

FRANCISCO ASSIS DE SOUSA FILHO

**DENSIDADE MÁXIMA DE SOLOS E RESPOSTA DE PLANTAS DE MILHO A
GRAUS DE COMPACTAÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2017

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

S725d Sousa Filho, Francisco Assis de, 1991-
2017 Densidade máxima de solos e resposta de plantas de milho a
 graus de compactação / Francisco Assis de Sousa Filho. –
 Viçosa, MG, 2017.
 x, 45f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Raphael Bragança Alves Fernandes.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Solos - Compactação. 2. Plantas e solo. 3. Milho - Solos.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos.
Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas.
II. Título.

CDD 22 ed. 624.151363

FRANCISCO ASSIS DE SOUSA FILHO

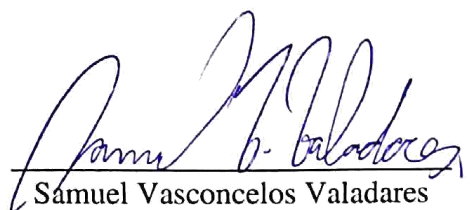
**DENSIDADE MÁXIMA DE SOLOS E RESPOSTA DE PLANTAS DE MILHO A
GRAUS DE COMPACTAÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 23 de fevereiro de 2017.



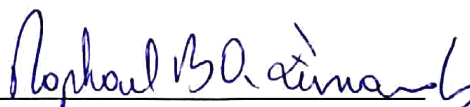
Rodrigo Oliveira de Lima



Samuel Vasconcelos Valadares



Igor Rodrigues de Assis
(Coorientador)



Raphael Bragança Alves Fernandes
(Orientador)

Aos meus pais Francisco Assis e Ana
Lúcia, pelo carinho e educação dados
e por sempre acreditarem em mim,
Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade da realização do mestrado e por todos os recursos disponíveis no campus Viçosa. Ao Departamento de Solos pela disponibilidade de sua infraestrutura como salas, laboratórios, casa de vegetação e outros recursos. Aos meus familiares, pelo apoio. Em especial aos meus pais Ana Lúcia de Oliveira e Francisco Assis de Sousa pelo exemplo de vida, cidadania, honestidade e por ter como principal objetivo a boa educação dos filhos. Ao professor Raphael Bragança Alves Fernandes pela orientação, dedicação, disponibilidade, amizade, conselhos e ensinamentos dados nessa etapa fundamental da minha vida. A todos os professores do Departamento de Solos em nome dos professores João Ker e Jaime Mello pelas ótimas aulas e pelas boas conversas nos corredores do DPS. Aos meus coorientadores Igor Rodrigues de Assis e Genelício Rocha pelo apoio na condução dos trabalhos. Aos funcionários do Laboratório de Física do solo em especial ao técnico Claudinho pela ajuda na condução dos experimentos e ensinamentos laboratoriais. Ao professor Paulo Sérgio de Almeida Barbosa pelo apoio na área de compactação. Aos vários amigos que fiz na cidade de Viçosa e na Universidade em especial Letícia Ramos, Fábio Maia, João Pedro, Carlos Henriques, Gustavo Castro, Guilherme Musse, Aristides Ngolo, Sandro Moreira, Pedro Souza, Manuel Solís, Laís Batalha, Bruno Brügger, Tony Mariano. A Capes pela concessão da bolsa e a todos que de alguma forma contribuíram para esta conquista. A todos citados o meu muito obrigado.

“Qualquer indivíduo é mais importante do que toda a Via Láctea”

Nelson Rodrigues

RESUMO

SOUSA FILHO, Francisco Assis, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2017. **Densidade máxima de solos e resposta de plantas de milho a graus de compactação.** Orientador: Raphael Bragança Alves Fernandes. Coorientadores: Igor Rodrigues de Assis e Genelício Crusoé Rocha.

A densidade do solo varia em função de suas características mineralógicas, de textura e ainda do teor de matéria orgânica. Essa variação da densidade em função de atributos intrínsecos de cada solo dificulta a utilização de seus valores absolutos na comparação do estado de compactação de diferentes solos, afetando a definição de valores de densidade crítica que seriam importantes para a tomada de decisão no manejo. Algumas desvantagens do método do Proctor normal, o mais utilizado para a obtenção da densidade máxima, e o fato de sua relativa recente utilização em estudos de solos agrícolas limitam o uso da densidade relativa nos estudos da compactação dos solos. Neste sentido, alternativas para a determinação da densidade máxima devem ser buscadas, de forma a se permitir ampliar o banco de dados de valores de densidade relativa para solos agrícolas. Com a compactação o sistema radicular tem seu crescimento limitado e um menor volume de solo pode ser explorado pelas raízes, consequentemente, as plantas absorvem menos água e nutrientes, o que pode acarretar em perdas de potencial produtivo. Na cultura do milho os efeitos negativos da compactação do solo são observados no crescimento vegetativo da parte aérea como das raízes, no comprimento, diâmetro e distribuição de raízes e na taxa de absorção de nutrientes. O objetivo desse trabalho foi avaliar, em um primeiro capítulo, diferentes metodologias para a obtenção da densidade máxima em solos de diferentes granulometrias e, no segundo capítulo avaliar qual o grau de compactação limitante para a cultura do milho em camadas subsuperficiais artificialmente compactadas. Para a comparação entre métodos, amostras recolhidas entre as peneiras de 4 e 2 mm foram utilizadas nos ensaios de compactação para obtenção da densidade máxima. Os ensaios de compactação avaliados para a obtenção da densidade máxima do solo foram: Proctor Normal, teste de compressão uniaxial com uso do consolidômetro, Mini-Proctor (MCT) e prensa hidráulica. No experimento com plantas do segundo capítulo, cada unidade experimental foi formada por tubos de PVC rígido (diâmetro de 10 cm) divididos em três anéis que foram preenchidos pelos solos. Os tubos foram formados pela união com fita adesiva de três anéis. O anel superior (altura de 5 cm) e o inferior (altura de 10 cm) foram preenchidos para se alcançar a densidade de $1,0 \text{ kg dm}^{-3}$, enquanto no anel intermediário (altura de 10 cm) preenchidos de forma a se obter os graus de

compactação de 75%; 80%; 85% e 90%. Finalizado o cultivo (45 dias), a altura das plantas, número de folhas e o diâmetro dos colmos foram avaliados. As raízes recolhidas foram avaliadas quanto aos seguintes parâmetros morfológicos: diâmetro médio, comprimento, volume e área superficial. Todos os métodos foram efetuados com quatro repetições. Não se verificaram diferenças entre a densidade máxima obtida pelo teste de Proctor (referência) e os demais métodos avaliados. Embora alguns procedimentos, como o do Mini-Proctor e o do consolidômetro, sejam considerados como de maior precisão, isto não resultou em melhor desempenho destes métodos em relação aos demais ou mesmo ao método de referência. Um valor de grau de compactação ótimo ou desejável foi encontrado próximo de 80%. Muito embora o mesmo 80% de grau de compactação tenha sido considerado ótimo no solo argiloso para algumas características fitotécnicas das plantas do milho, a produção de biomassa foi sempre prejudicada com o incremento da compactação.

ABSTRACT

SOUSA FILHO, Francisco Assis, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2017. **Soil maximum bulk density and response of corn plants to degrees of compaction.** Adviser: Raphael Bragança Alves Fernandes. Co-advisers: Igor Rodrigues de Assis and Genelício Crusoé Rocha.

The soil bulk density varies according to its mineralogical characteristics, texture and organic matter content. This variation of values is function of intrinsic attributes of each soil and difficult the use of its absolute values on compaction state comparison of different soils, affecting the establishment of critical values of soil bulk density, which can be very interesting for decision making in soil management. Disadvantages on procedures of Proctor method which is used to obtain maximum soil density, and its relatively recent use in agricultural soils studies limits the use of relative density in studies of soil compaction. In this sense, alternatives for the determination of the maximum soil bulk density may be evaluated aiming to allow increasing the database of relative soil bulk density for agricultural soils. Soil compaction limits root system growth and a smaller volume of soil can be exploited by the roots. Consequently, the plants can absorb less water and nutrients, which can lead to losses of productive potential. For corn plants, negative effects of soil compaction are observed on the vegetative growth of the aerial part as well as in roots, affecting its length and diameter, and also the distribution and the rate of nutrient absorption. The objective of this study was to evaluate, in a first chapter, different methodologies to obtain the maximum soil bulk density in soils of different textures, and in the second chapter, to evaluate the degree of limiting compaction for corn cultivation in artificially compacted subsurface layers. For the comparison between methods, soil samples containing aggregates of 4 to 2 mm were used in the compaction tests to obtain the maximum density. The compaction tests evaluated to obtain the maximum soil bulk density were: Proctor Normal, uniaxial compression test with use of the consolidometer, Mini-Proctor (MCT) and hydraulic press. In the experiment with plants of the second chapter, each experimental unit was formed by rigid PVC tubes (diameter of 10 cm) divided into three rings that were filled by two soils. The tubes were formed by bonding with three-ring adhesive tape. The upper ring (height 5 cm) and lower ring (height 10 cm) were filled to reach the density of 1.0 kg dm^{-3} , while in the intermediate ring (height of 10 cm) were filled in order to obtain degrees of compaction of 75%; 80%; 85% and 90%. After finishing the cultivation (45 days), plant height, number of leaves and the diameter of the stalks were evaluated. The roots were evaluated for the following

morphological parameters: mean diameter, length, volume and surface area. All methods were performed with four replicates. No differences were verified between the maximum soil bulk density obtained by Proctor test (reference) and others evaluated methods. Although some procedures, such as the Mini-Proctor and consolidometer, are considered more accurate, this did not result in better performance of these methods in relation to the others or even to the reference method. A value of optimum or desirable soil degree of compaction was found to be close to 80%. Although the same 80% of degree of compaction was considered optimal in the clayey soil for some plant breeding characteristics of corn, the biomass production was always affected with the increase in compaction.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	1
CAPÍTULO I: AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE MÁXIMA DO SOLO.....	3
RESUMO	4
1. INTRODUÇÃO.....	5
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	7
2.1 Caracterização dos solos	7
2.2 Densidade máxima do solo.....	8
2.2.1 Ensaio de Proctor Normal	8
2.2.2 Teste de compressão uniaxial.....	9
2.2.3 Mini-proctor	10
2.2.4 Prensa hidráulica	12
2.3 Equação de pedotransferência	13
2.4 Avaliação da densidade relativa	13
2.5. Análises estatísticas.....	13
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
3. 1 Comparação entre métodos de obtenção da densidade máxima	14
3. 2 Comparação de cada procedimento na estimativa da densidade máxima do solo com o método de referência	15
3. 3 Equação de pedotransferência para estimativa da densidade máxima do solo	17
3. 4 Avaliação da estimativa da densidade relativa	18
4. CONCLUSÕES	21
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	21
CAPÍTULO II: GRAU DE COMPACTAÇÃO DO SOLO LIMITANTE PARA A CULTURA DO MILHO.....	24
RESUMO	25
1. INTRODUÇÃO.....	26
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	27
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31

3. 1 Efeito da compactação no sistema radicular de plantas de milho.....	31
3. 2 Efeito da compactação na parte aérea de plantas de milho	33
3. 3 Efeito da compactação na produção de biomassa de plantas de milho	35
3. 4 Efeito da compactação no desenvolvimento de raízes na coluna de solo	37
4. CONCLUSÕES	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
CONCLUSÃO GERAL.....	45

INTRODUÇÃO GERAL

A compactação do solo pode ser definida como o processo pelo qual os agregados são rearranjados ocorrendo diminuição entre eles, aumentando assim a densidade do solo. Quando ocorre, a distribuição dos poros é alterada, diminuindo o espaço entre as partículas, a macroporosidade, porosidade total, taxa de infiltração de água, e condutividade hidráulica, além de se aumentar a resistência do solo à penetração. Esses efeitos prejudiciais são associados, afetando os processos de armazenamento e de disponibilidade de água e o desenvolvimento do sistema radicular das culturas.

Vários parâmetros têm sido usados para caracterizar o estado de compactação do solo, como a densidade do solo ou porosidade total. Uma vez que a compactação do solo é caracterizada por mudanças de volume, considera-se mais adequado a utilização de métodos de avaliação baseados em relações volumétricas. Contudo, esses parâmetros variam entre solos e têm valores de aplicação limitados quando diferentes solos são comparados. A densidade que indica um estado máximo de compactação em um solo pode indicar, em outro solo, pequena compactação, dificultando a utilização de seus valores absolutos para a comparação do estado de compactação de diferentes solos.

Uma proposta para diminuir as diferenças entre os resultados encontrados é a utilização da densidade relativa do solo (DR), que é a relação entre a densidade do solo com a sua densidade máxima (D_{max}), obtida normalmente por um teste de compactação do solo. A DR pode ser utilizada para avaliar o grau de compactação do solo (GC) e as respostas das culturas em diferentes solos, uma vez que, é pouco influenciada pela mineralogia e textura do solo.

Dentre as metodologias mais utilizadas para a obtenção da DR, a mais utilizada é o ensaio de Proctor Normal, por ser de fácil entendimento e baixo custo. No entanto, é pouco utilizado para fins de estudos agrícolas e apresenta algumas desvantagens: necessita de grande quantidade de solo para determinação da curva de compactação, e o procedimento é demorado e trabalhoso, o que dificulta sua realização.

O GC pode indicar mudanças nas propriedades físicas do solo como a macroporosidade, condutividade hidráulica do solo saturado e RP. Dentre essas propriedades, a RP tem uma relação direta com o crescimento radicular.

Neste contexto, a compactação do solo assume importância relevante nas relações físicas, químicas e biológicas do solo, que afetam a produção e produtividade das culturas. A compactação afeta o crescimento das plantas em vários aspectos, sendo

os efeitos sobre o alongamento radicular os mais claros, refletindo a habilidade das raízes em extrair água e nutrientes do solo em quantidades adequadas. O alongamento radicular só é possível quando a pressão de crescimento das raízes for maior do que a resistência mecânica do solo à penetração (RP).

A resposta das principais plantas cultivadas à compactação ainda não está completamente conhecida. Ainda são poucos e limitados os estudos realizados que buscam obter resposta das plantas em diferentes estados de compactação, tornando-se importante estudos sobre compactação do solo para o estabelecimento de limites de valores de densidade do solo que não afetem o crescimento radicular das plantas. É necessário conhecer os estados de compactação que reduzem o crescimento do sistema radicular das plantas, visando ao uso do solo de forma eficiente e minimizando os efeitos adversos da compactação do solo.

Diante do exposto, o objetivo geral desse trabalho foi avaliar, em um primeiro capítulo, diferentes metodologias para a obtenção da densidade máxima obtida no teste de Proctor em solos de diferentes granulometrias e, no segundo capítulo avaliar qual o grau de compactação limitante para a cultura do milho em camadas subsuperficiais artificialmente compactadas.

CAPÍTULO I

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE MÁXIMA DO SOLO PARA FINS AGRÍCOLAS

RESUMO

A variação da densidade do solo em função de atributos intrínsecos de cada solo dificulta a utilização de seus valores absolutos na comparação do estado de compactação de diferentes solos. A densidade relativa destaca-se como proposta de variável que elimina, tanto quanto possível, as diferenças entre os solos diferentes, permitindo assim a comparação do estado de compactação entre eles. O objetivo desse trabalho foi avaliar diferentes metodologias para a obtenção da densidade máxima para Latossolos de diferentes granulometrias, buscando alternativas que combinem exequibilidade e exatidão, visando a obtenção da densidade relativa. Amostras de cinco Latossolos de diferentes granulometrias foram coletadas na camada de 0 a 20 cm de profundidade. As amostras recolhidas entre as peneiras com malhas de 4 e 2 mm foram utilizadas nos ensaios de compactação para obtenção da densidade máxima. Os ensaios de compactação avaliados para a obtenção da densidade máxima do solo foram: Proctor Normal, teste de compressão uniaxial com uso do consolidômetro, Mini-Proctor (MCT) e prensa hidráulica. Todas as análises foram realizadas com quatro repetições. A densidade máxima obtida pelo teste de Proctor (referência) não foi diferente da determinada com os demais métodos avaliados ($p < 0,05$). Embora o Mini-Proctor e o consolidômetro sejam considerados métodos de maior precisão, eles não apresentaram melhor desempenho em relação aos demais ou mesmo ao método de referência. Desta forma, todos os métodos podem ser utilizados, preferencialmente o Mini-proctor e a prensa hidráulica.

Palavras-chave: Compactação do solo; Teste de Proctor normal; Densidade relativa do solo.

1. INTRODUÇÃO

A compactação do solo pode ser definida como o processo pelo qual os agregados e partículas são rearranjados em resposta ao aumento de carga atuando na superfície, reduzindo assim os espaços entre e intra agregados, tornando as partículas mais próximas e, conseqüentemente aumentando a densidade do solo (SSSA, 2016). A ocorrência de camadas compactadas diminui o espaço poroso do solo, responsável pelo armazenamento e condução do ar e da água em todo o perfil, com conseqüências para a qualidade do solo.

Quando associada ao excesso de umidade, a compactação pode se tornar prejudicial à difusão dos gases, limitando assim o desenvolvimento do sistema radicular das plantas e o rendimento das culturas. Uma porosidade de aeração de 10 % tem sido considerada como um limite mínimo para se garantir a qualidade do solo (SILVA, 2011). As conseqüências da compactação são associadas, principalmente, às mudanças indesejáveis nas características físico-hídricas do solo, afetando processos de armazenamento e de disponibilidade de água, ar e nutrientes, bem como o desenvolvimento do sistema radicular das culturas, por impedimentos diretos de ordem física (SEQUEIRA et al., 2014).

Grande parte dos estudos de compactação do solo são focados na avaliação da densidade como medida do estado da estrutura do solo. Essa variável expressa a relação entre a massa de solo seco e o seu volume, sendo afetada por modificações na estrutura, arranjo e volume dos poros (KLEIN, 2008). Esse atributo é um dos fatores que afetam direta e indiretamente o crescimento das plantas, e valores de densidade crítica têm sido propostos como que limitantes ao desenvolvimento de raízes, os quais podem variar de acordo com a textura e o teor de matéria orgânica do solo (ZHAO et al., 2011).

A densidade do solo varia em função de suas características mineralógicas, de textura e ainda do teor de matéria orgânica. Essa variação da densidade em função de atributos intrínsecos de cada solo dificulta a utilização de seus valores absolutos na comparação do estado de compactação de diferentes solos, afetando a definição de valores de densidade crítica que seriam importantes para a tomada de decisão no manejo. Desta forma, solos mais argilosos possuem menores valores de densidade do que solos arenosos, o que é associado à maior agregação das partículas de argila e conseqüente incremento da porosidade intra-agregados, reduzindo assim a densidade. De forma geral, assume-se que a densidade dos solos arenosos varia entre 1,3 a 1,8 kg dm⁻³, dos argilosos entre 0,9 a 1,6 kg dm⁻³ e dos solos orgânicos entre 0,2 a 0,6 kg dm⁻³.

(BRADY; WEIL, 2013). Por conseguinte, um valor de densidade associado a um máximo estado de compactação de um solo, pode não o ser em outro solo (HÂKANSSON, 1990).

Neste contexto, a densidade relativa destaca-se como proposta de variável que elimina, tanto quanto possível, as diferenças entre os solos, permitindo assim a comparação do estado de compactação entre eles (HÂKANSSON; LIEPIC, 2000). Existe um aparente consenso de que a densidade relativa é pouco influenciada pelas características mineralógicas do solo e por sua granulometria, podendo assim ser utilizada para se avaliar o grau de compactação e as respostas das culturas agrícolas em diferentes classes de solos (CARTER, 1990; HÂKANSSON, 1990 e SILVA et al., 1997). A densidade relativa é obtida pela relação entre a densidade do solo e a densidade máxima de compactação, essa última obtida pelo teste ou ensaio de Proctor (CARTER, 1990; BEUTLER et al., 2005; KLEIN, 2006) ou pelo ensaio de compressão uniaxial (HÂKANSSON, 1990; LIPIEC et al., 1991; SILVA et al., 1997; SUZUKI et al., 2007).

O ensaio de Proctor normal é o mais utilizado para a obtenção da densidade máxima, sendo considerada uma metodologia padrão, de baixo custo e conceitualmente fácil de ser entendida. O ensaio é normatizado pela norma MB-33 (ABNT, 1986), sendo conhecido oficialmente como Ensaio Normal de Compactação. Entretanto, o ensaio apresenta a desvantagem de ser muito trabalhoso, demorado e de requerer grande quantidade de solo para a determinação da curva de compactação, o que dificulta a sua realização para fins agrícolas (MARCOLIN; KLEIN, 2011). Essas desvantagens do método, aliado ao fato de sua relativa recente utilização em estudos de solos agrícolas (FIGUEIREDO et al., 2000), limitam o uso da densidade relativa nos estudos da compactação dos solos. Neste sentido alternativas para a determinação da densidade máxima devem ser buscadas, de forma a se permitir ampliar o banco de dados de valores de densidade relativa para solos agrícolas, o que tem sido considerado fundamental para se avaliar adequadamente o grau de compactação dos solos e embasar a tomada de decisão na prática agrícola (NANKO et al., 2014).

Uma recente estratégia visando estimar variáveis de complicado processo de obtenção na ciência do solo é a utilização de equações de pedotransferência. Essas equações são geradas a partir de variáveis mais comuns em inventários pedológicos ou de mais fácil determinação. Esta opção metodológica de obtenção de dados não tem sido utilizada para a avaliação da densidade máxima do solo.

Diante do exposto, o objetivo desse trabalho foi avaliar diferentes metodologias para a obtenção da densidade máxima para Latossolos de diferentes granulometrias, buscando alternativas que combinem exequibilidade e exatidão, visando a obtenção da densidade relativa.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização dos solos

Para esse estudo amostras deformadas de cinco Latossolos de diferentes granulometrias foram coletadas na camada de 0 de 20 cm de profundidade, quatro no estado de Minas Gerais e um no estado do Espírito Santo (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização física dos solos utilizados no presente estudo com os valores médios dos teores de argila, silte, areia grossa (AG), areia fina (AF), matéria orgânica (MO), argila dispersa em água (ADA), equivalente de umidade (EU), densidade de partículas (Dp), densidade do solo (Ds) e densidade relativa (DR) calculada e estimada.

Solo	MO	AG	AF	Silte	Argila	ADA	EU	Dp	Ds	DR ^{1/}	DR ^{2/}
	dag										
	kg ⁻¹	----- (kg kg ⁻¹) -----					.	--- (kg dm ⁻³) ---			
LVA - Três Marias-MG	1,01	0,21	0,57	0,04	0,68	0,01	0,09	2,65	1,68	0,91	0,92
LA – Guarapari-ES	1,52	0,61	0,17	0,03	0,19	0,07	0,09	2,61	1,48	0,90	0,90
LVA - João Pinheiro-MG	1,54	0,38	0,24	0,04	0,34	0,06	0,19	2,43	1,42	0,90	0,90
LVA – Viçosa-MG	1,77	0,21	0,13	0,09	0,57	0,01	0,33	2,47	1,13	0,80	0,81
LV - Sete Lagoas-MG	6,70	0,06	0,03	0,10	0,81	0,01	0,23	2,52	0,96	0,72	0,72

*LA: Latossolo Amarelo; LVA: Latossolo Vermelho-Amarelo; LV: Latossolo Vermelho. ^{1/} calculado; ^{2/} estimado.

As amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneiras de diferentes malhas. Amostras recolhidas entre as peneiras de 4 e 2 mm foram utilizadas nos ensaios de compactação para obtenção da densidade máxima. Amostras passadas em peneira de 2 mm (TFSA) foram utilizadas nas determinações de equivalente de umidade, granulometria, densidade de partículas e teor de matéria orgânica. Amostras

indeformadas também foram coletadas em anéis volumétricos para a determinação da densidade do solo e microporosidade. A partir dos dados obtidos foram calculados a porosidade total e a macroporosidade. Todos os procedimentos analíticos adotados seguiram o recomendado em Embrapa (2011).

2.2 Densidade máxima do solo

Os ensaios de compactação avaliados para a obtenção da densidade máxima do solo foram: Proctor Normal, teste de compressão uniaxial com uso do consolidômetro, Mini-Proctor e prensa hidráulica. Todos os métodos foram efetuados com quatro repetições.

2.2.1 Ensaio de Proctor Normal

A determinação da densidade máxima dos solos e a umidade ótima para compactação pelo teste do Proctor normal foi efetuada com reuso de material, com cinco amostras de solo de, aproximadamente 2,2 kg, sendo preparadas para cada ponto da curva de compactação (ABNT, 1986).

Para cada ponto foi-se acrescentado água em doses crescentes de 2 e 1,5 % para solos argilosos e arenosos, respectivamente. O preenchimento do cilindro para a compactação da amostra foi efetuado em três etapas, com a formação de três camadas de material, seguida da aplicação de 26 golpes do soquete por camada (Figura 1). Entre uma camada e outra, foi realizada escarificação na superfície do solo para melhor contato entre as camadas.



Figura 1 – Detalhes dos equipamentos utilizados no ensaio do Proctor Normal (colarinho, molde cilíndrico e soquete).

De posse dos dados de densidade alcançada e da umidade do solo nas cinco amostras foi elaborada a curva de compactação. A partir da derivada da regressão polinomial de segundo grau ajustada foi calculada a densidade máxima e a umidade ótima de compactação.

2.2.2 Teste de compressão uniaxial

Amostras deformadas (TFSA) foram inicialmente adicionadas a anéis metálicos de 7 cm de diâmetro e 2,5 cm de altura. O ensaio foi realizado considerando dois diferentes procedimentos. O primeiro consistiu da adição de TFSA até o limite superior do anel, sendo o excesso eliminado com o auxílio de uma régua (consolidômetro normal). No segundo procedimento, a quantidade de TFSA adicionada ao anel foi equivalente à massa necessária para se obter o valor de densidade original do solo em condições de campo (consolidômetro Ds). Na sequência, as amostras foram saturadas e equilibradas com o potencial correspondente à capacidade de campo de acordo com a textura do solo. Para os solos arenosos foi utilizado o potencial de -10 kPa na mesa de tensão e, para os demais solos argilosos, a de -33 kPa, no extrator de pressão de Richards.

Após o equilíbrio, as amostras foram submetidas ao teste de compressão uniaxial em um consolidômetro à pressão de 200 kPa (Figura 2), seguindo uma adaptação descrita por Håkanson (1990). O tempo de compressão adotado para cada amostra foi de 10 min, tempo suficiente para que mais de 99 % da compactação máxima seja alcançada (SILVA et al., 2000).



Figura 2 - Consolidômetro pneumático utilizado no ensaio de compressão uniaxial.

Ao final do ensaio as amostras foram pesadas após secagem em estufa a 105 °C por 24 h. A partir da altura final do solo dentro do anel calculou-se o volume de solo que, com a massa seca, permitiu o cálculo da densidade máxima do solo.

2.2.3 Mini-proctor

O teste do Mini-Proctor é um procedimento que utiliza o mesmo princípio básico do ensaio de Proctor, diferindo apenas nos corpos de prova que são de dimensões reduzidas (50 mm de diâmetro e pistão de penetração de 16 mm de diâmetro) (Figura 3). A redução das dimensões visa diminuir consideravelmente a quantidade de amostra requerida no ensaio, reduzir o esforço na aplicação dos golpes e uma maior uniformidade dos corpos de prova compactados (SOUZA, 2007).

O ensaio de compactação Mini-Proctor foi realizado com amostras colocadas em um molde cilíndrico padronizado, no qual foi aplicada uma energia de compactação com golpes de soquete, buscando-se obter corpos de prova com altura final aproximada de 50 mm.



Figura 3: Equipamento utilizado no ensaio de compactação Mini-Proctor.

Os solos foram submetidos à secagem prévia para que sua umidade ficasse próxima da umidade higroscópica. A secagem foi feita em estufa com temperatura máxima de 60 °C.

As amostras foram divididas em cinco porções de aproximadamente 500 g, que receberam quantidades crescentes de água, variando em torno de 2 % a quantidade de água entre elas.

Previamente ao processo de compactação, as paredes internas dos moldes foram limpas para eliminar qualquer tipo de sujeira e lubrificadas com vaselina. O molde cilíndrico foi posicionado sobre o espaçador e dentro dele foi colocado um disco de polietileno e um anel de vedação (Figura 4).



Figura 4 - Detalhes do processo de compactação do Ensaio Mini-Proctor.

Com auxílio de um funil, promoveu-se a adição de 190 g ($\pm 0,01$ g) das amostras de solos para o molde cilíndrico e, ao final, um novo disco de polietileno e um novo anel de vedação foram dispostos. Um assentador foi utilizado para pressionar levemente a amostra buscando o seu aplainamento. Na sequência, foram efetuados golpes no suporte até se completar o número necessário para uma face do corpo de prova, em função da energia escolhida. Finalizado o procedimento, o conjunto massa de solo compactado juntamente com seu molde, bem como os discos de polietileno e os anéis de vedação foram pesados com precisão de 0,01 g. O mesmo processo de compactação foi repetido para as demais porções de solo com diferentes umidades.

A densidade máxima e a umidade ótima para compactação foram obtidas por meio da intersecção dos ramos seco e úmido da curva de compactação gerada.

2.2.4 Prensa hidráulica

Amostras dos solos (TFSA) também foram compactadas em um cilindro com o auxílio de uma prensa hidráulica modelo PH, marca CHARLOTT, com carga de 15 toneladas (Figura 5), buscando-se atingir a densidade máxima.



Figura 5 - Prensa hidráulica manual utilizada no presente estudo.

A umidade do solo foi mantida na capacidade de campo para a prensagem. Neste procedimento foram utilizados os mesmos cilindros usados na compactação do Ensaio de Proctor normal, com a compactação também ocorrendo em três camadas. A

densidade final máxima foi obtida a partir da massa e volume final do corpo de prova, após o procedimento de compactação com carga máxima na prensa. O volume foi obtido a partir do diâmetro e altura final do corpo de prova, e a massa após a secagem em estufa a 105 °C.

2.3 Equação de pedotransferência

Para a estimativa da densidade máxima foram utilizadas funções de pedotransferência a partir das variáveis: teores de argila, silte, areia grossa, areia fina e matéria orgânica; argila dispersa em água; equivalente de umidade e densidade do solo e de partículas.

A capacidade preditiva dos diferentes métodos em avaliar a densidade máxima do solo também foi avaliada via equações de regressão comparando cada procedimento avaliado e o método de referência por meio de equações de pedotransferência. As funções de pedotransferência foram obtidas a partir de análise de regressão linear múltipla, considerando obrigatoriamente todas as variáveis avaliadas e também o procedimento de análise “forward”.

2.4 Avaliação da densidade relativa

A densidade relativa foi calculada para os diferentes métodos avaliados de determinação da densidade máxima do solo (D_{max}) de acordo com a expressão: $DR = D_s/D_{max}$, onde D_s é a densidade do solo obtida em condições de campo e pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 2011).

2.5. Análises estatísticas

O experimento foi executado em Delineamento Inteiramente Casualizado com quatro repetições. Os resultados obtidos foram submetidos à Análise de Variância, seguido de avaliações pelo teste de média de Dunnett ($p < 0,05$) e do intervalo de confiança para se comparar a eficiência dos métodos na estimativa da densidade máxima do solo em relação ao procedimento do Proctor Normal, considerado como referência.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Comparação entre métodos de obtenção da densidade máxima

Os valores médios da densidade máxima dos solos obtidos pelos diferentes métodos avaliados apresentaram baixo coeficiente de variação e certa coerência nos resultados encontrados (Tabela 2). Ainda que os valores obtidos pelo método do consolidômetro, considerando-se a densidade original do solo, tenha apresentado valores maiores do que os dos demais métodos, a análise das médias pelo teste de Dunnett ($p < 0,05$) indicou não haver diferenças entre a densidade máxima obtida pelo teste de Proctor (referência) e os demais métodos avaliados.

Tabela 2 - Comparação entre os métodos de obtenção da densidade máxima do solo

Método	Dmax	CV
	kg dm ⁻³	%
Proctor-Normal (referência)	1,54	11,28
Mini-Proctor	1,56 ^{ns}	11,12
Consolidômetro (Ds)	1,65 ^{ns}	14,58
Consolidômetro (normal)	1,57 ^{ns}	12,34
Prensa hidráulica	1,55 ^{ns}	11,45

ns: diferença não significativa entre o método avaliado e o teste de referência, segundo teste de Dunnett a 5 % de significância.

O teste de compressão uniaxial é largamente utilizado para estudar as características compressivas de solos agrícolas, além de ter maior facilidade de execução do que o teste de Proctor, que se mostra mais trabalhoso, demorado, complexo e requer o uso de muito material de solo (SILVA, 2011). Buscando maior praticidade na obtenção da densidade máxima para se avaliar a compactação de solos, surgiu o teste do Mini-Proctor (VILLIBOR; NOGAMI, 2009).

Embora alguns procedimentos como o do Mini-Proctor e o do consolidômetro com preenchimento normal sejam considerados como de maior precisão, isto não resultou em melhor desempenho destes métodos em relação aos demais ou mesmo ao método de referência. Semelhança nos resultados de densidade máxima do solo também foi obtida por Souza (2007), ao comparar o ensaio de Proctor Normal e o Mini-Proctor.

A igualdade de resultados entre os métodos avaliados é facilmente percebida na avaliação do intervalo de confiança (Figura 6). A análise dessa comparação permite deduzir que o método do consolidômetro com preenchimento normal foi o que apresentou valor mais próximo ao encontrado para o ao método de Proctor Normal (referência), enquanto o método do consolidômetro com material sendo adicionado para se atingir a densidade do solo original de campo foi o que mais diferiu.

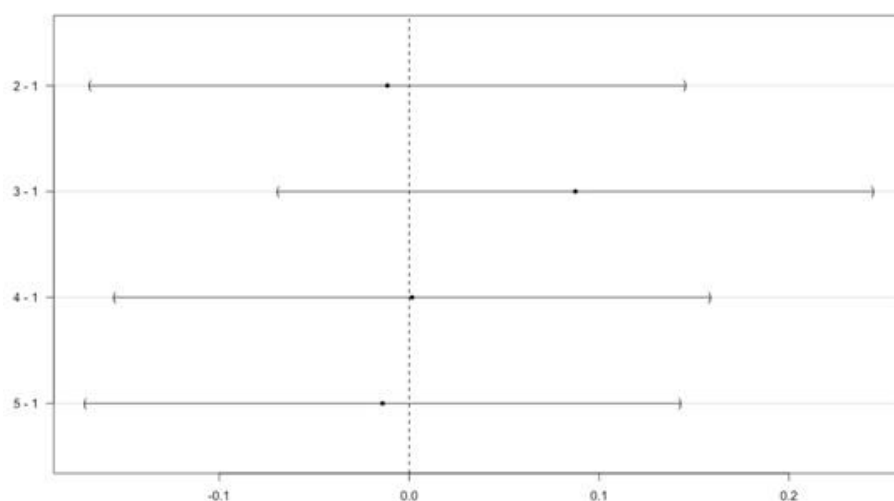


Figura 6 - Comparação entre diferentes métodos de avaliação da densidade máxima do solo em função do intervalo de confiança de 95 %. Métodos: 1-Proctor Normal; 2-Mini-Proctor; 3-Consolidômetro Ds; 4-Consolidômetro (Preenchimento normal); 5-Prensa hidráulica.

Os resultados obtidos da comparação entre os diferentes procedimentos para a obtenção da densidade máxima do solo permitem indicar que os procedimentos do Mini-Proctor e do consolidômetro (normal) podem substituir o método do Proctor. Esses dois procedimentos apresentam as vantagens de serem de fácil execução, demandando menos tempo, material de solo e esforço. A desvantagem desses dois procedimentos é a exigência de equipamentos que são mais dispendiosos do que os utilizados no método de referência.

3. 2 Comparação de cada procedimento na estimativa da densidade máxima do solo com o método de referência

A capacidade preditiva dos diferentes procedimentos avaliados de estimar a densidade máxima do solo em comparação ao ensaio do Proctor normal pode ser melhor

visualizada em gráficos e equações de regressão (Figura 7). Os melhores ajustes entre os dados dos métodos avaliados e o método de referência foram obtidos para os procedimentos do Mini-proctor (Figura 7A) e prensa hidráulica (Figura 7D), que exibiram os maiores valores do coeficiente de determinação (R^2), 0,99 e 0,97, respectivamente. Tal resultado pode ser explicado pela semelhança dos ensaios de compactação em relação à metodologia e forma de compressão das amostras.

O ensaio de compactação pelo consolidômetro, tanto o normal quanto o que considerou a densidade original do solo, apresentou menor capacidade preditiva. Embora em termos médios o ensaio do consolidômetro normal tenha sido recomendado (Tabela 2, Figura 6), a análise da figura 7C indica desvios individuais que reduzem a capacidade preditiva deste procedimento.

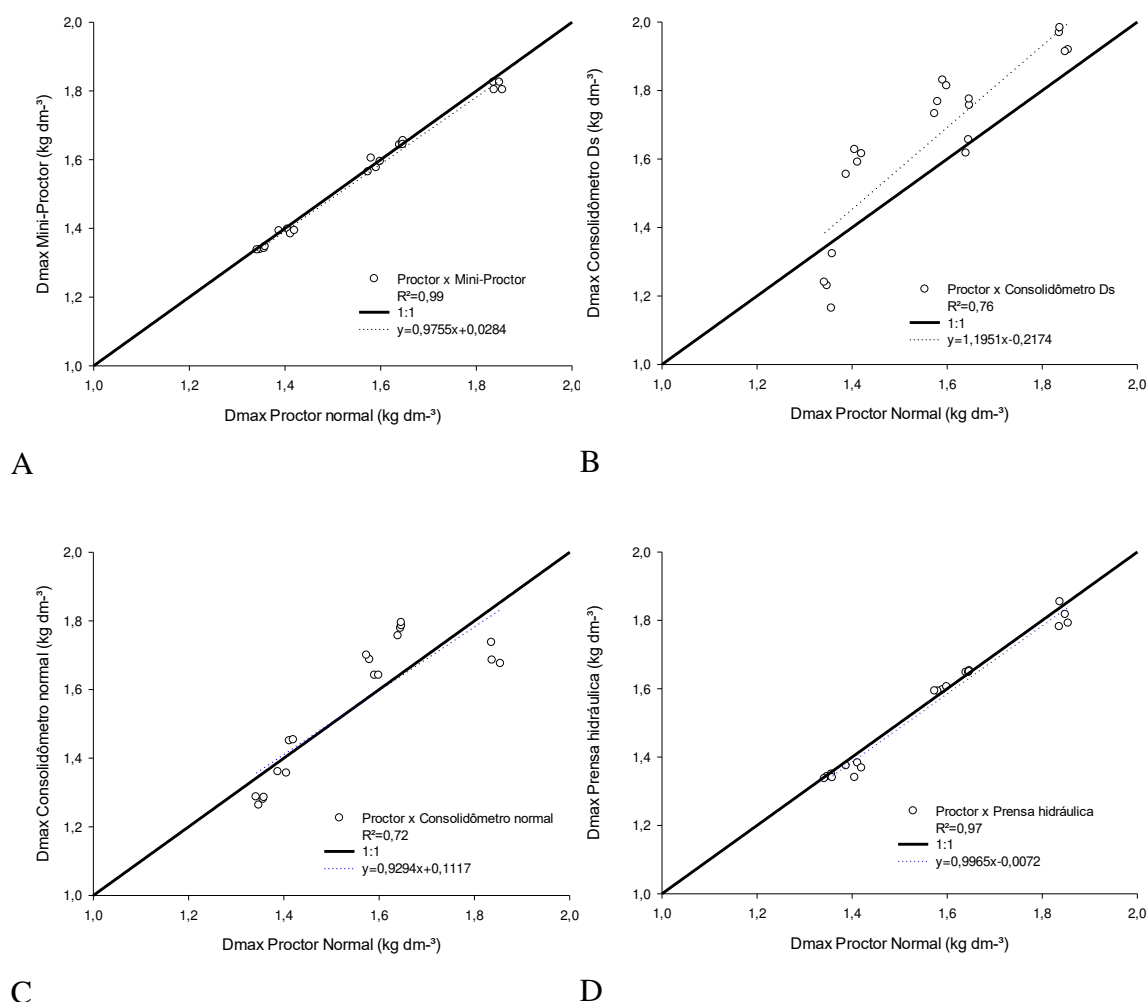


Figura 7 - Comparação da capacidade preditiva da densidade máxima (D_{max}) do solo de diferentes métodos em função do método de referência (Proctor Normal).

3. 3 Função de pedotransferência para estimativa da densidade máxima do solo

A utilização de atributos do solo de mais simples determinação na avaliação de outros mais complexos tem sido uma alternativa em estudos pedológicos. Com este objetivo funções de pedotransferência para estimar a densidade máxima do solo (D_{max}) foram obtidas considerando as variáveis argila, silte, areia grossa (AG), areia fina (AF), matéria orgânica (MO), argila dispersa em água (ADA), equivalente de umidade (EU), e densidade de partículas (D_p) e do solo (D_s).

A ideia de desenvolver uma equação de pedotransferência para estimar a densidade máxima do solo numa área de estudo, pode prover referências para outras áreas e os resultados podem servir de base de dados.

A primeira função de pedotransferência considerou todas as variáveis indicadas, obtendo-se um excelente ajuste ($R^2 = 0,99$), entretanto, com apenas o coeficiente da variável equivalente de umidade sendo significativos (Equação 1):

$$D_{max} = 1,6885 - 0,0208^{ns} \cdot MO - 0,0586^{ns} \cdot AG + 0,2669^{ns} \cdot AF - 0,6967^{ns} \cdot SILTE + 0,0069^{ns} \cdot ARG - 0,6183^{ns} \cdot ADA - 0,8326 \cdot EU - 0,0261^{ns} \cdot DP + 0,1219^{ns} \cdot DS \quad (1)$$

Uma outra estimativa da densidade máxima foi efetuada a partir da regressão múltipla com seleção de variáveis preditoras utilizando a estratégia stepwise forward, na qual a análise inicia sem nenhuma variável no modelo, as quais são adicionadas individualmente e somente se contribuírem com a capacidade preditiva. A equação final obtida com este procedimento também apresentou excelente capacidade preditiva ($R^2 = 0,99$):

$$D_{max} = 1,4919 - 0,0142^{***} \cdot MO + 0,3193^{***} \cdot AF - 0,5466^{ns} \cdot SILTE - 0,5927^{ns} \cdot ADA - 0,6881^{***} \cdot EU + 0,1605^{***} \cdot DS \quad (2)$$

Utilizando a estratégia stepwise forward verificou-se que as variáveis MO, areia fina (AF), equivalente de umidade (EU) e a densidade do solo (D_s) influenciaram significativamente ($p < 0,001$) a D_{max} (Equação 2), permitindo, com isso, obter uma função de pedotransferência capaz de descrever essa propriedade do solo.

Resultados de EPTs semelhantes onde a MO apresenta relação inversa com a Dmax também foram encontrados por Reichardt e Timm (2004), Libardi (2005) e Braida et al. (2006). Esses autores também encontraram relação inversa da argila com a Dmax, obtendo comportamento linear e negativo com o aumento do teor de MO e da argila, o que não ocorreu no presente estudo.

De acordo com Brady e Weil (2013), a redução da Ds com o aumento da MO no solo decorre do efeito positivo na estabilidade estrutural do solo associado ao fato de o material orgânico apresentar baixa densidade, menor do que a dos sólidos mineral do solo.

Ambas as funções de pedotransferência apresentaram elevada capacidade preditiva da densidade máxima do solo (Figura 8).

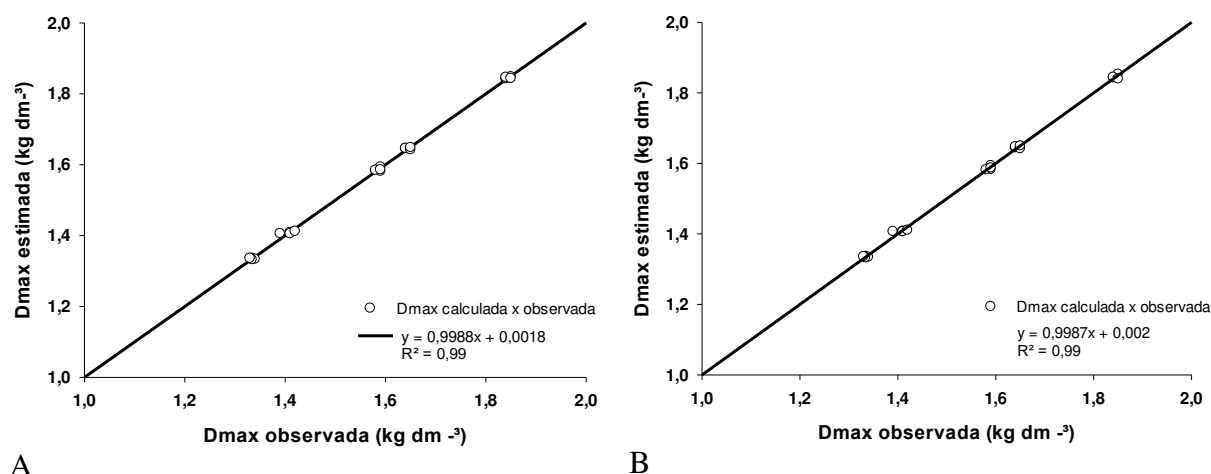


Figura 8 - Avaliação da capacidade preditiva das funções de pedotransferência a partir de atributos do solo: A) considerando todas as variáveis avaliadas no modelo, e B) a partir do processo de seleção de variáveis stepwise forward.

Trabalhando com função de pedotransferência (EPT) para estimar a Dmax utilizando o carbono orgânico (CO) e a granulometria como variáveis, Xiangsheng et al. (2016) encontraram elevados coeficiente de determinação utilizando regressão exponencial, com resultados semelhantes aos encontrados neste trabalho.

3. 4 Estimativa da densidade relativa

O foco do presente trabalho foi buscar alternativas de estimativa da densidade máxima do solo (Dmax) com vistas à utilização desses valores no cálculo da densidade

relativa, o que se justifica pelas dificuldades operacionais verificadas no procedimento considerado como referência para a determinação da Dmax.

A comparação entre os valores de DR encontrados pelo método referencial (Proctor normal) e os valores de DR calculados a partir dos dados obtidos pelos demais métodos avaliados estão apresentados na Figura 9. Comparando todos os valores de DR, com a DR referencial obtida pela Dmax, encontrada pelo teste de Proctor normal, foram encontrados resultados semelhantes ao compararmos os valores de Dmax, onde somente a DR obtida pela metodologia do consolidômetro com preenchimento normal foi o que mais diferiu do DR referencial, enquanto os outros valores de DR foram semelhantes.

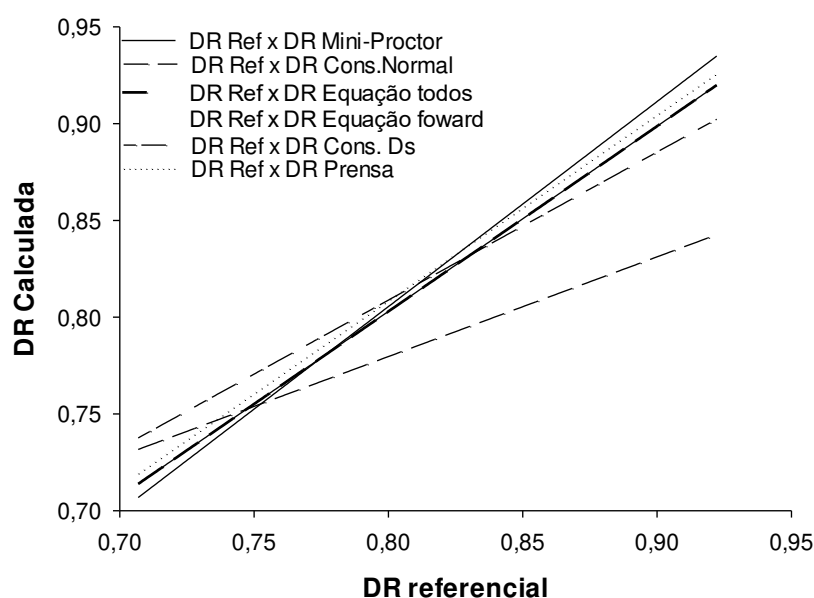


Figura 9 – Comparação entre os valores de DR referencial e DR calculada pelos diferentes métodos.

Os coeficientes de correlação para os valores de densidade relativa do solo (DR) para todos os métodos são apresentados na Tabela 3. Os coeficientes de correlação se situaram próximos a 1 para a maioria das variáveis, exceto para os valores de DR Cons. Ds e DR Cons. Normal. Os valores mais baixos de correlação foram da DR Cons. Ds (<0,62).

Tabela 3 - Coeficientes de correlação linear entre os valores de densidade relativa do solo.

	DR Referência	DR Mini- Proctor	DR Cons. Ds	DR Cons. Normal	DR Prensa	DR Equação todos	DR Equação forward
DR Referência	-	0,99	0,59	0,77	0,98	0,99	0,99
DR Mini-Proctor		-	0,59	0,81	0,98	0,99	0,99
DR Cons. Ds			-	0,54	0,616	0,61	0,61
DR Cons Normal				-	0,81	0,77	0,77
DR Prensa					-	0,98	0,97
DR Equação todos						-	0,99
DR Equação forward							-

*DR: densidade relativa do solo; Cons. Ds: Consolidômetro Ds; Cons. Normal: Consolidômetro normal.

A partir dos dados observados e considerando-se como valores de densidade relativa críticos de 0,84 a 0,87 kg dm⁻³ propostos por Marcolin e Klein (2011) para um Latossolo Vermelho, os solos argilosos avaliados nesse estudo apresentam boa qualidade física.

O gráfico que apresenta a relação entre os dados calculados e observados da densidade relativa mostra que há uma boa concordância na estimativa (Figura 10)

A utilização da DR como uma variável que caracteriza o grau de compactação do solo por meio da Ds e da Dmax (CARTER, 1990; FERRERAS et al., 2001), como o próprio conceito propõe, é relativa, visto que a definição de valores ótimos ou restritivos ao desenvolvimento das plantas dependerá das condições climáticas vigentes (TORRES; SARAIVA, 1999). Entretanto, o modelo proposto pode servir com um bom indicador do grau de compactação dos solos agrícolas.

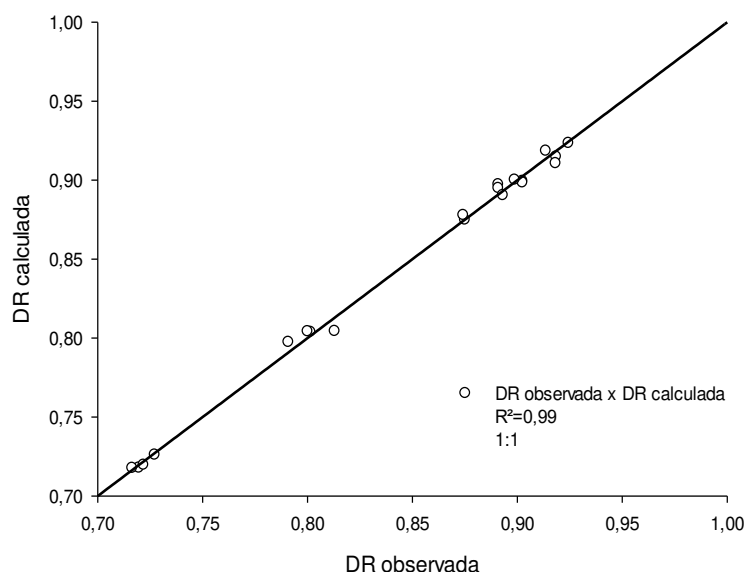


Figura 10 - Relação dos valores calculados versus valores observados de densidade relativa do solo (DR).

4. CONCLUSÕES

Os resultados de densidade máxima do solo pelos métodos Mini-Proctor, consolidômetro Ds e prensa hidráulica não diferiram dos encontrados pelo método do Proctor normal, considerado neste estudo como método padrão. Portanto, todos os métodos podem ser utilizados, preferencialmente o Mini-proctor e a prensa hidráulica.

A densidade máxima do solo pode ser estimada pela função de pedotransferência $D_{max} = 1,4919^{***} - 0,0142^{***} \cdot MO + 0,3193^{***} \cdot AF - 0,5466^{ns} \cdot SILTE - 0,5927^{ns} \cdot ADA - 0,6881^{***} \cdot EU + 0,1605^{***} \cdot DS$.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 7182/86 Solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro, p.10, 1986.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produção de soja. Rev. Bras. Ciên. Solo, Campinas, v. 29, p. 843 – 849, 2005.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. Elementos da natureza e propriedades dos solos. 3ª ed. Porto Alegre. Bookman. 2013.

- BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; REINERT, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio de Proctor. *Rev. Bras. Ciên. Solo*, v. 30, n. 4, p. 605-614, 2006.
- CARTER, M. R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Canadian J. Soil Sci*, v. 70, p. 425 – 433, 1990.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROÉCUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, Embrapa Solos. p. 230. 2011.
- FERRERAS, L. A.; BATTISTA, J. J.; AUSILIO, A.; PECORARI, C. Parámetros físicos del suelo en condiciones no perturbadas y bajo laboro. *Pesq. Agrop. Bras*, v. 36, n. 1, p. 161-170, 2001.
- FIGUEIREDO, L. H. A.; DIAS JÚNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. *Rev. Bras. Ciên. Solo*, v.24, n.3, p.487-493, 2000.
- HÂKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough player. *Soil Tillage Res.*, v. 16, p. 105-120. 1990.
- HÂKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil Tillage Res*, v. 53, p. 71-85, 2000.
- KLEIN, V. A. Densidade relativa – um indicador de qualidade física de um Latossolo Vermelho. *Rev. Ciên. Agrov. Lages*, v. 5, p. 26-32. 2006.
- KLEIN, V. A. Física do solo. Passo Fundo: Editora da Universidade de Passo Fundo, p. 212 2008.
- KLEIN, V. A. Propriedades do solo e manejo da água em ambientes protegidos com cultivo de morangueiro e figueira. Passo Fundo: ed. UPF, p. 61. 2005.
- LIBARDI, P. L. Dinâmica da água no solo. São Paulo: Edusp, 2005.
- LIPIEC, J.; HAKANSSON, 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 Res*, v. 19, p. 307 – 317, 1991.
- MARCOLIN, C. D.; KLEIN, A. V. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. *Acta Scient. Agron*, v.33, n.2, p.349-354, 2011.
- NANKO, K.; UGAWA, S.; HASHIMOTO, S.; IMAYA, A.; KOBAYASHI, M.; SAKAI, H.; ISHIZUKA, S.; MIURA, S.; TANAKA, N.; TAKAHASHI, M.; KANEKO, S. A pedotransfer function for estimating bulk density of forest soil in Japan affected by volcanic ash. *Geoderma*. v. 213, p. 36–45. 2014.
- NOGUEIRA, J. B. Mecânica dos solos: ensaios de laboratório. São Carlos: USP/EESC, 1998.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. Solo, planta e atmosfera: conceito, processo e aplicações. Barueri: Manole, 2004.

- SEQUEIRA, C. H.; WILLS, S. A.; SEYBOLD, C. A.; WEST, L. T. Predicting soil bulk density for incomplete databases. *Geoderma*. v. 213, p. 64–73. 2014.
- SILVA, A. P. da; KAY, B. D.; PERFECT, E. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. *Soil and Tillage Research*. Amsterdam, v. 44, p. 81-93, 1997.
- SILVA, S. G. C. Variação temporal da densidade do solo e do grau de compactação de um Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. Dissertação de mestrado. ESALQ. Piracicaba-SP. 2011.
- SILVA, V. R.; REINERT, D. J. & REICHERT, J. M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho- Amarelo. *Rev. Bras. Ciên. Solo*, v. 24. p. 239-249, 2000.
- SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. Glossary of soil science terms. Disponível em <<http://www.soils.org/sssagloss/>>. Acesso em 23 nov. 2016.
- SOUZA, R. A. Estudo comparativo dos ensaios de CBR e Mini-CBR para solos de Uberlândia-MG. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia-MG. 2007.
- SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; LIMA, C. L. R. de. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. *Pesq. Agrop. Bras.* Brasília, v. 42, p.1159-1167, 2007.
- TORRES, E.; SARAIVA, O. F. Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com a soja. Londrina: Embrapa Soja, 1999.
- VILLIBOR, D.F; NOGAMI, J. Pavimentos econômicos - tecnologia do uso dos solos finos lateríticos. São Paulo: Editora Arte & Ciência. 2009.
- XIANGSHENG, Y., GUOSHENG, I., YIN, L., YANYU, I. Pedotransfer Functions for Estimating Soil Bulk Density: A Case Study in the Three-River Headwater Region of Qinghai Province, China. *Pedosphere* Published by Elsevier B.V. and Science Press. p. 362 373. 2016.
- ZHAO, Y. KRZIC, M. BULMER, C. E. SCHIMIDT, M. G. SIMARD, S. W. Relative bulk density as a measure of compaction and its influence on tree height. Simon Fraser University. NRC Research Press. 2011.

CAPÍTULO II

GRAU DE COMPACTAÇÃO DO SOLO LIMITANTE PARA A CULTURA DO MILHO

RESUMO

Com a compactação, o sistema radicular tem seu crescimento limitado e um menor volume de solo pode ser explorado pelas raízes. Consequentemente, as plantas absorvem menos água e nutrientes, acarretando perda de potencial produtivo. Na cultura do milho os efeitos negativos da compactação do solo são observados no crescimento vegetativo da parte aérea e das raízes. Há redução do comprimento, diâmetro e distribuição de raízes e na taxa de absorção de nutrientes. O objetivo desse capítulo foi determinar o grau de compactação limitante ou crítico para a cultura do milho em solos de diferentes composições granulométricas. Amostras de dois solos (arenoso e argiloso) foram coletadas na camada de 0 a 20 cm de profundidade. Cada unidade experimental foi formada por tubos de PVC rígido (diâmetro de 10 cm) divididos em três anéis que foram preenchidos pelos solos. Os tubos foram formados pela união com fita adesiva de três anéis. O anel superior (altura de 5 cm) e o inferior (altura de 10 cm) foi preenchido para se alcançar a densidade de $1,0 \text{ kg dm}^{-3}$, enquanto o anel intermediário (altura de 10 cm) foi preenchido de forma a se obter os graus de compactação de 0,75; 0,80; 0,85 e 0,90. Após 45 dias de cultivo, a altura das plantas, número de folhas e o diâmetro dos colmos foram avaliados. As raízes recolhidas foram avaliadas quanto aos seguintes parâmetros morfológicos: diâmetro médio, comprimento, volume e área superficial. Não foi possível estabelecer o de grau de compactação limitante ou crítico para a cultura do milho no solo de textura mais grosseira, e sim um valor de grau de compactação ótimo ou desejável, próximo de 0,80. Muito embora o mesmo 0,80 de grau de compactação tenha sido considerado ótimo no solo argiloso para algumas características fitotécnicas das plantas do milho, a produção de biomassa foi sempre prejudicada em valores superiores a este.

Palavras-chave: Compactação; Densidade do solo; Qualidade física do solo

1. INTRODUÇÃO

O milho é uma das plantas mais cultivadas do mundo e a mais produzida nos países em desenvolvimento. O Brasil é o terceiro maior produtor de milho do mundo, tendo as regiões Sul e Centro-Oeste como as principais produtoras (FAO, 2016), muito embora o cultivo do grão seja também realizado em várias outras partes do país.

A degradação da qualidade física do solo, tanto em sistemas de cultivo mais tecnológicos como em cultivos de subsistência, pode afetar a produtividade de culturas tradicionais como o milho. Nos solos agrícolas, a compactação é uma das principais causas dessa degradação física do solo, estando associada ao aumento da densidade e da resistência do solo à penetração, além da redução da porosidade, da difusão de gases e da permeabilidade do solo (STONE et al., 2002).

Com a compactação o sistema radicular tem seu crescimento limitado e um menor volume de solo pode ser explorado pelas raízes. Consequentemente, as plantas absorvem menos água e nutrientes (HÂKANSSON et al., 1998), acarretando em perdas de potencial produtivo. Na cultura do milho os efeitos negativos da compactação do solo são observados no crescimento vegetativo da parte aérea e das raízes (FOLONI et al., 2003; FREDDI et al., 2007; BERGAMIN et al., 2010; NUNES, 2014); no comprimento, diâmetro e distribuição de raízes (SHIERLAW; ALSTON, 2004); e na taxa de absorção de nutrientes (CABRAL et al., 2012). As consequências da compactação para o crescimento das raízes têm sido associadas à deformações e ramificações, além de tornarem-se menos porosas e consumirem maior quantidade de oxigênio por unidade de peso do tecido fresco. Disto resulta a tendência de haver maior alocação de carbono no sistema radicular (NAWAZ et al., 2013).

A variável mais comumente avaliada em estudos de compactação é a densidade do solo e muitos são os trabalhos que a tratam como um indicador confiável. O crescimento de raízes ocorre no espaço poroso do solo, o qual será diminuído ou bastante restrito com o aumento da densidade do solo, resultando no aumento da resistência do solo à penetração das raízes. Efeitos da compactação sobre o crescimento radicular foram observados quando a densidade do solo atingiu $1,69 \text{ kg dm}^{-3}$ (FOLONI et al., 2003; FREDDI et al., 2009) ou mesmo $1,00 \text{ kg dm}^{-3}$ (ROSOLEM et al., 1999). O valor de $1,20 \text{ kg dm}^{-3}$ também foi indicado como definidor do início do decréscimo na altura de plantas de milho (SILVA et al., 2006). Por outro lado, os valores de densidade devem ser altos o suficiente para oferecer bom contato entre as raízes e as partículas de solo (STIRZAKER et al., 1996; KLUTHCOUSKI, 1998), favorecendo a absorção dos nutrientes pelas plantas.

A resistência do solo à penetração tem reconhecida e notória relação direta e inversa com o crescimento radicular (BERGAMIN et al., 2010), afetando também o metabolismo e as funções vitais da planta (COSTA et al., 2012). Desta relação surge a referência largamente adotada na literatura do valor de 2 MPa como sendo o limite crítico para o crescimento das plantas (TAYLOR et al., 1966; PABIN et al., 1998; LIMA et al., 2010). Tanto esse valor crítico como valores de densidade do solo ou de outras variáveis utilizadas nos estudos de qualidade física do solo têm sido recomendados sem, muitas vezes, considerar a textura do solo, bem como a variação inter e intraespecífica das plantas. No caso da resistência do solo à penetração, a umidade ainda é outro fator a influenciar qualquer conclusão, dificultando generalizações. Como destaca Dexter (1991), o crescimento de raízes pode ser inibido a valores de resistência do solo à penetração maiores que 1 MPa em solos secos, mas em solo com umidade maior pode haver alongamento radicular em valores entre 4 e 5 MPa.

Uma alternativa para a comparação dos efeitos da compactação em solos de diferentes texturas pode ser a utilização da densidade relativa (DR) ou grau de compactação (GC), obtidos pela relação entre a densidade do solo (D_s) e alguma densidade referência ou compactação máxima (D_{max}), onde $GC = DR \cdot 100$ (HÅKANSSON, 1990). Diferentemente de outros atributos edáficos, como a densidade do solo, porosidade e resistência à penetração, a determinação do grau de compactação é conveniente e considerada adequada para comparações, uma vez que é um valor relativo e independente da textura do solo (HÅKANSSON, 1990; SILVA et al., 1997; SUZUKI et al., 2013, OLIVEIRA et al., 2016).

Conhecer o estado de compactação do solo e identificar qual grau de compactação passa a reduzir o crescimento do sistema radicular das plantas pode minimizar os efeitos desse fenômeno associado à perda da qualidade física do solo (BERGAMIM et al., 2010).

Diante do exposto, o objetivo desse trabalho foi determinar o grau de compactação limitante ou crítico para a cultura do milho em solos de diferentes composições granulométricas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Amostras de dois Latossolos Vermelho-Amarelo (um arenoso e outro argiloso) coletadas na camada de 0 a 20 cm de profundidade foram utilizadas no presente estudo

(Tabela 1). Os solos foram secos ao ar e passados por peneira com abertura de malha de 4 mm para a utilização nos ensaios.

Tabela 1: Caracterização dos solos estudados

Solo	AG	AF	Silte	Argila	Dmax	UOC
	-----kg kg ⁻¹ -----				kg dm ⁻³	kg kg ⁻¹
LVA Argiloso	0,21	0,57	0,04	0,68	1,40	0,30
LVA Arenoso	1,77	0,21	0,13	0,09	1,84	0,10

*AG: Areia grossa; AF: Areia fina; Dmax: Densidade máxima do solo obtida pelo ensaio de compactação de Proctor normal; UOC: Umidade ótima de compactação.

As unidades experimentais foram formadas por tubos de PVC rígido (diâmetro de 10 cm) que foram preenchidos pelos solos. Os tubos foram formados pela união com fita adesiva de três anéis. O anel superior (altura de 5 cm) e o inferior (altura de 10 cm) foram preenchidos com massa de solo necessária para se alcançar a densidade de 1,0 kg dm⁻³, enquanto no anel intermediário (altura de 10 cm) foram acomodadas massas de solo de forma a se obter os graus de compactação de 75%; 80%; 85% e 90% (Figura 1).

Com os valores de densidade máxima e umidade ótima de compactação, calcularam-se as respectivas densidades do solo no anel intermediário necessárias para se atingir os graus de compactação definidos. Como os volumes dos anéis eram conhecidos, calculou-se a massa de solo necessária para se alcançar a densidade desejada. Uma vez separada, a massa de solo foi acondicionada em saco plástico, onde receberam água para se alcançar a umidade ótima de compactação. Os sacos plásticos foram mantidos vedados por 48 h e então acondicionados nos anéis intermediários para permitir a distribuição homogênea da água no solo.

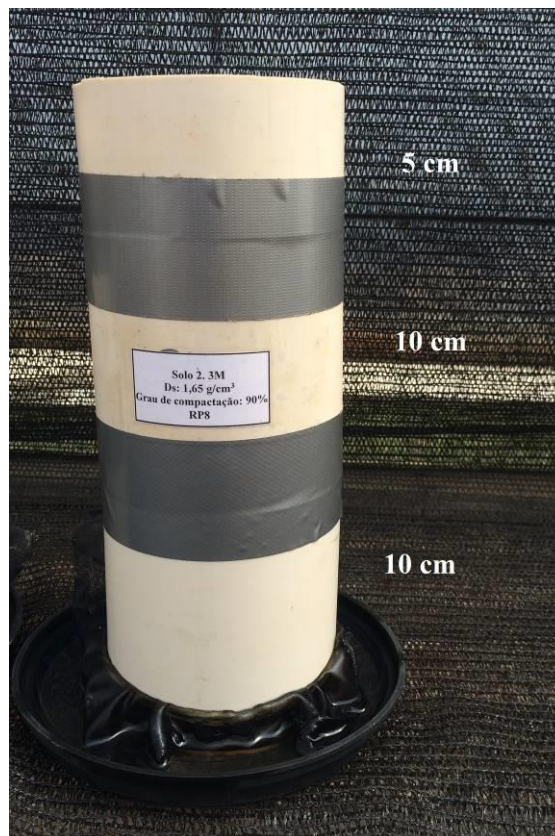


Figura 1 - Unidade experimental composta por três anéis de PVC preenchido com solo para o cultivo do milho.

No intuito de evitar o crescimento de raízes na região da parede dos tubos, adotou-se o procedimento sugerido por Alvarenga et al. (1996) e Foloni et al. (2003), que consiste do revestimento interno com uma camada de aproximadamente 2 mm de espessura de bentonita umedecida com água.

Os solos foram adubados e corrigidos quanto ao pH de forma a não limitar o desenvolvimento das plantas. Foram aplicados 200, 150 e 500, mg dm^{-3} de N, P e K, respectivamente, além da aplicação de micronutrientes (ALVAREZ V. et al., 1999). Neste sentido, todo o volume de solo utilizado em cada parcela experimental foi adubado, objetivando garantir uma distribuição homogênea dos nutrientes e condicionamento químico em todo o perfil do tubo, mesmo após a compactação.

A compactação do solo nos anéis intermediários foi realizada com o auxílio de uma prensa hidráulica Charlott PH de 15 t de capacidade. No procedimento de compactação do solo, eventuais espelhamentos provocados pela compressão foram eliminados com a escarificação leve da superfície das amostras.

As colunas foram montadas pela sobreposição dos anéis, fixados uns aos outros com a utilização de fita adesiva, e reservando-se 2 cm do anel superior, que ficou como espaço livre para o recebimento da água de irrigação. Na parte inferior de cada coluna de solo foi fixada uma tela antiafídeos com o auxílio de elásticos para evitar perdas de solo.

Sementes de milho BM 207, híbrido mais utilizado na região, foram inicialmente imersas em água destilada à temperatura ambiente por 24 h e, na sequência, colocadas sobre papel toalha umedecido e acondicionadas em bandejas cobertas por sacos plásticos, de modo a reduzir a contaminação e a perda de água. As sementes foram diariamente umedecidas até sua completa germinação, quando ocorreu o plantio nas colunas de solo. Cada unidade experimental recebeu quatro plântulas de milho. Aos 13 dias de cultivo foi realizado o desbaste, deixando-se duas plantas por coluna.

As plantas foram cultivadas por 45 dias com irrigação diária. Finalizado o cultivo, a altura das plantas e o diâmetro dos colmos foram avaliadas com a utilização de trena métrica graduada e paquímetro digital com precisão de 0,01 mm, respectivamente (Figura 2). O número de folhas também foi registrado ao final do experimento. A parte aérea foi colhida e levada para secagem em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C por 72 h para a obtenção da produção de massa de matéria seca da parte aérea.



Figura 2 - Determinação da altura das plantas (A) e do diâmetro do colmo (B) aos 45 dias de cultivo do milho.

Após o corte da parte aérea, as colunas foram desmontadas e os anéis sobrepostos foram separados (0-5, 5-15, 15-25 cm de profundidade). As raízes dos anéis superior e inferior foram recolhidas mediante lavagem em água corrente sobre peneira de 0,5 mm de malha. Após essa primeira lavagem, as raízes foram armazenadas em solução de etanol 20 % (v/v) para posterior limpeza, usando-se pinças e bandejas com água para remover pequenas impurezas aderidas às raízes que não foram removidas na lavagem inicial.

As raízes recolhidas de cada anel foram avaliadas quanto aos seguintes parâmetros morfológicos: diâmetro médio (mm), comprimento (cm), volume (cm³) e área superficial (cm²). A avaliação do sistema radicular foi efetuada por análise de imagens utilizando-se o software WinRhizo Pro 2009^a (Basic, Reg, Pro & Arabidopsis for Root Measurement) após escaneamento das raízes de cada anel (scanner EPSON expression 10000XL equipado com luz adicional (TPU) e com definição de 400 dpi).

Após a avaliação morfológica do sistema radicular, as raízes foram levadas para estufa para determinação da massa seca de raiz (MSR) que, juntamente com a massa seca da parte aérea (MSPA) permitiu o cálculo da massa seca total (MST) e da relação massa seca raiz/parte aérea (MSR/MSPA).

O experimento foi montado em delineamento em blocos casualizados, e esquema fatorial 2 x 4, correspondentes a dois solos e quatro graus de compactação, com quatro repetições. Os resultados foram submetidos à análise de variância e a avaliação do GC dentro de cada solo. Foi realizada por análise de regressão, a 5% de significância.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Efeito da compactação no sistema radicular de plantas de milho

Após 45 d de cultivo, a compactação afetou o comprimento, área superficial e volume de raízes do milho (Figura 3), variáveis que apresentam relação direta com o crescimento da planta. Quedas nos valores dessas variáveis podem comprometer a capacidade de absorção de água e reduzir o contato raiz-solo (ARVIDSSON; HÂKANSSON, 1991), com impacto direto na absorção de nutrientes e, portanto, na produtividade. Para os dois solos avaliados essas variáveis apresentaram ganhos até o valor de grau de compactação de 80%, seguido de suas reduções.

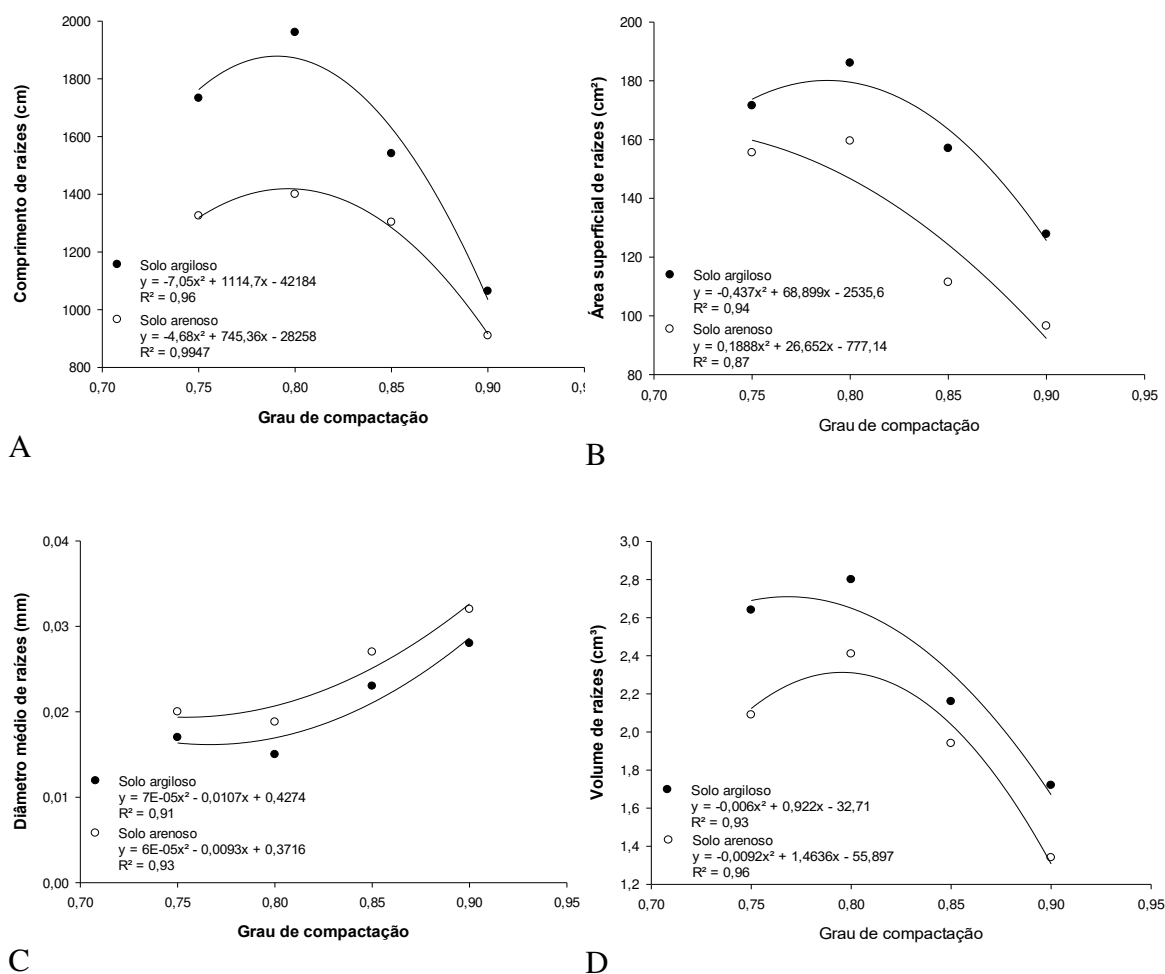


Figura 3 – Comprimento (A), área superficial (B), diâmetro médio (C) e volume de raízes de milho (D) em função do grau de compactação do solo.

A resposta quadrática verificada para as variáveis relacionadas a ganhos de produtividade permite a identificação da densidade relativa ótima ou grau de compactação ótima para o desenvolvimento radicular do milho. Uma vez atingido, qualquer incremento na compactação leva a perdas que tem reflexo na produtividade da cultura. Os dados obtidos indicam que melhor desempenho do sistema radicular foi obtido em valores de grau de compactação próximo 80 %. Diferentemente do observado no presente estudo, Rosolem et al. (1999) verificaram redução linear do comprimento da raiz seminal primária com o aumento da compactação, avaliada pelo incremento da densidade do solo de 1,07 para 1,38 kg dm⁻³ em Latossolo argiloso.

A redução do comprimento das raízes é um claro indicador de que a planta enfrenta problemas de resistência do solo à penetração (FOLONI et al., 2003). Essa redução pode ser crítica para o desenvolvimento das plantas. Redução de 50 % (DEXTER, 1987 e ROSOLEM et al., 1994) ou 40 % (PABIN et al., 1998) no

comprimento radicular pode ser considerada crítica para o desenvolvimento das plantas, podendo limitar a capacidade da cultura de expressar todo o seu potencial produtivo. Entretanto, tal generalização deve ser tomada com reserva, uma vez que, no presente estudo, a redução de 50 % no comprimento de raízes do milho foi alcançada somente próximo do maior valor de grau de compactação (0,9) para o solo argiloso (Figura 3A). Da mesma forma, Suzuki et al. (2013) verificaram a mesma taxa de redução em plantas de soja quando o grau de compactação alcançou 92 %.

A resposta do diâmetro médio das raízes ao incremento do grau de compactação divergiu das outras três variáveis morfológicas associadas ao sistema radicular (Figura 3C). O que se verificou foi o aumento dos valores de diâmetro com o incremento da compactação. Essa é uma resposta morfofisiológica esperada e já verificada em outros estudos (FOLONI et al., 2003; COSTA et al., 2012), nos quais comenta-se que o engrossamento das raízes pode ser um indicativo de que a espécie tem baixo potencial para estabelecer o sistema radicular em solos mais compactados. O incremento do diâmetro das raízes em resposta à compactação do solo dá-se pelo achatamento das células, causando o aumento do número de células por unidade de comprimento de raiz (BARBER, 1984; MATERECHERA et al., 1992).

Uma situação comum verificada para comprimento, área superficial e volume de raízes foi o fato de os maiores valores dessas variáveis terem sido observados no solo argiloso (Figura 3B e 3D). Como não houve limitação de água nem de fertilidade, os resultados indicam que as raízes se desenvolveram melhor no solo argiloso, situação não esperada. De todos os modos, a diferença entre os dois solos para comprimento de raízes diminuiu com o incremento do grau de compactação, indicando maior efeito da compactação no solo argiloso.

3. 2 Efeito da compactação na parte aérea de plantas de milho

A redução da produção da parte aérea é esperada em resposta à compactação (FOLONI et al., 2003; SOUZA et al., 2008). No presente estudo, a resposta da altura, número de folhas e diâmetro do colmo seguiu o mesmo padrão, ou seja, incremento inicial seguido de redução nos valores dessas variáveis (Figura 4), verificando-se também um ponto de grau de compactação ótima, assim como verificado para trigo por Bonfim-Silva (2014). Dessas variáveis, a altura da planta foi a que mais reduziu com o aumento do grau de compactação, sendo identificado decréscimo de 35 % em média para os dois solos, comparando o valor dessa grandeza para GC igual a 90% e o maior valor de altura alcançado (Figura 4A).

A melhor resposta das variáveis associadas ao crescimento da parte aérea foi verificada próximo do grau de compactação 80%. No primeiro nível de compactação avaliado o crescimento foi prejudicado, indicando haver a necessidade de compactação mínima para favorecer o desenvolvimento vegetal. Lindstrom e Voorhees (1994) sugerem que baixos valores de compactação - associados a densidades relativas menores do que 0,80, podem reduzir a produtividade de algumas culturas, uma vez que são frequentemente associados ao aumento excessivo da macroporosidade, o que reduz o movimento capilar de água no solo, reduzindo, por sua vez, a capacidade de armazenamento de água. Como o experimento foi conduzido em vasos e a umidade não foi limitante, possivelmente a melhor explicação seria que menor nível de compactação pode causar a redução do contato da raiz com o solo, prejudicando a absorção de nutrientes e água pelas plantas (FREDDI et al., 2007; 2009).

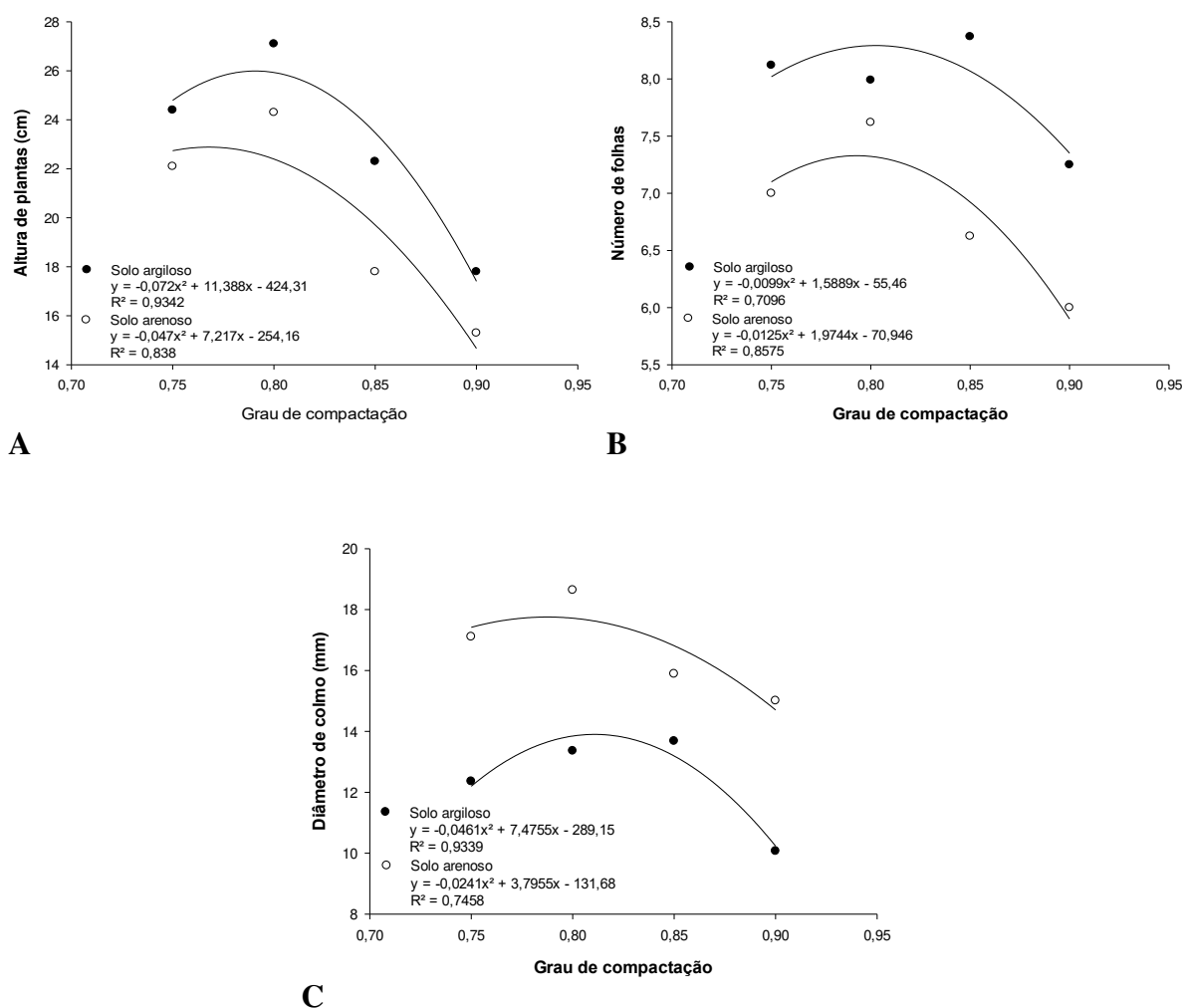


Figura 4 – Altura de plantas (A), número de plantas (B) e diâmetro de colmo (C) em resposta ao incremento do grau de compactação do solo.

Do exposto tem-se a dificuldade de se estabelecer um valor de grau de compactação limitante ou crítico para a cultura do milho, sendo mais adequado pensar-se em valor de grau de compactação ótimo ou desejável.

O número de folhas apresentou decréscimo de 15 % no solo argiloso e 22 % no arenoso quando se contrasta o valor verificado para o grau de compactação ótimo e o maior valor avaliado (Figura 4B). Esse decréscimo foi baixo se comparado ao incremento da compactação. Essa variável em condições não limitantes de água e nutrientes parece responder menos aos efeitos da compactação, concordando com Cortez et al. (2007), ao afirmarem que o número de folhas ao final do ciclo da cultura pode não ser influenciado pela densidade do solo, uma vez que essa é uma característica provavelmente determinada pela genética da planta de milho. Por outro lado, em condições de campo, a redução do número de folhas é frequente em resposta à compactação, como verificado para as gramíneas capim Mombaça (BONELLI et al., 2011) e arroz (RIBEIRO, 1999; MEDEIROS et al., 2005).

O diâmetro do colmo das plantas de milho foi a variável de menor decréscimo (10 %) para o solo arenoso e de 28 % para o solo argiloso na comparação entre o grau de compactação ótimo e o maior valor avaliado, o que sugere também sua baixa resposta à compactação (Figura 4C).

A comparação entre solos indica uma diversidade de resposta. Enquanto que no solo argiloso verificaram-se as maiores alturas de planta e número de folhas, independente do grau de compactação, no solo arenoso as plantas de milho exibiram maior diâmetro de colmo. O estreitamento do colmo no solo argiloso pode ser relacionado ao maior crescimento da planta

3. 3 Efeito da compactação na produção de biomassa de plantas de milho

A produção de massa seca da parte aérea (MSPA), das raízes (MSR) e total (MST) (parte aérea + raízes) do milho foi reduzida com o aumento do grau de compactação (Figura 5). Em condições de campo, essa é uma resposta esperada pois a compactação pode proporcionar a rápida depleção do conteúdo de água e de nutrientes disponíveis, pois limita-se o volume de solo explorado pelo sistema radicular, refletindo na produção da parte aérea. Desta forma, espera-se que a planta direcione seus fotoassimilados para o sistema radicular desfavorecendo o crescimento da parte aérea (STIRZAKER et al., 1996), muito embora esse ganho na partição de nutrientes não signifique obrigatoriamente ganhos de massa da raiz.

Não se verificou grau de compactação ótimo associado à produção de biomassa do milho no solo argiloso (Figura 5C). A resposta ao aumento da compactação foi sempre linear e negativa com o incremento do grau de compactação. Resultado de redução de produção com aumento da compactação foi verificada por Guimarães et al. (2001) em experimento de vasos preenchidos com Latossolo Vermelho textura franca ($0,23 \text{ kg kg}^{-1}$) para produção de biomassa da parte aérea de plantas de arroz. Por sua vez, o grau ótimo de compactação igual a 85% foi verificado por Silva et al. (2006) para produção de matéria seca da parte aérea de plantas de milho cultivado em vasos preenchidos com Latossolo Vermelho de textura média ($0,32 \text{ kg kg}^{-1}$ de argila).

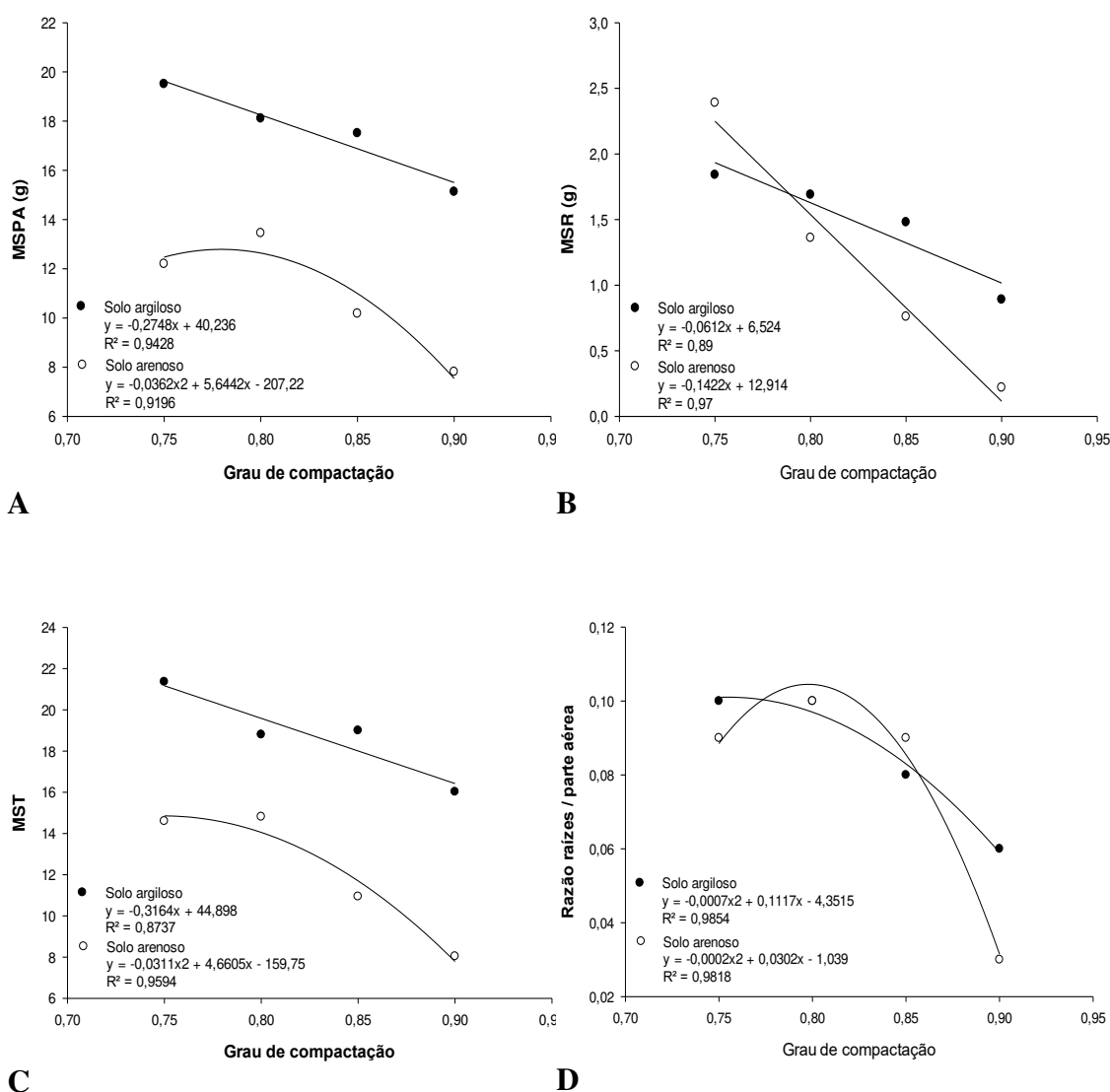


Figura 5 – Desenvolvimento das plantas de milho em resposta ao incremento do grau de compactação. MSPA = massa seca da parte aérea (A), MSR = massa seca de raiz (B), MST = massa seca total (C) e razão raízes/parte aérea (D).

Por outro lado, para o solo arenoso avaliado, tanto na matéria seca da parte aérea (Figura 5A) como na matéria seca total (Figura 5C), o grau ótimo de compactação foi aproximadamente de 80%. O grau de compactação ótimo para o rendimento das culturas foi verificado por Carter (1990) em trabalho pioneiro ao estudar plantas de cevada e trigo. Esse autor indicou valores de densidade relativa entre 0,77 e 0,84, respectivamente, como ideais para o cultivo desses cereais.

Ausência de respostas ao incremento da compactação também são verificadas na literatura. Nesse sentido, Gonçalves et al. (2006) verificaram que a produção de biomassa de plantas de milho e capim pé-de-galinha cultivadas em vasos não responderam ao aumento dos níveis de densidade de um Latossolo Vermelho distroférico textura muito argilosa.

A produção de biomassa de raízes do milho respondeu somente negativamente ao aumento do grau de compactação nos dois solos avaliados (Figura 5B). Isto contrasta com o resultado de Foloni et al. (2003), que não observaram resposta ao aumento da compactação na biomassa de raízes de plantas de milho cultivadas em Latossolo Vermelho distroférico de textura média, em condições de campo. O resultado do presente estudo sugere a maior sensibilidade do sistema radicular comparado a parte aérea como indicadores dos efeitos da compactação do solo. Na comparação dos dois solos, o solo arenoso foi o que apresentou o maior decréscimo de produção de raízes, perdendo 87 % de massa entre os níveis menor e maior de compactação avaliado, enquanto a perda no solo argiloso foi de 50 %. Perdas na massa de raízes de plantas de soja cultivadas em vasos com Latossolo Amarelo argiloso também foi verificada por Oliveira et al. (2015) e equivalentes a 47 e 60 % nos graus de compactação de 90% e 100%, respectivamente.

3. 4 Efeito da compactação no desenvolvimento de raízes na coluna de solo

A análise dos dados obtidos indicou haver diferença entre os três anéis quanto aos valores de todas as variáveis associadas às raízes. Portanto, os níveis de compactação aplicados no anel intermediário (anel 2) afetaram a distribuição e características do sistema radicular das plantas de milho.

O anel compactado reduziu o comprimento, área superficial e volume de raízes nos dois solos avaliados, em comparação aos anéis superior e inferior (Figuras 6 e 7). Isto apresenta impacto direto sobre o potencial produtivo da cultura, uma vez que compromete o volume de solo a ser explorado tanto para a absorção de água como de

nutrientes. A produção de biomassa de raízes também foi prejudicada pela compactação do anel intermediário.

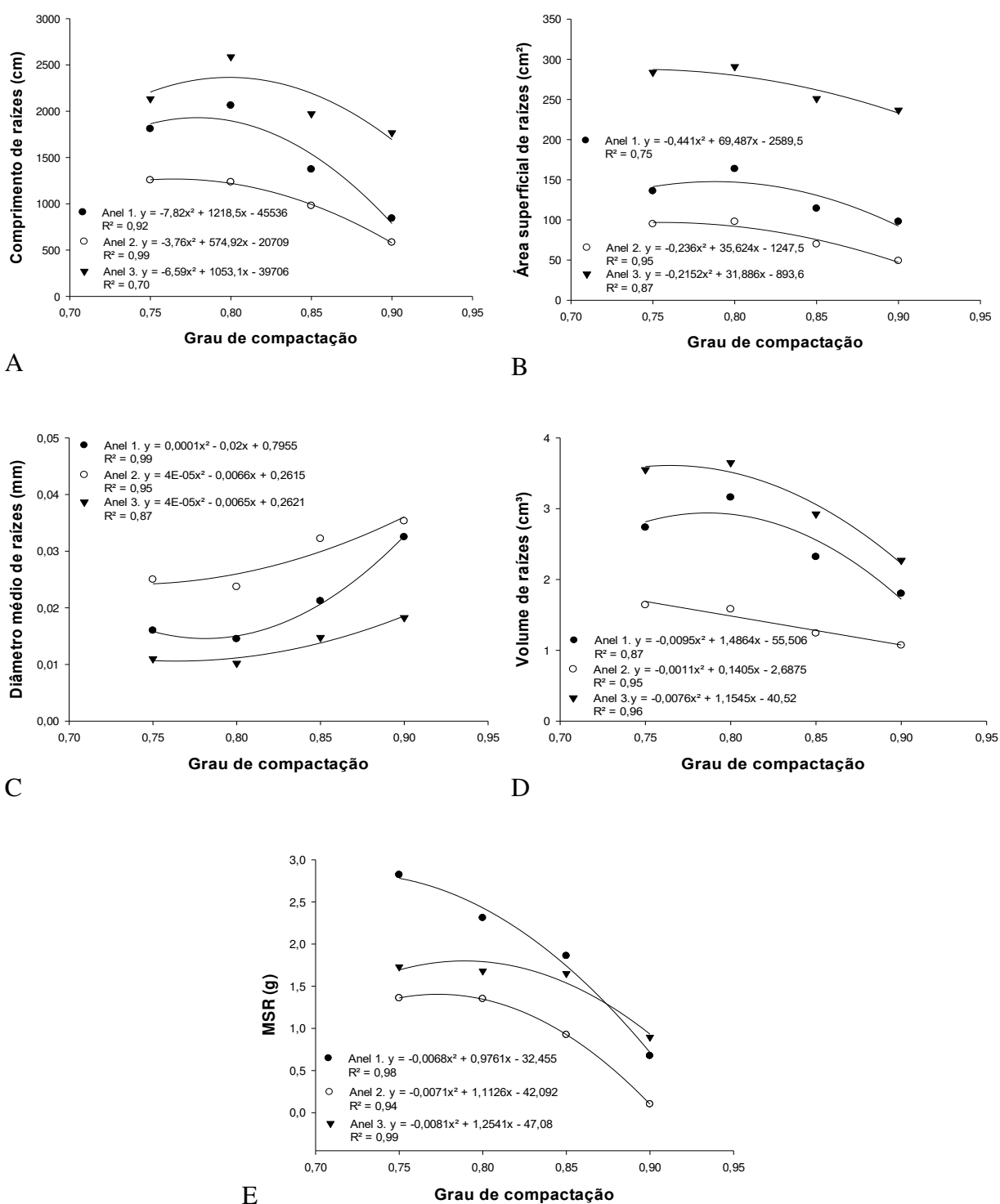
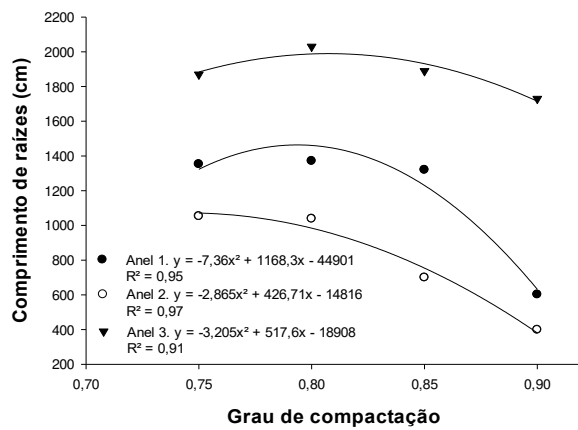
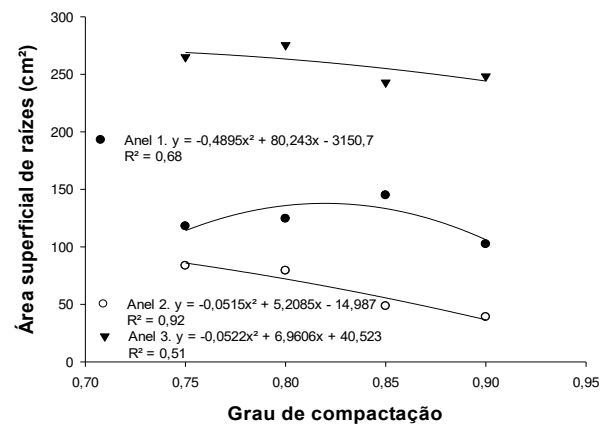


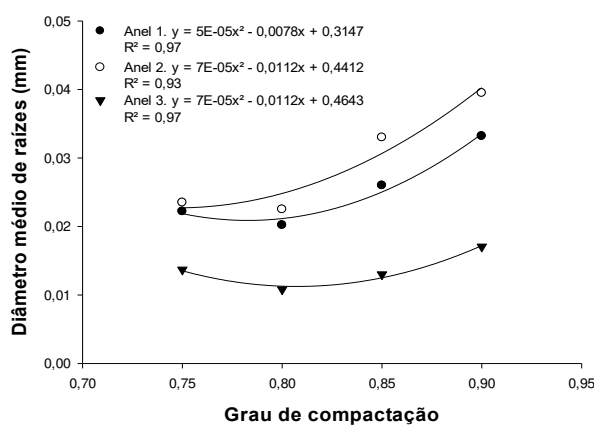
Figura 6 – Comprimento (A), área superficial (B), diâmetro médio (C), volume (D) e massa seca de raízes (MSR) (E) do milho em função do grau de compactação do solo para três anéis da coluna em solo argiloso.



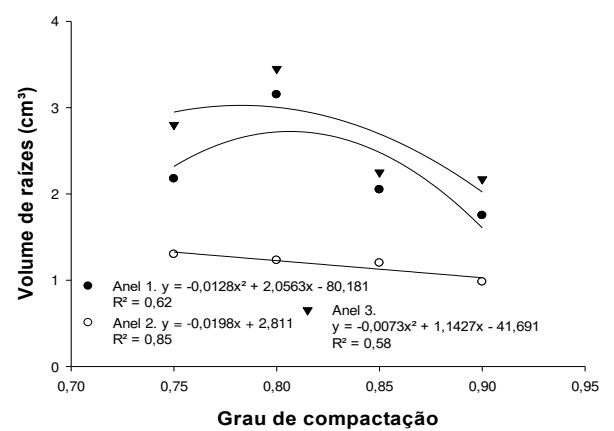
A



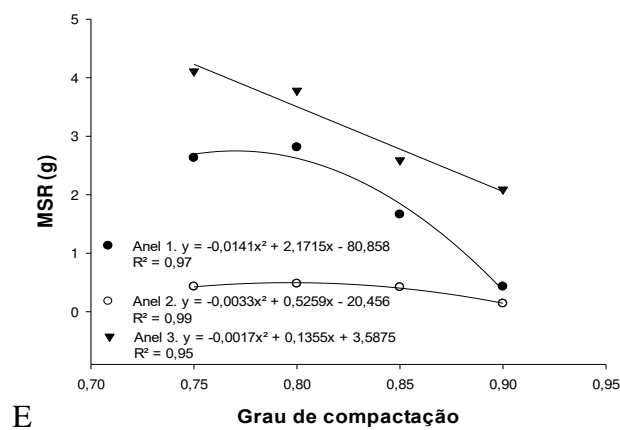
B



C



D



E

Figura 7 - Comprimento (A), área superficial (B), diâmetro médio (C), volume (D) e massa seca de raízes (MSR) (E) do milho em função do grau de compactação do solo para três anéis da coluna em solo arenoso.

Dentre as variáveis avaliadas, apenas o diâmetro médio das raízes foi incrementado com a compactação aplicada no mesmo anel em comparação aos demais. Isto é resultado direto do aumento da resistência do solo à penetração, que acarreta o engrossamento da raiz pela dificuldade do meristema apical crescer na condição adversa.

A compactação aplicada na camada compactada (anel 2) causou maior acúmulo de raízes nas camadas suprajacente e subjacente. Resultado semelhante foi verificado por Rosolem et al. (2003) em trabalho com leguminosas cultivadas em Latossolo Vermelho textura Franco-arenosa. Essa dificuldade das raízes de penetrar verticalmente em camadas de solo artificialmente compactadas em ensaios com vasos de curta duração é frequentemente observada (ROSOLEM et al., 1994; ROSOLEM et al., 2003). Em condições de campo, a planta pode encontrar caminhos alternativos que podem minimizar o efeito da compactação, ou como indicado por Shierlaw e Alston (2004), a compactação pode determinar a maior produção de raízes finas que encontram maior facilidade para vencer os obstáculos do aumento da resistência à penetração.

Incrementos nos valores de comprimento, área superficial e volume de raízes foram verificados no anel inferior do solo argiloso. Isto pode ser relacionado ao fato de a planta buscar recuperar o estresse ocasionado pela compactação (ROSOLEM et al., 1994). Situação semelhante ocorreu no solo arenoso para diâmetro e área superficial de raízes.

Observação interessante é que não houve diferença expressiva entre os solos avaliados quanto à resposta ao incremento do grau de compactação para as variáveis comprimento, área superficial e volume de raízes. Apenas para a biomassa de raízes, é que no solo argiloso verificou-se maior produção. Esse resultado parece sugerir que embora a massa de raízes seja sensível às diferenças entre solos de texturas contrastantes, o mesmo não ocorre para as características morfológicas do sistema radicular das plantas de milho.

4. CONCLUSÕES

Não se conseguiu estabelecer um valor de grau de compactação limitante ou crítico para a cultura do milho no solo de textura mais grosseira, e sim um valor de grau de compactação ótimo ou desejável, próximo de 80%.

Muito embora o mesmo 80% de grau de compactação tenha sido considerado ótimo no solo argiloso para algumas características fitotécnicas das plantas do milho, a produção de biomassa foi sempre prejudicada com o incremento da compactação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARENGA, R. C.; COSTA, L. M.; MOURA FILHO, W.; REGAZZI, A. J. Crescimento de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. Campinas, v. 20, p. 319-326. 1996.
- ALVAREZ V., V.H.; DIAS, L.E.; RIBEIRO, C.A.; SOUZA, R.B. de. Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5. Aproximação. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, p. 314-317.1999.
- ARVIDSSON, J.; HÅKANSSON, I. A model for estimating crop yield losses caused by soil compaction. *Soil Till. Res.* v. 20, p. 319–332. 1991.
- BARBER, S.A. Soil nutrient bioavailability, a mechanistic approach. New York, John Wiley e Sons. p. 398. 1984.
- BERGAMIN, A. C; VITORINO, A. C. T.; LEMPP, B.; DE SOUZA, C. M. A.; DE SOUZA, F. R. Anatomia radicular de milho em solo compactado. *Pesq. Agrop. Bras.* v. 45, p. 299–305, 2010.
- BONELLI, E. A.; BONFIM-SILVA, E. M.; CABRAL, C. E. A.; CAMPOS, J. J.; SCARAMUZZA, W. L. P.; POLIZEL, A.C. Compactação do solo: Efeitos nas características produtivas e morfológicas dos capins Piatã e Mombaça. *Rev. Bras. Eng. Agríc.e Amb.* v. 15, p. 264-269, 2011.
- BONFIM-SILVA, E. M.; ANICÉSIO, E. C. A.; SILVA, F. C. M.; DOURADO, L. G. A.; AGUERO, N. F. Compactação do solo na cultura do trigo em Latossolo do Cerrado. *Enciclop. Biosf.* v. 7, p. 1-8, 2011.
- CABRAL. E. A; BONFIM-SILVA, E. M.; BONELLI, E. A.; SILVA, T. J. A. DA; CABRAL, C. H. A.; SCARAMUZZA, W. L. M. P. Compactação do solo e macronutrientes primários na *Brachiaria brizantha* cv. Piatã e *Panicum maximum* cv. Mombaça. *Rev. Bras. Eng. Agríc.e Amb.* v. 16, p. 362-367, 2012.
- CARTER, M. R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Canadian Journal Soil Sci.* v. 70, p. 425 – 433, 1990.
- CORTEZ, J. W.; SILVA, R. P.; CARVALHO FILHO, A.; FURLANI, C. E. A.; FREITAS, SAYMON SEVERINO. Avaliação da influência de cargas verticais sobre diferentes rodas compactadoras no ciclo de semeadura do milho. *Ciênc. e Agrotec.* v. 31, p. 1155-1160, 2007.
- COSTA, M. A. T.; TORMENA, C. A.; LUGÃO, S. M. B.; FIDALSKI, J.; NASCIMENTO, W. G., MEDEIROS, F. M. Resistência do solo à penetração e

- produção de raízes e de forragem em diferentes níveis de intensificação do pastejo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. v. 36, p. 993–1004, 2012.
- DEXTER, A. R. Amelioration of soil by natural processes. *Soil and Tillage Research*, v. 20, p. 87-100. 1991.
- DEXTER, A. R. Mechanics of root growth. *Plant Soil*. v. 98, p. 303–312. 1987.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). FAOSTAT Online Statistical Service. Rome: FAO. Available at: <http://faostat.fao.org/>, 2016.
- FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C.; LIMA, S. L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. *Pesq. Agrop. Bras.* v. 38, p. 947-953, 2003.
- FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F. ALMEIDA, C. X. Compactação de um Latossolo Vermelho de textura argilosa afetando o sistema radicular e a produtividade do milho. *Rev. Ceres, Viçosa*, v. 56, n.5, p. 654-665. 2009.
- FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; ARATANI, R. G.; LEONEL, C. L.; SILVA, A. P. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo no crescimento e na produtividade da cultura do milho. *Bragantia*, v. 66, p. 477-486, 2007.
- FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; DUARTE, A. P.; LEONEL, C. L. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v. 33, p. 793-803, 2009.
- GONÇALVES, W. G.; JIMENEZ, R. L.; ARAÚJO FILHO, J. V.; ASSIS, R. L.; SILVA, G. P.; PIRES, F. R. Sistema radicular de plantas de cobertura sob compactação do solo. *Eng. Agríc.*, v. 26, p. 67-75, 2006.
- GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do arroz de terras altas. *Pesq. Agrop. Bras. Brasília*, v. 36, n. 4, p. 703-707, 2001.
- HÂKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil Tillage Res.*, v. 16, p. 105-120. 1990.
- HÂKANSSON, I.; STENBERG, M.; RYDBERG, T. Long-term experiments with different depths of mouldboard ploughing in Sweden. *Soil and Tillage Research*, v. 46, p. 209-223, 1998.
- KLUTHCOUSKI, J. Efeito do manejo em alguns atributos de um Latossolo Roxo sob cerrado e nas características produtivas de milho, soja, arroz e feijão, após oito anos de plantio direto. Tese (Doutorado em Fitotecnia) ESALQ-Piracicaba, SP. 1998.
- LIMA, C. L. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S. Produtividade de culturas e resistência à penetração de Argissolo Vermelho sob diferentes manejos. *Pesq. Agrop. Bras.* v. 45, p. 89–98, 2010.

- LINDSTROM, M. J.; VOOHEES, W. B. Response of temperate crops in North America to soil compaction. In: SOANE, B. D.; OUWERKERK, C. Soil compaction in crop production. London: Elsevier, v. 12, p. 265-286, 1994.
- MATERECHERA, S. A.; ALSTON, A. M.; KIRBY, J. M. & DEXTER, A. R. Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into compacted subsoil. *Plant and Soil*, v. 144, p. 297-303. 1992.
- MEDEIROS, R. D.; SOARES, A. A.; GUIMARÃES, R. M. Compactação do solo e manejo da água. I: Efeitos sobre a absorção de N, P, K, massa seca de raízes e parte aérea de plantas de arroz. *Ciê. Agrotéc.* v. 29, p. 940-947, 2005.
- NAWAZ, M. F.; BOURRIÉ, G.; TROLARD, F. Soil compaction impact and modeling. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 2013.
- NUNES, J. A. S. Desenvolvimento da cultura do milho sob níveis de densidade e tensões de água em Latossolo Vermelho de cerrado. Dissertação de mestrado. UFMT-Rondonópolis, MT, 2014.
- OLIVEIRA, P. D.; SATO, M. K.; LIMA, H. D.; RODRIGUES, S.; SILVA, A. P. Critical limits of the degree of compactness and soil penetration resistance for the soybean crop in N Brazil. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* v. 179, p. 78–87. 2016.
- PABIN, J.; LIPIEC, J.; WL /ODEK, S.; BISKUPSKI, A.; KAUS, A. Critical soil bulk density and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors. *Soil Till. Res.* v. 19, p. 131–143. 1998:
- RIBEIRO, M. A. V. Resposta da soja e do eucalipto a fósforo em solos de diferentes texturas, níveis de densidade e de umidade. 1999. 71 F. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Lavras: Universidade Federal de Lavras, 1999.
- ROSOLEM, C. A.; ALMEIDA, A. C. S.; SACRAMENTO, L. V. S. Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. *Bragantia*. v. 53, p. 259–266. 1994.
- ROSOLEM, C. A.; FERNANDEZ, E. M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C. A. C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. *Pesq. Agrop. Bras.* v. 34, p. 821-828, 1999.
- ROSOLEM, C. A.; MATEUS, G. P.; GODOY, L. J. G.; FELTRAN, J. C.; BRANCALÃO, S. R. Morfologia radicular e suprimento de potássio às raízes de milho de acordo com a disponibilidade de água e potássio. *Rev. Bras. Ciênc. Solo.* v. 27, p. 875-884, 2003.
- SHIERLAW, J.; ALSTON, A. M. Effects of soil compaction on root growth und uptake of phosphorus. *Plant and Soil*, v. 77, p. 15-28, 2004.

- SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. *Soil and Tillage Research*. Amsterdam, v. 44, p. 81-93, 1997.
- SILVA, G. J.; MAIA, J. C. S.; BIANCHINI, A. Crescimento da parte aérea de plantas cultivadas em vaso, submetidas à irrigação subsuperficial e a diferentes graus de compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v. 30, p. 31-40, 2006.
- 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*, v. 8 p. 94-100, 2008.
- STIRZAKER, R. J.; PASSIOURA, J. B.; WILMS, Y. Soil structure and plant growth: Impact of bulk density and biopores. *Plant and Soil*. Dordrecht, v. 185, p. 151-162, 1996.
- STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M. & MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: Efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. *R. Bras. Eng. Agric. Amb.* v. 6. p. 207-212, 2002.
- SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Degree of compactness, soil physical properties and yield of soybean in six soils under no-tillage. *Soil Res.* v. 51, p. 311–321, 2013.
- TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER JR. J. J. Soil strengthroot penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. *Soil Sci.* v. 102, p. 18–22. 1966.
- TORMENA, C. A. Caracterização e avaliação do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo. 106f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. 1998.

CONCLUSÃO GERAL

Como não se verificaram diferenças significativas entre os métodos de compactação de solo em relação ao Proctor normal, todos os métodos avaliados podem ser utilizados para a determinação, devendo serem preferidos o Mini-proctor ou a prensa hidráulica, pela facilidade.

Não se conseguiu estabelecer um valor de grau de compactação limitante ou crítico para a cultura do milho no solo de textura mais grosseira, e sim um valor de grau de compactação ótimo ou desejável, próximo de 0,80.

Muito embora o mesmo 0,80 de grau de compactação tenha sido considerado ótimo no solo argiloso para algumas características fitotécnicas das plantas do milho, a produção de biomassa foi sempre prejudicada com o incremento da compactação.