



Revista de Biologia e Ciências da Terra

ISSN: 1519-5228

revbiocieter@yahoo.com.br

Universidade Estadual da Paraíba

Brasil

Beutler, Amauri Nelson; Freddi Silva, Onã da; Leone Duarte, Cristian; Centurion, José Frederico
Densidade do solo relativa e parâmetro S como indicadores da qualidade física para culturas anuais

Revista de Biologia e Ciências da Terra, vol. 8, núm. 2, 2008, pp. 27-36

Universidade Estadual da Paraíba

Paraíba, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=50080204>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal

Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

Densidade do solo relativa e parâmetro "S" como indicadores da qualidade física para culturas anuais

Amauri Nelson Beutler¹, Onã da Silva Freddi², Cristian Luarte Leone³, José Frederico Centurion⁴

RESUMO

Este estudo teve o objetivo de avaliar a densidade do solo relativa (Dsr) e o parâmetro "S" como indicadores da qualidade física para soja, milho e amendoim, em Latossolo Vermelho. Os tratamentos de compactação foram: T₀ = sem compactação; T_{1*} = 1 passada de trator de 4 Mg; T₁ = 1; T₂ = 2; T₄ = 4 e T₆ = 6 passadas, no mesmo local, de um trator de 11 Mg. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado (seis níveis de compactação), com quatro repetições. As culturas foram: soja cultivares IAC Foscarin 31 e MG/BR 46 (conquista); milho híbrido Master; e amendoim cultivares IAC 886 e IAC tatu st. Para determinação dos atributos físicos do solo foram coletadas amostras nas camadas de 0,03-0,06; 0,08-0,11 e 0,15-0,18 m. Nas culturas avaliou-se a produtividade. A Dsr foi um parâmetro adequado na avaliação da qualidade física do solo, com valores de 0,79 e 0,81 a partir dos quais a produtividade de soja e milho decresceu. O parâmetro "S" apresentou valores de 0,056 a 0,062 como limitantes à produtividade de soja e milho. O amendoim apresentou decréscimo linear da produtividade em função da compactação.

Palavras-chave: compactação, Latossolo, produtividade, *Glycine max*, *Zea mays*, *Arachis hypogaea*.

Relative bulk density and parameter "S" as soil physical quality indicators for annual crops

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the relative bulk density (Dsr) and parameter "S" as indicators of soil physical quality for soybean, maize and peanut, in an Oxisol. The compaction treatments were: T₀ = without traffic, T_{1*} = traffic of a 4 Mg tractor; T₁ = one, T₂ = two; T₄ = four and T₆ = six passes, in the same place, of an 11 Mg tractor, side by side. The experimental design was completely randomized (six compaction levels), with four replications. The crops were: soybean cv. IAC Foscarin 31 and MG/BR 46 (conquista); hybrid corn Master; and peanut cv. IAC 886 and IAC tatu st. For determination of soil physical attributes were collected samples from 0.03-0.06, 0.08-0.11 and 0.15-0.18 m layers. It was evaluated crop yield for all treatments used. The Dsr was an adequate parameter to evaluate the soil physical quality, with values of 0.79 and 0.81 from which the yield of soybean and corn decreased. The parameter "S" presented values of 0.062 to 0.056 as yield limiting for soybean and corn. The peanut presented linear yield decrease in function of soil compaction.

Keywords: soil compaction, Oxisol, yield, *Glycine max*, *Zea mays*, *Arachis hypogaea*.

1 INTRODUÇÃO

Soja e milho são as principais culturas de grãos do Brasil. Quanto ao amendoim, este é intensamente cultivado no Estado de São Paulo (Agriannual, 2005). Para o sucesso no cultivo dessas culturas, a qualidade física do solo é um componente importante para maximizar a produtividade, manter a sustentabilidade e conservar o meio ambiente.

A qualidade física do solo é diminuída quando ocorre à compactação por causa da pressão exercida por forças externas, principalmente o tráfego de máquinas e equipamentos. Isso resulta no decréscimo do volume total de poros destacadamente os de maior diâmetro, da infiltração e drenagem da água, da aeração e, aumento da coesão do solo e da resistência à penetração das raízes das plantas, diminuindo seu desenvolvimento e produtividade (Katou et al., 1987). Souza et al. (2008) verificaram redução do crescimento de milho em solos compactados.

Para avaliar a compactação do solo são utilizados alguns atributos físicos como a porosidade, resistência à penetração (RP) e densidade do solo (Ds). Porém, esses atributos variam muito de solo para solo dificultando o estabelecimento de valores limitantes similares para todos os tipos de solo. Por exemplo, para um mesmo valor de Ds um solo argiloso pode estar muito compactado, enquanto para outro tipo de solo com textura mais grosseira, esse valor pode indicar solo extremamente solto.

Visando estabelecer um valor limitante de compactação à produtividade das culturas e, que seja similar para todos os solos minerais, estabeleceu-se o grau de compactação ou estado de compactação do solo, quantificado pela densidade do solo relativa (Dsr). Esse atributo consiste no estabelecimento de uma relação entre Ds atual no campo com uma Ds referência (Ds máxima) (Carter, 1990; Håkansson, 1990). A Ds referência pode ser determinada por meio do teste de compressão uniaxial, submetido à pressão de 200 kPa, conforme descrito por Håkansson (1990), ou pelo teste de Proctor normal, descrito por Carter (1990). O teste de compressão uniaxial apresenta ótima reprodutibilidade quando comparado ao teste de Proctor, que determina valores um pouco superiores (Håkansson, 1990). Entretanto, o

teste de Proctor é de mais fácil execução e tem menor custo comparado ao consolidômetro utilizado para realizar a compressão uniaxial.

Foi constatado que em solos de clima temperado, a utilização da Dsr e a compressão uniaxial na determinação da Ds referência, que maiores produtividades foram obtidas na Dsr de 0,86, oscilando com as condições climáticas e culturas, sendo os resultados similares para os solos (Arvidsson & Håkansson, 1991). Håkansson (1990) verificou na média de 100 experimentos de campo com cevada em solos com diferentes texturas e conteúdos de matéria orgânica, que a partir da Dsr ótima de 0,87 ocorreu decréscimo de produtividade, variando com a condição de chuva de cada ano. Observou ainda que quando a Dsr atingiu 0,90 ocorreu deficiência de aeração ou excessiva resistência à penetração. Resultados semelhantes também foram obtidos por Lipiec et al. (1991).

Com a utilização do teste de Proctor na obtenção da Ds referência, verifica-se que valores de Dsr acima de 0,86 são considerados elevados e prejudiciais ao desenvolvimento das culturas. Por outro lado, valores inferiores a 0,80 podem afetar negativamente a produtividade de alguns cereais em consequência da redução da capacidade de armazenamento de água por causa da grande quantidade de macroporos em relação à de microporos (Lindstron & Voorhees, 1994). Carter (1990) observou que a produtividade máxima de trigo e cevada esteve associada à Dsr de 0,81 em solo arenoso de clima temperado.

Em clima tropical, no Brasil, utilizando o teste de Proctor para obter a Ds referência, em Latossolo Roxo cultivado dois anos com soja, verificou-se que a partir da Dsr de 0,84 e 0,87, ocorreu decréscimo da produtividade em anos com distribuição irregular da precipitação pluvial, com menores prejuízos em anos chuvosos (Torres & Saraiva, 1999). Beutler et al. (2005) encontraram o valor de Dsr de 0,80 como limitante para soja em Latossolo Vermelho de textura média.

Em casa de vegetação, no Brasil, foram obtidos valores limitantes menores de Dsr, utilizando o teste de Proctor para obter a Ds referência. Beutler et al. (2005) verificaram decréscimo de produtividade de soja a partir da Dsr de 0,75 no Latossolo Vermelho de textura

média e, a partir de 0,84 para um Latossolo Vermelho de textura argilosa, cultivado com conteúdo de água equivalente a retida na capacidade de campo (tensão de 100 hPa), com menores valores no conteúdo de água equivalente a tensão de 500 hPa.

Recentemente, Dexter (2004) sugeriu a utilização do parâmetro “S”, que é definido como a inclinação da curva de retenção de água no ponto de inflexão, para a avaliação da qualidade física do solo para fins agrícolas. Assim, “S” > 0,035 foi estabelecido, utilizando resultados experimentais, como favorável para o crescimento das raízes, e abaixo desse valor restritivo. Ou seja, valores > 0,035 indicam uma adequada distribuição de tamanho de poros e qualidade física do solo, independente do tipo de solo, em clima temperado. Desta forma, fatores que alteram a distribuição do diâmetro dos poros, como o uso e manejo do solo, podem ser avaliados e comparados diretamente por esse parâmetro.

O parâmetro “S” avalia a porosidade estrutural que corresponde aos poros inter-

partículas, fendas, bioporos e poros macroestruturais resultantes do uso e manejo, sendo o maior valor de “S” equivalente a maior inclinação da curva de retenção de água, indicando melhor distribuição de poros e maior quantidade de poros com maior diâmetro (Dexter, 2004).

Este estudo teve o objetivo de avaliar a densidade do solo relativa e o parâmetro “S” como indicadores da qualidade física para soja, milho e amendoim em um Latossolo Vermelho distrófico típico, em função da compactação do solo pelo tráfego de máquinas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi realizado em Jaboticabal, SP (21° 15' 29" S e 48° 16' 53" W; altitude média de 600 m). O clima é caracterizado por temperaturas moderadas com verão quente e chuvoso. A precipitação é apresentada na Figura 1.

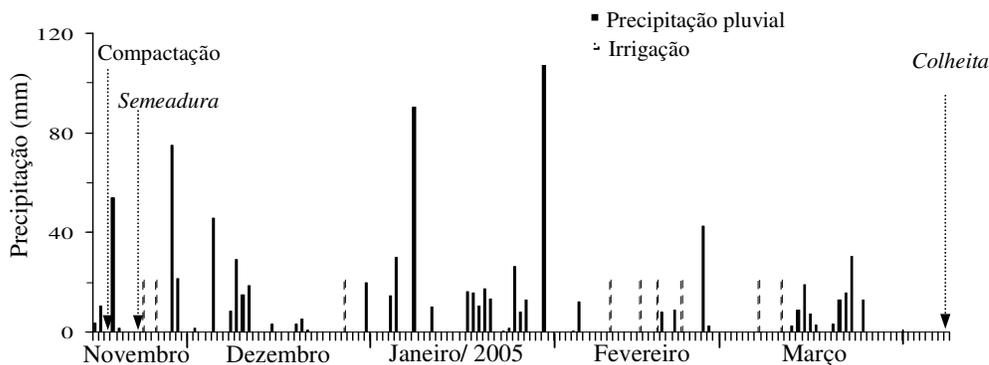


Figura 1 - Precipitação pluvial e irrigação durante o cultivo das culturas anuais.

Os experimentos foram instalados em um Latossolo Vermelho distrófico típico textura média A moderado (LVd) (Embrapa, 2006). A composição granulométrica foi determinada em amostras deformadas por meio da dispersão com NaOH (0,1 mol L⁻¹) e agitação lenta por 16 horas (30 rpm), sendo o conteúdo de argila obtido pelo método da pipeta (Tabela 1).

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com seis tratamentos (compactação) e quatro repetições. Os experimentos foram realizados com soja (*Glycine max*) cultivares IAC Foscarin 31 e MG/BR 46 (conquista), sem e com irrigação;

milho (*Zea mays*) híbrido Master, sem irrigação; e amendoim (*Arachis hypogaea*) cultivares IAC 886 e IAC tatu st., sem irrigação. Foram conduzidos ao todo sete experimentos.

Antes da instalação dos experimentos, em outubro de 2004, foi realizada uma escarificação do solo até 0,30 m de profundidade. Na seqüência, no conteúdo de água no solo próximo a capacidade de campo (100 hPa), foram realizados os tratamentos de compactação: T₀ = sem tráfego; T_{1*} = uma passada de trator de 4 Mg; e, T₁ = uma passada, T₂ = duas passadas, T₄ = quatro passadas e T₆ = seis passadas, no mesmo local, de um trator de

11 Mg com os quatro pneus de mesma largura (0,40 m) e pressão interna, uma ao lado da outra, no sentido do declive da área, perfazendo toda a superfície do solo. O trator de 4 Mg possuía 2 pneus grandes na parte posterior e 2 menores na parte inferior, o qual é utilizado no campo para as operações de cultivo. As parcelas experimentais foram de quatro metros de comprimento e largura de 2,25; 3,60; 3,60 m para soja, milho e amendoim, respectivamente. A área útil constituiu-se de as três linhas centrais de soja e duas de milho e amendoim, respectivamente.

No dia 22 de novembro de 2004 foram semeadas as culturas, com semeadora de plantio direto provida de sulcador e, discos para cobrir a semente, sendo irrigadas duas vezes para possibilitar a germinação. Posteriormente, apenas os tratamentos com soja irrigada

receberam sete irrigações de 20 mm. O espaçamento entre linhas foi de 0,45; 0,90 e 0,90 m para soja, milho e amendoim, com densidades de sementes de 20; 5 e 20 plantas por metro linear, respectivamente. Na semeadura, o solo foi adubado no sulco, segundo recomendações de Rajj et al. (1996).

Após a semeadura, foram coletadas seis amostras indeformadas de solo em cada nível de compactação (cilindros de 0,030 m de altura e 0,048 m de diâmetro com volume de 53,16 cm³), nas camadas de 0,03-0,06; 0,08-0,11 e 0,15-0,18 m. Em cada camada foram coletadas duas subamostras, perfazendo um total de 36 amostras por tratamento, sendo a porosidade e densidade do solo (Ds) determinada pela média das duas subamostras e das três camadas (Tabela 2).

Tabela 1 - Características físicas e químicas do Latossolo Vermelho, na camada de 0,0-0,20 m.

Densidade de partículas (Mg m ⁻³)	Argila	Silte	Areia	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Matéria orgânica (g dm ⁻³)	pH (CaCl ₂)	P _{resina} (mg dm ⁻³)	K	Ca	Mg	Saturação por bases (%)
2,72	330	35	635	54	135	14	5,4	23	2,1	18	16	65

Tabela 2 - Valores médios dos atributos físicos do Latossolo Vermelho em função do tráfego do trator, na camada de 0,0 – 0,20 m.

Atributos físicos	Passadas de trator ^(A)					
	T ₀	T _{1*}	T ₁	T ₂	T ₄	T ₆
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)	0,22	0,09	0,07	0,07	0,06	0,05
Microporosidade (m ³ m ⁻³)	0,27	0,29	0,30	0,29	0,29	0,29
Densidade do solo (Mg m ⁻³)	1,32	1,62	1,66	1,71	1,74	1,75

^(A) T₀ = sem tráfego; T_{1*} = uma passada de trator de 4 Mg; T₁ = uma, T₂ = duas, T₄ = quatro e T₆ = seis passadas de um trator de 11 Mg no mesmo local, no conteúdo de água na capacidade de campo (100 hPa).

As amostras foram saturadas com água por capilaridade durante 24 h, sendo uma amostra de cada grupo de subamostras, submetida a uma das tensões de 60; 100; 330; 600; 1000 e 3000 hPa, em câmaras de pressão de Richards com placa porosa. Ao atingir o equilíbrio, as amostras foram pesadas e secas em estufa a 105 °C durante 24 h, obtendo-se a Ds e, o conteúdo de água em cada potencial, para determinação da curva de retenção de água. A microporosidade foi determinada com base no conteúdo de água retido na tensão de 60 hPa (poros < 50 µm), e a macroporosidade (poros > 50 µm) foi calculada pela diferença entre a porosidade total, correspondente ao conteúdo de água na amostra saturada, e a microporosidade.

Para determinação da densidade do solo relativa (Dsr), a densidade referência do solo (Ds máxima) foi determinada pelo teste de Proctor normal com reuso de material (Nogueira, 1998), modificado conforme ABNT (NBR 7.182/86), em que a altura de queda do embolo passou para 30,5 cm e o número de golpes para 26. Utilizou-se amostras deformadas coletadas na camada de 0,0-0,20 m, secas a sombra e passadas em peneira de 4,76 mm.

Para a determinação do parâmetro “S” as curvas de retenção de água foram ajustadas com o conteúdo gravimétrico de água, segundo modelo proposto por van Genuchten (1980). A partir dos coeficientes ajustados no modelo

(Tabela 3) foi calculado o parâmetro “S”, segundo Dexter (2004), a seguir:

$$"S" = -n(\theta_{sat} - \theta_{res}) \left[1 + \frac{1}{m} \right]^{-(1+m)}$$

em que,

$$m = 1 - \left(\frac{1}{n} \right), n = \text{coeficientes estimados no}$$

modelo de van Genuchten (1980); θ_{sat} = saturação do solo; θ_{res} = conteúdo de água residual do solo (3000 hPa).

Os resultados foram submetidos à análise de variância pelo teste F. Quando significativa, foi realizada a análise de regressão entre a Dsr e o parâmetro “S” com a produtividade de grãos de soja, milho e amendoim, por meio do programa estatístico SAS.

Tabela 3 - Coeficientes dos parâmetros ajustados no modelo de van Genuchten (1980).

Parâmetro	Passadas de trator ^(A)					
	T ₀	T _{1*}	T ₁	T ₂	T ₄	T ₆
α	0,067878	0,028229	0,023212	0,026091	0,021658	0,018783
m	0,416652	0,414219	0,432105	0,407769	0,404088	0,432327
n	1,714243	1,707122	1,760889	1,688530	1,678099	1,761578
θ_{sat}	0,373	0,235	0,221	0,207	0,199	0,193
θ_{res}	0,106	0,103	0,106	0,108	0,105	0,106

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de Dsr a partir dos quais a produtividade de soja e milho decresceram foram de 0,79 a 0,81 (Tabela 4, Figura 2), confirmando o valor de Dsr 0,80 obtido no mesmo solo para soja (Beutler et al., 2005).

Em Latossolo Roxo, verificou-se que a produtividade de soja decresceu a partir da Dsr de 0,84 e 0,87, para os anos agrícolas de 1985/86 e 1987/88, respectivamente, utilizando o teste de Proctor para obter a Ds referência (Torres & Saraiva, 1999). Comparando os resultados acima obtidos nos dois solos verifica-se que no Latossolo Roxo, que é mais poroso devido sua mineralogia oxídica (Ferreira et al. 1999), as plantas toleram valores de Dsr ligeiramente superiores ao Latossolo Vermelho caulínítico menos poroso, conforme também verificado, em casa-de-vegetação, por Beutler et al. (2005). Para solos de clima temperado, utilizando a compressão uniaxial para obter a Ds referência, valores de Dsr acima de 0,86 são considerados elevados e prejudiciais ao desenvolvimento das culturas, e abaixo de 0,80 podem afetar negativamente a produtividade de alguns cereais em consequência da redução da capacidade de armazenamento de água no solo (Arvidsson & Håkansson, 1991).

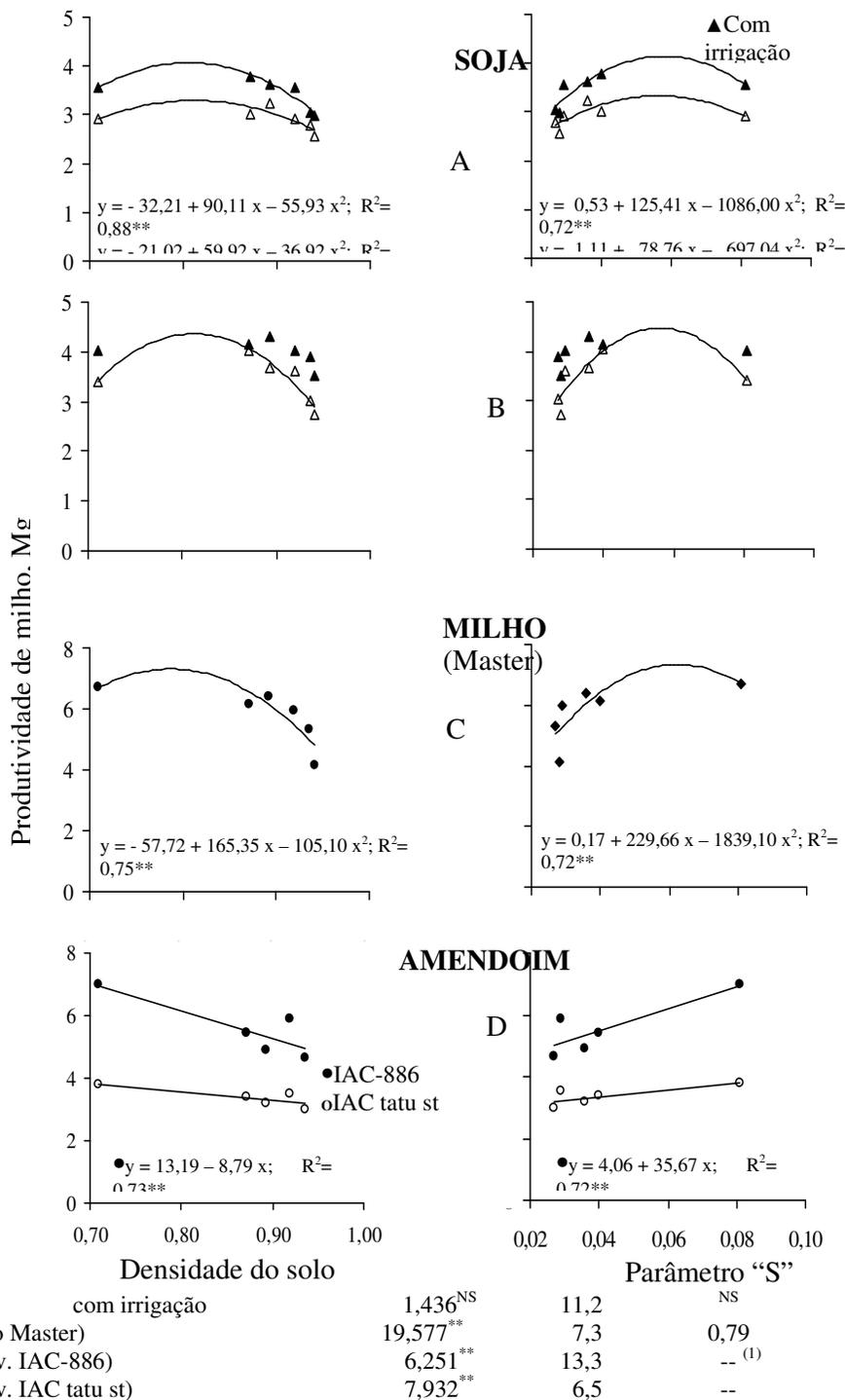
Esses resultados permitem inferir que a Dsr é um parâmetro viável na avaliação da qualidade

física do solo para o crescimento das plantas, considerando sua facilidade de determinação e pequena variação dos valores limitantes em função do tipo de solo, comparado i.e. a resistência à penetração (RP) ou a Ds que tem seus valores muito alterados em função do tipo de solo dificultando o estabelecimento de valores limitantes, quando não são apresentados valores relativos à textura e estrutura do solo.

Para a cultura da soja e do milho um grau de compactação de até 79 e 81%, respectivamente, equivalentes às densidades relativas de 0,79 e 0,81 favoreceram a obtenção de produtividades máximas, conforme também verificado na literatura (Al-Adawi & Reeder, 1996; Beutler et al. 2004, 2005). A partir desses níveis de compactação ocorreu decréscimo da produtividade, relacionado a dois fatores físicos do solo: impedimento mecânico e a falta de oxigênio para às raízes, conforme também verificado por da Silva et al. (2004). Isso é correto ao considerar que os quatro fatores físicos diretamente relacionados ao crescimento das plantas são temperatura, água, aeração e impedimento mecânico do solo (Letey, 1985), e que o conteúdo gravimétrico de água é semelhante nos diversos graus de compactação.

Tabela 4 - Teste F, coeficiente de variação (CV) e, valores de densidade do solo relativa (Dsr) e parâmetro “S” a partir dos quais ocorreu decréscimo de produtividade de soja, milho e amendoim.

Cultura	F	CV(%)	Dsr	Parâmetro “S”
Soja (cv. IAC Foscarin 31) sem irrigação	4,423**	8,4	0,81	0,056
com irrigação	4,259**	10,3	0,80	0,058
(cv. Conquista) sem irrigação	7,812**	9,9	0,81	0,056



NS, ** Não significativo e significativo a 1%, respectivamente. ⁽¹⁾ Decréscimo linear de produtividade em função da compactação.

Figura 2 - Regressão entre densidade do solo relativa e parâmetro “S” com a produtividade de soja, milho e amendoim. A- Soja (IAC Foscarin 31); B- Soja (MG/BR 46 – Conquista; C- Milho (Máster); D- Amendoim (IAC-886 e IAC tatu st).

Esses resultados indicam que é possível inferir que a Dsr é um parâmetro viável na avaliação da qualidade física do solo para o crescimento das plantas, considerando sua facilidade de determinação e pequena variação dos valores limitantes em função do tipo de solo, comparado a resistência à penetração (RP) ou a Ds que tem seus valores muito alterados em função do tipo de solo dificultando o estabelecimento de valores limitantes, quando não são apresentados valores relativos à textura e estrutura do solo.

Para a cultura da soja e do milho um grau de compactação de até 79 e 81%, respectivamente, equivalentes às densidades relativas de 0,79 e 0,81 favoreceram a obtenção de produtividades máximas, conforme também verificado na literatura (Al-Adawi & Reeder, 1996; Beutler et al. 2004, 2005). A partir desses níveis de compactação ocorreu decréscimo da produtividade, relacionado a dois fatores físicos do solo: impedimento mecânico e a falta de oxigênio para o crescimento das raízes, conforme também verificado por da Silva et al. (2004). Isso é correto ao considerar que os quatro fatores físicos diretamente relacionados ao crescimento das plantas são temperatura, água, aeração e impedimento mecânico do solo (Letey, 1985), e que o conteúdo gravimétrico de água é semelhante nos diversos graus de compactação.

O efeito desses dois fatores físicos na produtividade das culturas é exemplificado no caso da soja sem e com irrigação, em que se verificou que o valor da Dsr e o parâmetro “S” a partir dos quais a produtividade decresceu, foram semelhantes nos dois sistemas. Isso evidencia que na condição de cultivo sem irrigação, o impedimento mecânico deve ter sido o atributo restritivo. Por outro lado, no cultivo irrigado a baixa aeração foi o fator restritivo, já que a resistência do solo à penetração das raízes (RP) tem relação inversa exponencial com o conteúdo de água no solo. Então, no cultivo irrigado com maior conteúdo de água a RP foi menor, porém a produtividade decresceu no mesmo nível de compactação em relação ao cultivo não irrigado, indicando que

outro fator físico foi limitante, nesse caso a deficiência de aeração no solo deve ter sido o fator limitante. Nesse contexto, verifica-se que a quantidade de macroporos, poros estes responsáveis pelo rápido fluxo de água e gases no solo, diminuiu de 0,22 para 0,09 $m^3 m^{-3}$ no primeiro nível de compactação (T_{1*}) (Tabela 2), reduzindo o fluxo de água e gases.

Para o amendoim, ocorreu um decréscimo linear da produtividade em função da compactação, sendo obtida a maior produtividade no solo solto (T_0). Isso em decorrência de sua característica botânica de formar fruto geocárpico, em que são emitidos ginóforos que necessitam penetrar no solo para formar o fruto, que foi prejudicado pela elevada resistência à penetração. Desta forma, verificou-se que qualquer nível de compactação foi prejudicial ao amendoim, o que não ocorreu para soja e milho.

O parâmetro “S”, sugerido recentemente como indicador da qualidade física do solo para o desenvolvimento das plantas (Dexter, 2004), apresentou valores de 0,056 a 0,062 a partir dos quais a produtividade de soja e milho decresceu, e para o amendoim a partir de 0,081 (Tabela 4, Figura 2). Estes valores são superiores aos teorizados por Dexter (2004) de $S < 0,035$ como restritivos, em que ocorre uma inadequada distribuição do tamanho dos poros (micro/macroporos), independente do tipo de solo. Esses valores limitantes superiores obtidos em solo de clima tropical devem-se ao tipo de solo, que apresenta uma mineralogia caulínica de estrutura laminar com poucos poros de maior diâmetro. i.e. a relação micro/macroporos do T_0 para o T_{1*} aumentou de 1,2:1,0 para 3,2:1,0, correspondente a um decréscimo no valor de “S” de 0,081 para 0,042, já crítico para a produtividade das culturas estudadas. Assim, um maior valor de “S” indica ampla distribuição do diâmetro dos poros.

O valor de “S” diminuiu à medida que aumentou a Ds (Figura 3), por causa da redução da quantidade de macroporos em relação à de microporos que foram pouco alterados (Tabela 2), diminuindo conseqüentemente a inclinação da curva de retenção de água. Inserindo o valor

de “S” de 0,035 sugerido como limite (Dexter, 2004) obtém-se uma Ds de 1,66 (Figura 3) na qual se obteve menor produtividade, superior a

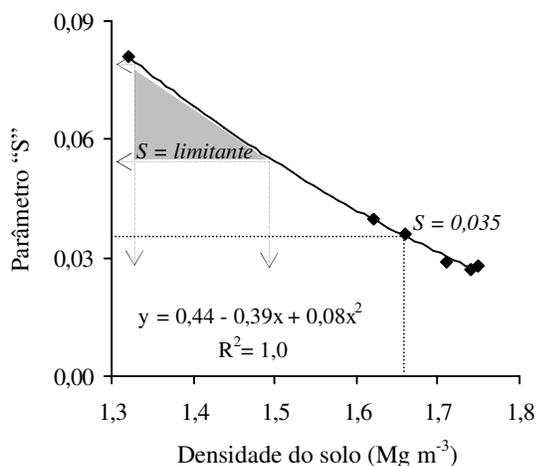


Figura 3 - Regressão entre a densidade do solo e o parâmetro “S” ($S = 0,035$ é sugerido como limitante (Dexter, 2004)).

Por meio dos resultados verifica-se que, para o Latossolo estudado, os valores do parâmetro “S” que restringiram a produtividade de soja, milho e amendoim foram superiores ao valor limitante sugerido de 0,035 por Dexter (2004), e que é necessário realizar mais estudos com este parâmetro para definir valores adequados e estudar sua viabilidade de utilização no monitoramento da qualidade física do solo em função do alto custo e do tempo gasto para sua determinação.

De acordo com a Figura 2, base da discussão desse trabalho, em primeira análise, pode ser questionável a representatividade das curvas de regressão ajustadas, entre a Dsr e do parâmetro “S” com a produtividade das culturas. Isso, porque a precisão das curvas na predição do comportamento de uma variável dependente em função de outra independente (i.e. Produção versus Dsr) é maior quando os pontos se distribuem homogêaneamente ao longo da curva, e quando se tem valor de R^2 próximo de 1 (ajuste da curva aos pontos). No primeiro caso, observa-se, nos ajustes da regressão entre a Dsr e o parâmetro “S” com a produtividade das culturas, que existe uma faixa onde não existem valores medidos (Dsr de 0,71 a 0,87 e parâmetro “S” de 0,081 a 0,040) (Figura 2), na qual situam-se os valores de produtividade máxima estimados. Isso ocorreu porque o efeito da

máxima produtividade que foi obtida nos valores de “S” de 0,056 a 0,081 equivalentes a Ds de 1,49 a 1,32.

primeira passada de máquina na redução da porosidade e aumento da Ds é muito intenso, diminuindo com o aumento no número de passadas. Desta forma, atingiu-se valores máximos, estimados pelas regressões quadráticas, situados entre o T_0 e T_{1*} , na faixa onde não foram medidos valores no campo. Porém, de acordo com a tendência dos dados (Figura 2) e a resposta positiva das culturas a uma pequena compactação do solo, verificado na literatura (Al-Adawi & Reeder, 1996; Beutler et al. 2004, 2005), possivelmente uma compactação intermediária corresponde a um valor próximo ao obtido no T_0 ou T_{1*} , alterando pouco o ponto de máxima da curva. Esse comportamento foi verificado por Beutler et al. (2004) em experimentos de casa-de-vegetação com soja e arroz, em dois conteúdos de água e em dois Latossolos, sendo o LVd o mesmo utilizado nesse experimento. Esses pesquisadores obtiveram maior produtividade de soja e arroz na Ds de $1,43 \text{ Mg m}^{-3}$ comparada a Ds de $1,59 \text{ Mg m}^{-3}$, no LVd. Assim, os valores limites de Dsr e do parâmetro “S” são aceitos como representativos.

4 CONCLUSÕES

A densidade do solo relativa é um parâmetro adequado na avaliação da qualidade física do solo, com valores de 0,79 e 0,81 a partir dos quais no Latossolo Vermelho distrófico típico estudado a produtividade de soja e milho decresceram.

O parâmetro “S” apresentou valores de 0,056 a 0,062 como limitantes a produtividade de soja e milho, necessitando de maiores estudos para sua utilização.

A compactação do solo reduziu a produtividade da soja, milho e amendoim, com maior intensidade no amendoim que teve decréscimo linear.

AGRADECIMENTOS

O primeiro e o segundo autor agradecem à FAPESP pela bolsa de pós-doutorado e doutorado, respectivamente. O quarto autor agradece ao CNPq pela bolsa de pesquisador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRIANUAL 2005: *Anuário da agricultura brasileira*. São Paulo: FNP Consultoria e Comércio, 2004. p. 455-90.

AL-ADAWI, S.S.; REEDER, R.C. Compaction and subsoiling effects on corn and soybean yields and soil physical properties. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v. 39, n. 5, p. 1641-49, 1996.

ARVIDSSON, J.; HÅKANSSON, I.A. A model for estimating crop yield losses caused by soil compaction. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v. 20, n. 2, p. 319-32, 1991.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G.; FERRAZ, M.V. Densidade relativa ótima para a produtividade de soja em Latossolos Vermelhos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 843-49, 2005.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P. Intervalo hídrico ótimo e a produção de soja e arroz em dois Latossolos. *Irriga*, Botucatu, v. 9, n. 2, p. 181-92, 2004.

CARTER, M.R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Canadian Journal of Soil Science*, Ottawa, v. 70, n.1, p. 425-33, 1990.

DEXTER, A.R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, Oxford, v. 120, n. 3, p. 201-14, 2004.

EMBRAPA. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 507-14, 1999.

HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v. 16, n. 1/2, p. 105-20, 1990

KATOU, H.; MIYAJI, K.; KUBOTA, T. Susceptibility of undisturbed soils to compression as evaluated from the changes in the soil water characteristic curves. *Soil Science and Plant Nutrition*, Tokyo, v. 33, n. 4, p. 539-54, 1987.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Advances in Soil Science*, New York, v. 1, n. 1, p. 277-94, 1985.

LINDSTRON, M.J.; VOORHEES, W.B. Response of temperate crops to soil compaction. In: SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C. *Soil compaction in crop production*. London: Elsevier, 1994. p. 265-86 (Developments in Agricultural Engineering, 2).

LIPIEC, J.; HÅKANSSON, I.; TARKIEWICZ, S.; KOSSOWSKI, J. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v. 19, n. 1, p. 307-17, 1991.

NOGUEIRA, J.B. *Mecânica dos solos*. Ensaios de Laboratório. São Carlos: EESC-USP, 1998. 248p.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.H.; FURLANI, A.M.C. *Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1996. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

SILVA, A.P.; IMNHOF, S.; KAY, B. Plant response to mechanical resistance and air-filled porosity of soils under conventional and no-tillage system. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 61, n. 4, p. 451-56, 2004.

SOUZA, R.V.C.C.; ANTUNES, P.D.; MARQUES, M.C.; FREIRE, M.G.S. Influência de diferentes níveis de compactação e doses de fósforo no crescimento e nos teores de P na matéria seca de plantas milho (*Zea mays* L.) em um solo representativo do Estado de Pernambuco. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 94-100, 2008.

TORRES, E.; SARAIVA, O.F. *Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja*. Londrina: Embrapa Soja, 1999. 58p. (Circular Técnica, 23).

van GENUCHTEN, M.T.A. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 44, n. 3, p. 892-97, 1980.

¹Prof., Dr, UNIPAMPA, Itaqui, RS. *Autor correspondente. E-mail: amaurib@yahoo.com.br

²Pós-Doutorando em Ciência do Solo, FCAV/UNESP, Jaboticabal, SP. E-mail: ona_freddi@yahoo.com.br

³Doutorando em Produção Vegetal, FCAV/UNESP, Jaboticabal, SP. E-mail: crleonel@yahoo.com.br

⁴Prof., Dr, Depto. de Solos e Adubos, FCAV/UNESP, Jaboticabal, SP. E-mail: jfcentur@fcav.unesp.br