001), ao passo que, no experimento 3, a escarificação foi sobre a área que estava sob plantio direto há 12 anos.

No experimento 1, o IHO no PD variou de $0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, na menor densidade ($1,53 \text{ Mg m}^{-3}$), até zero, na maior densidade ($1,76 \text{ Mg m}^{-3}$). No Esc, os valores do IHO variaram de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na menor densidade ($1,51 \text{ Mg m}^{-3}$) até $0,01 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na densidade de $1,74 \text{ Mg m}^{-3}$, sem alcançar a densidade crítica. No PDc ocorreram as maiores restrições a partir dos $0,05 \text{ m}$ de profundidade, onde o IHO foi zero. Apenas a camada superficial com densidade de $1,42 \text{ Mg m}^{-3}$ apresentou IHO positivo ($0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

No experimento 2, o PD atingiu a densidade crítica nas camadas de $0,05\text{--}0,10 \text{ m}$ e $0,15\text{--}0,2 \text{ m}$, onde o IHO foi nulo. O maior valor do IHO foi de $0,13 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ nos primeiros $0,05 \text{ m}$, onde a densidade foi de $1,38 \text{ Mg m}^{-3}$. O Esc atingiu um IHO máximo de $0,09 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na densidade de $1,54 \text{ Mg m}^{-3}$ e foi nulo nas camadas de $0,1\text{--}0,15 \text{ m}$ ($1,81 \text{ Mg m}^{-3}$) e de $0,2\text{--}0,25 \text{ m}$ ($1,80 \text{ Mg m}^{-3}$). O PDc apresentou IHO máximo de $0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na camada superficial, sendo nulo a partir dos $0,05 \text{ m}$ de profundidade. No PD, a densidade

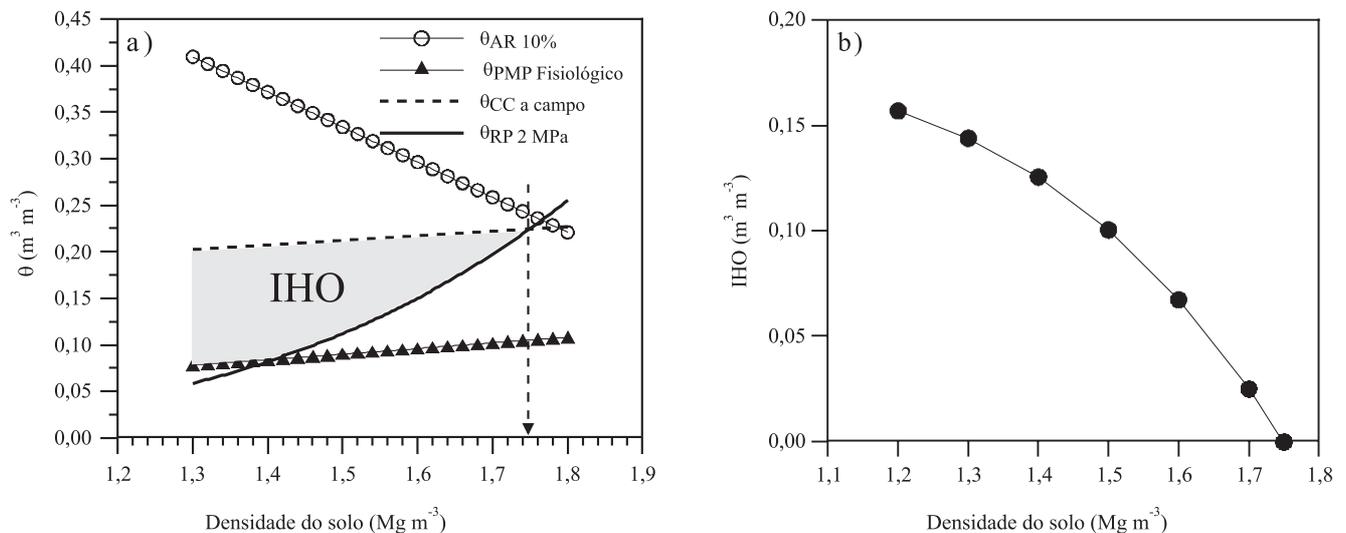


Figura 1. Variação da umidade do solo e da densidade do solo, com reflexo nos níveis críticos da porosidade de aeração ($\theta_{AR10\%}$), resistência do solo à penetração (θ_{RP}), capacidade de campo (θ_{CC}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) para o Argissolo Vermelho distrófico. A área hachurada representa o intervalo hídrico ótimo (IHO) (a). Variação do intervalo hídrico ótimo (IHO) de acordo com a densidade do solo (b).

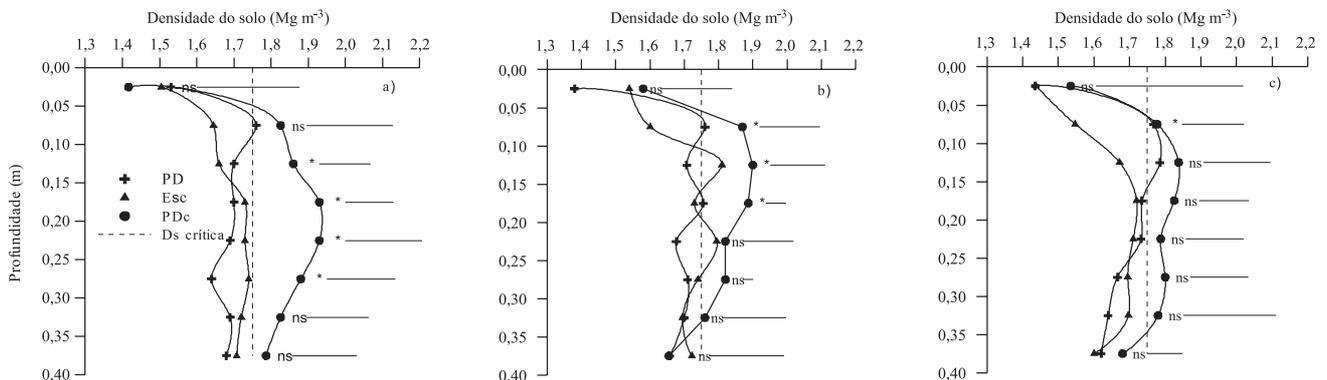


Figura 2. Densidade do solo para os experimentos 1 (a), 2 (b) e 3 (c). PD, plantio direto sem compactação adicional; Esc, escarificado; PDc, plantio direto com compactação adicional por quatro passadas de máquina sobre compactação residual do ano anterior. As linhas horizontais indicam a diferença mínima significativa a 5% de probabilidade pelo teste DMS, e comparam médias dos tratamentos em cada camada. nsNão-significativo. *Significativo.

do solo variou de 1,53 a 1,76 Mg m⁻³ e o IHO variou de 0,09 m³ m⁻³ até zero.

No experimento 3, o PD alcançou a densidade crítica nas camadas de 0,05–0,15 m, onde o IHO foi nulo. O maior valor do IHO foi de 0,12 m³ m⁻³ nos primeiros 0,05 m, onde a densidade foi de 1,43 Mg m⁻³. O Esc atingiu IHO máximo de 0,12 m³ m⁻³ na densidade de 1,44 Mg m⁻³ e o menor IHO foi de 0,02 m³ m⁻³ na densidade de 1,72 Mg m⁻³. O PDc apresentou IHO máximo de 0,09 m³ m⁻³ na camada superficial, sendo nulo a partir dos 0,05 m de profundidade.

O PDc apresentou a maior frequência de densidades superiores a 1,75 Mg m⁻³, indicando que as maiores restrições, decorrentes da aeração (Figura 3) e da resistência do solo, estiveram associadas a esse tratamento. Culturas produzidas em solos com pequeno IHO são mais vulneráveis à redução de produtividade por falta ou excesso de água do que solo com maior valor de IHO. Nos três tratamentos, a densidade alcançou valores superiores a 1,75 Mg m⁻³ e, nesse valor, o IHO é nulo, e, por essa razão, a densidade do solo passou a limitar o desenvolvimento e crescimento do feijoeiro, restringindo a disponibilidade hídrica às plantas.

A porosidade de aeração do solo, representada pela macroporosidade, foi maior na camada superficial do solo em ambos os tratamentos (Figura 3). No PDc e no PD, a porosidade de aeração esteve abaixo de 0,1 m³ m⁻³, considerada como crítica para as plantas (Grable & Siemer, 1968), a partir dos 0,05 m de profundidade, em que a densidade do solo foi maior (Figura 2). A escarificação do solo (Esc) aumentou a porosidade

de aeração até os 0,10 m, nos experimentos 1 e 2, e até 0,2 m, no experimento 3, seguindo-se o comportamento da densidade do solo.

Esse comportamento diferenciado da escarificação na redução da densidade e aumento da porosidade de aeração, entre os experimentos 1 e 2 em relação ao 3, pode estar relacionado ao estado de compactação inicial do solo. Isso se justifica, pois os dois primeiros experimentos apresentavam elevado estado de compactação, imposto por duas passadas de máquina de 10 Mg (Streck, 2003) e, dessa forma, a escarificação não conseguiu reduzir a compactação e manter essa condição durante o ciclo do feijoeiro.

Os resultados de densidade e porosidade do solo permitem inferir sobre o estado de compactação e indicam estratégias de manejo do solo que minimizam os efeitos negativos da compactação. As variações na umidade do solo estão ligadas aos níveis de compactação impostos e aos ciclos de umedecimento e secagem, conseqüentes das precipitações e estiagens.

Considerando-se que θ_{CC} e $\theta_{AER10\%}$ sejam os limites superiores e θ_{RP} e θ_{PMP} , os limites inferiores, estabeleceu-se, para cada tratamento, a umidade limitante, ilustrada paralelamente ao eixo da abscissa. Dessa forma, foi possível observar, em cada tratamento e em cada camada, as limitações de umidade experimentadas pelas plantas durante o ciclo do feijoeiro. Essa estratégia permite observar o número de dias que o tratamento impôs restrições às plantas, avaliadas pelo método IHO.

Em todos os experimentos, o PDc foi o que manifestou as maiores restrições ao crescimento das plantas por

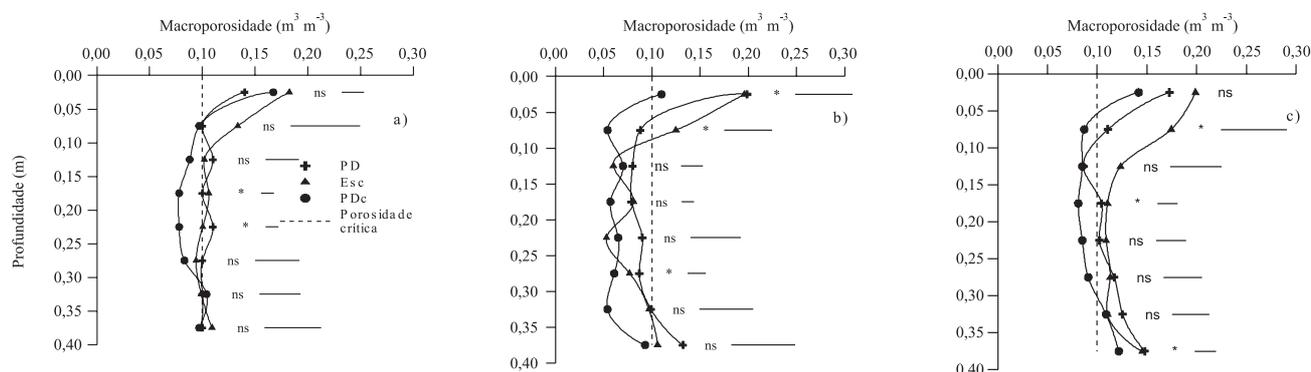


Figura 3. Macroporosidade do solo para os experimentos 1 (a), 2 (b) e 3 (c). PD, plantio direto sem compactação adicional; Esc, escarificado; PDc, plantio direto com compactação adicional por quatro passadas de máquina sobre compactação residual do ano anterior. As linhas horizontais indicam a diferença mínima significativa a 5% de probabilidade pelo teste DMS, e comparam médias dos tratamentos em cada camada. ^{ns}Não-significativo. *Significativo.

apresentar uma faixa hídrica mais estreita, devido aos níveis de compactação atingidos (Figura 4). O PD registrou as melhores condições de umidade durante o ciclo da cultura, e apenas as camadas superficiais do solo estavam fora dos limites em alguns períodos. Quanto ao solo escarificado nos experimentos 1 e 2, ocorreram períodos em que a umidade ficou fora dos limites; no entanto, por apresentar menor densidade (Figura 2) e menor resistência à

penetração, as plantas tiveram melhores condições de crescimento e desenvolvimento (Figura 4).

Pela variação de umidade observada, pode-se afirmar que a escarificação nos experimentos 1 e 2 foi menos eficiente, considerando-se que a faixa limitante foi mais estreita, situada entre 0,16 e 0,22 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e 0,19 e 0,22 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, ao passo que a escarificação no experimento 3 foi mais eficaz, mantendo uma faixa mais ampliada, entre 0,14 e

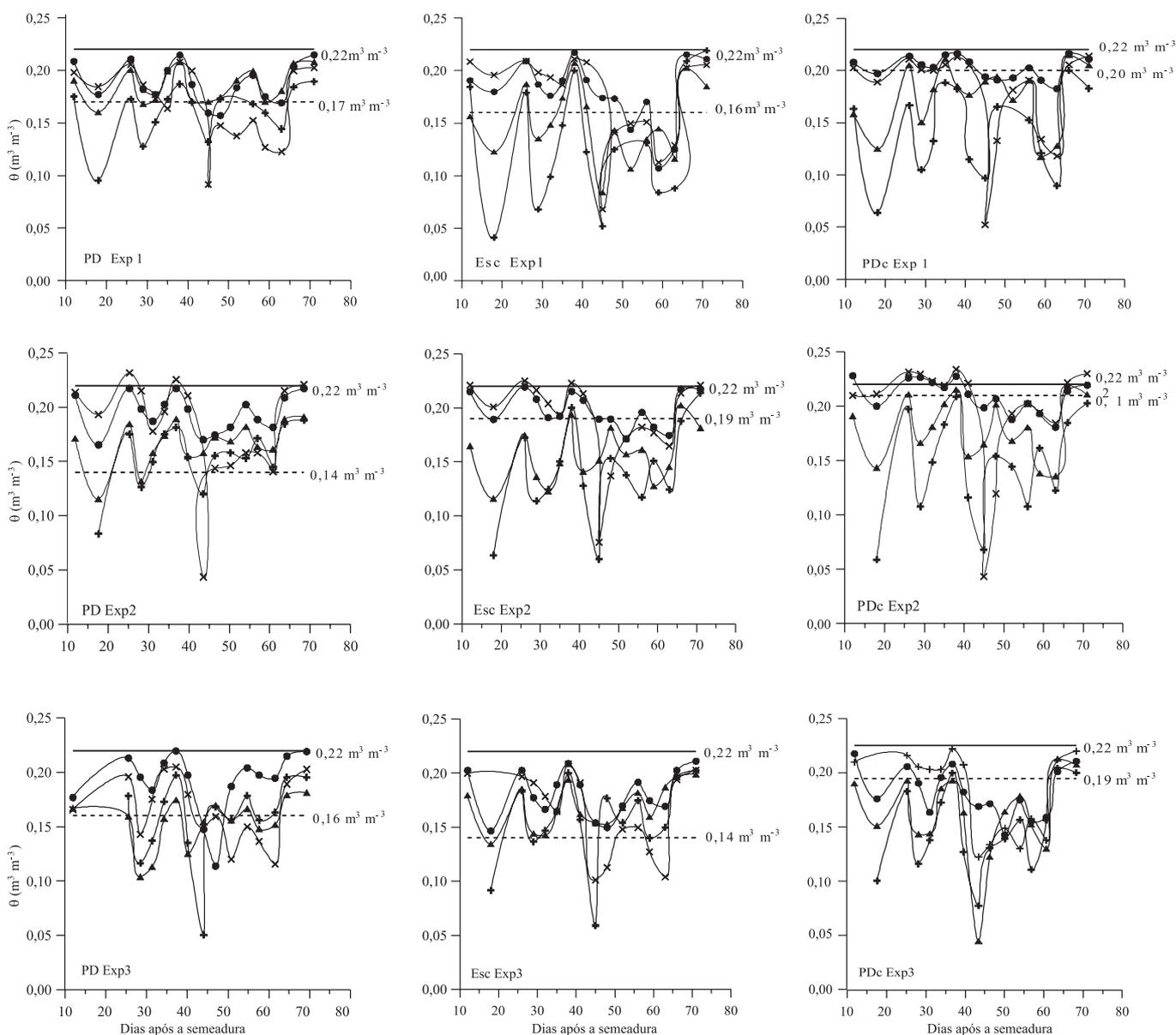


Figura 4. Umidade volumétrica do solo ($\theta \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), limite superior e inferior do IHO para os tratamentos PD, Esc e PDC, nos três experimentos. A linha pontilhada representa o limite inferior e a linha cheia representa o limite superior do IHO. +: 0,00–0,06 m; ▲: 0,06–0,12 m; ●: 0,12–0,24 m; ×: 0,24–0,48 m.

0,22 m³ m⁻³ (Figura 4). Nos experimentos 1 e 3 a escarificação proporcionou as melhores condições físico-hídricas para as plantas, enquanto no experimento 2, o PD foi mais favorável, por apresentar maior intervalo hídrico. Apesar disso, não se observou diferenças visuais na distribuição do sistema radicular do feijoeiro nos tratamentos escarificados (Figura 5), em ambos os experimentos.

A RP foi o fator que mais limitou o crescimento radicular das plantas, com base nos valores medidos diretamente no campo e estimados pela umidade do solo. Nos períodos com maior umidade do solo, apenas o PDc apresentou valores de RP superiores a 2MPa. O maior incremento na RP ocorreu a partir dos 0,05 m de profundidade (Figura 6), em ambos os tratamentos, em que a densidade do solo mostrou-se mais elevada e a umidade do solo mais variável. Os maiores valores de

RP foram atingidos no período em que a umidade do solo esteve abaixo do limite crítico estabelecido com o IHO. Esse período mais restritivo ocorreu a partir do início da floração da cultura (43 dias após a semeadura), fase de maior crescimento radicular da cultura e alta exigência de água (Massignam et al., 1998) e nutrientes.

A escarificação do solo mostrou-se mais eficiente em reduzir a compactação do solo até os 0,20 m de profundidade, no experimento 3, quando foi realizada numa área cultivada sob plantio direto há 12 anos. Nos experimentos 1 e 2, a RP no PD e no Esc foi semelhante, indicando que, nas áreas que apresentam alta compactação, o rompimento das camadas compactadas é menos eficiente, o que pode facilitar a reconsolidação do solo. O plantio direto com

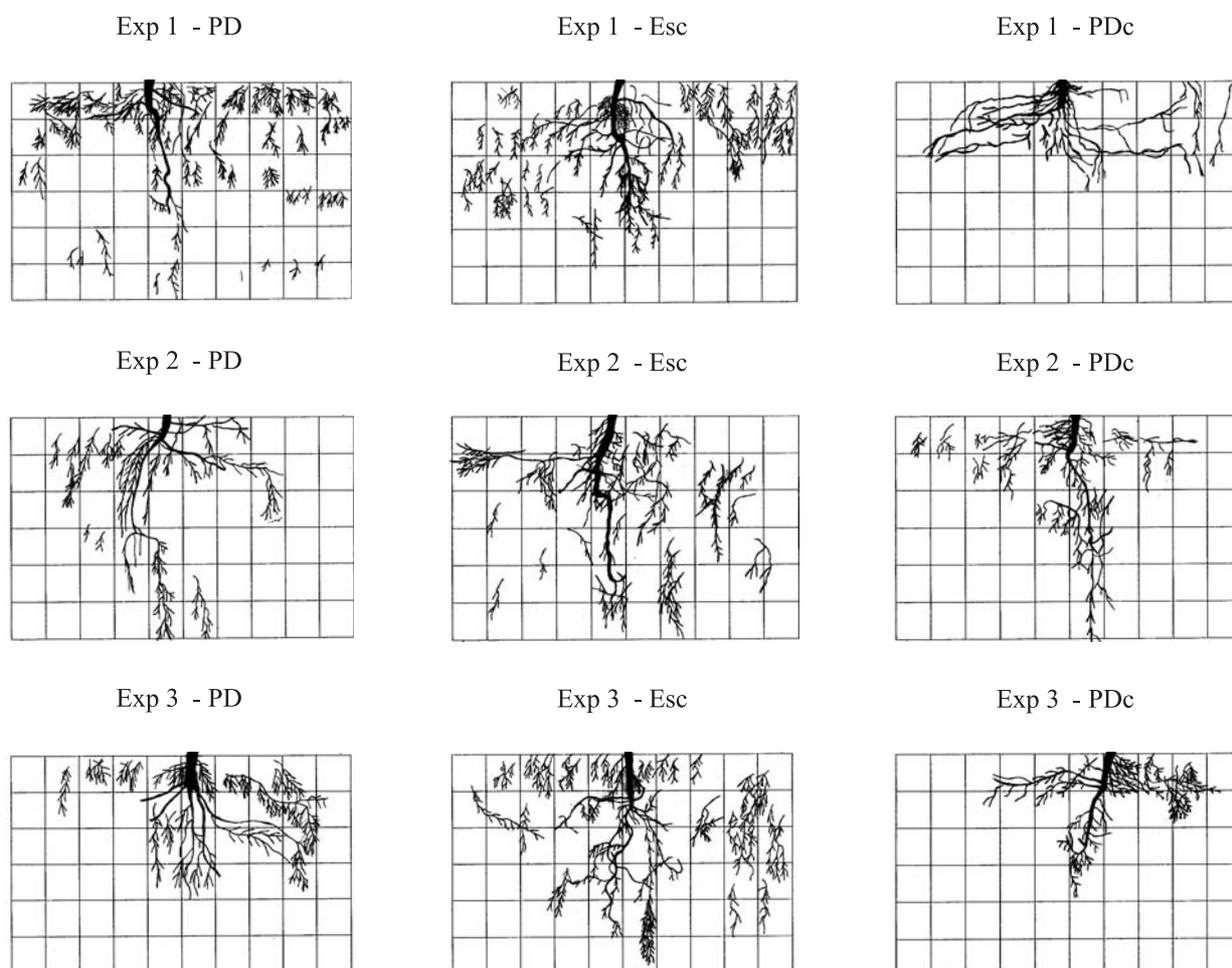


Figura 5. Distribuição radicular da cultura do feijoeiro no perfil (50x30 cm) para os tratamentos plantio direto sem compactação adicional (PD), escarificado (Esc) e plantio direto sobre área compactada (PDc) por quatro passadas de máquina.

compactação adicional (PDC) apresentou os maiores valores de RP em todas as camadas avaliadas.

Nos períodos em que a umidade do solo estava dentro do IHO (acima do limite inferior e abaixo do limite superior), os valores de RP foram menores (Figura 6), e apenas o plantio direto com compactação adicional (PDC) apresentou valores de RP superiores a 2 MPa, considerado valor crítico no desenvolvimento da maioria das culturas (Taylor et al., 1966).

A medição direta da RP, por meio de penetrômetro de campo, indicou a mesma tendência da mostrada pelos valores do IHO, revelando a utilidade de medições da RP, não somente em valores de umidade do solo próximos à capacidade de campo, mas também em toda a amplitude de umidade do IHO. As diferenças de RP entre os estados de compactação do solo são observadas claramente à medida que o solo vai secando.

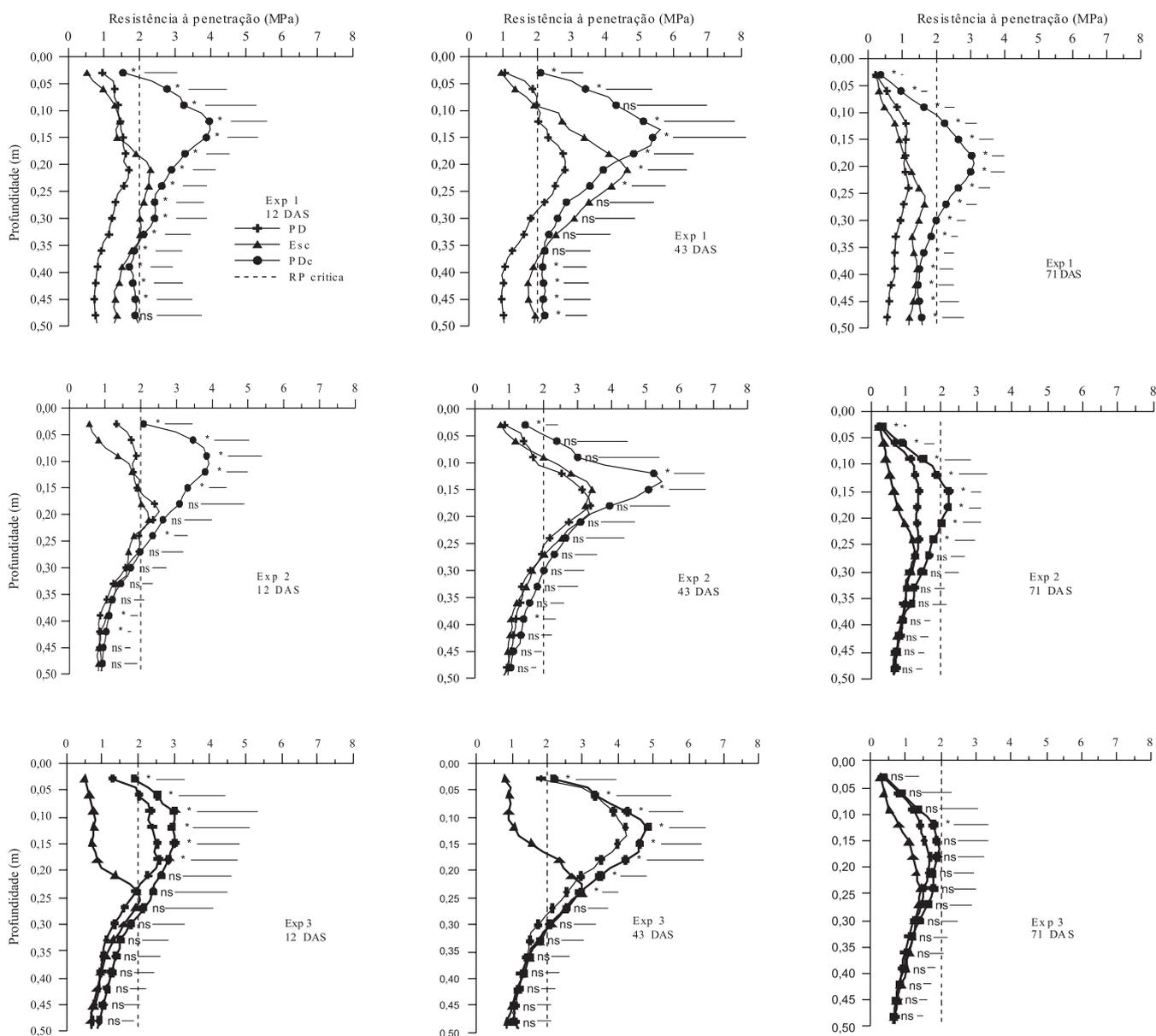


Figura 6. Resistência do solo à penetração em profundidade aos 12, 43 e 71 dias após a semeadura (DAS), para os tratamentos PD, Esc e PDC, nos três experimentos. As linhas horizontais indicam a diferença mínima significativa a 5% de probabilidade pelo teste DMS, e comparam médias dos tratamentos em cada camada. ns Não-significativo. *Significativo.

Em resposta aos períodos de restrição, as plantas tiveram seu desenvolvimento radicular prejudicado. A distribuição do sistema radicular do feijoeiro foi afetada pelos diferentes estados de compactação (Figura 5). No PDc, as raízes principais do feijoeiro concentraram-se na camada superficial. Isso provavelmente correu devido ao período em que a umidade do solo esteve abaixo do limite crítico, o qual aumentou a RP, prejudicando o crescimento de raízes, principalmente a partir dos 43 dias após a semeadura, quando as plantas estavam entrando em florescimento.

Quanto ao PD, sem compactação adicional, apenas com o resíduo de compactação referente a pressões associadas ao manejo do solo das áreas que compõem as parcelas experimentais, o sistema radicular também se concentrou na camada superficial. Entretanto, no campo, observou-se que no PD as raízes conseguiram penetrar em poros do solo, por eles serem maiores e contínuos. Em contrapartida, no PDc, as raízes cresceram entre as fissuras dos pontos de fratura dos agregados e também se concentraram na linha de semeadura, em que o mecanismo sulcador da semeadora rompeu a camada compactada superficial, e ficaram confinadas nesses locais, limitando o acesso à água e nutrientes, o que refletiu em menor produtividade (Tabela 1).

No Esc, ocorreu melhor crescimento e distribuição do sistema radicular, possibilitando melhor acesso à água e nutriente. Dessa forma, as raízes do feijoeiro apresentaram crescimento restringido, nas camadas mais compactadas, e a RP do solo foi o fator mais restritivo ao crescimento radicular, principalmente nas camadas mais densas e nos períodos mais secos.

Apesar de a análise da distribuição radicular no perfil ser um método qualitativo, possui grande utilidade na avaliação e identificação de camadas de impedimento mecânico ao crescimento radicular em condições de campo.

Em resposta às restrições experimentadas pelas plantas à penetração radicular e diminuição no acesso à água e aos nutrientes, as plantas tiveram menor desenvolvimento da parte aérea, com queda significativa de produtividade nos tratamentos que receberam compactação adicional causada pelo tráfego (Tabela 1). No experimento 1, a produtividade do Esc foi 12% menor e a do PDc foi 62% menor que no PD. No experimento 2, a produtividade do Esc foi 2% menor e a do PDc foi 30% menor que no PD, enquanto no experimento 3 a produtividade do Esc foi 3% maior, e a do PDc foi 56% menor que no PD. Dessa forma, a escarificação não seria necessária para essa área conduzida sob plantio direto há 12 anos; no entanto, deve-se evitar a aplicação de cargas excessivas sobre o solo e assim garantir e manter a qualidade física do solo.

Conclusões

1. O valor da densidade crítica baseada no IHO é de $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$, semelhante aos valores de densidade do solo na camada de 0,10 a 0,20 m, nos tratamentos com menores produtividades.
2. A escarificação reduz a compactação superficial do solo e permite melhor desenvolvimento e distribuição radicular, mas não afeta significativamente a produtividade da cultura em relação ao plantio direto e histórico da área.
3. O IHO tem decréscimo acentuado com a compactação do solo até o valor crítico e a umidade do solo, nos tratamentos mais compactados, permanece fora da faixa ótima por longo período do ciclo do feijoeiro, implicando menor produtividade.
4. A resistência à penetração é o fator que mais afeta o crescimento radicular das plantas e, por consequência, a produtividade do feijoeiro.

Agradecimentos

Ao CNPq, à Capes e à Fapergs, pelo financiamento parcial do trabalho.

Referências

- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p.105-112, 1997.
- BÖHM, W. **Methods of studying root systems**. Berlin: Springer-Verlag, 1979. 190p.

Tabela 1. Produtividade da cultura do feijoeiro de acordo com três estados de compactação do solo⁽¹⁾.

Tratamento ⁽²⁾	Produtividade (kg ha^{-1})		
	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
PD	1.484,5a	1.535,2a	1.401,2a
Esc	1.306,3a	1.502,3a	1.438,7a
PDc	566,5b	1.084,1a	618,2b

⁽¹⁾Médias na coluna seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ⁽²⁾PD, plantio direto sem compactação adicional; Esc, escarificado; PDc, plantio direto com compactação adicional.

- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat: tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, v.33, p.519-524, 1990.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro, 1979. Paginação irregular.
- GENRO JUNIOR, S.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.477-484, 2004.
- GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density aggregate size and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Journal**, v.32, p.18-186, 1968.
- HILLEL, D.; KRENTOS, V.; STYLINOY, Y. Procedures and test of internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. **Soil Science**, v.114, p.395-400, 1972.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, v.1, p.277-294, 1985.
- MASSIGNAM, A.M.; VIEIRA, H.J.; HEMP, S.; DITTRICH, R.C.; FLESCHE, R.D.; VICTORIA, F.B. Ecofisiologia do feijoeiro. I. Determinação do período mais crítico à deficiência hídrica do solo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.6, p.35-39, 1998.
- OLIVEIRA, L.B. Determinação da macro e microporosidade pela mesa de tensão em amostras de solo com estrutura indeformada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.3, p.197-200, 1968.
- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, v.27, p.29-48, 2003.
- SAS INSTITUTE (Cary, Estados Unidos). **SAS/STAT: procedure guide for personal computers**. Version 5. Cary, 1998. 1042p.
- SEGANFREDO, M.L.; ELTS, F.L.F.; BRUM, A.C.R. Perdas de solo e água e nutrientes por erosão em sistemas de culturas em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p.287-291, 1997.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1775-1781, 1994.
- SILVA, V.R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. 160p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. Comissão de Fertilidade do Solo. Núcleo Regional Sul. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 3.ed. Passo Fundo, 1995. 223p.
- STRECK, C.A. **Compactação do solo e seus efeitos no desenvolvimento e produtividade do feijoeiro e da soja**. 2003. 105p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- 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. **Ciência Rural**, v.34, p.755-760, 2004.
- TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER, J.J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, v.102, p.18-22, 1966.
- TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, v.16, p.571-582, 1980.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. da; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.573-581, 1998.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. da; LIBARDI, P.L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage system using the least limiting water range approach. **Soil and Tillage Research**, v.52, p.223-232, 1999.

Recebido em 22 de dezembro de 2005 e aprovado em 10 de julho de 2006