



UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS

**GRAUS DE COMPACTAÇÃO E ADUBAÇÃO
FOSFATADA NO CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO
DO MILHO (*Zea mays* L.) EM SOLOS
DISTINTOS**

GISLENE APARECIDA DOS SANTOS

2001

GISLENE APARECIDA DOS SANTOS

**GRAUS DE COMPACTAÇÃO E ADUBAÇÃO FOSFATADA NO
CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DO MILHO (*Zea mays* L.)
EM SOLOS DISTINTOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Agronomia, área de concentração Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de "Mestre".

Orientador

Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Junior

**LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL**

2001

Santos, Gislene Aparecida dos

Graus de compactação e adubação fosfatada no crescimento e nutrição do milho (*Zea mays* L.) em solos distintos / Gislene Aparecida dos Santos. -- Lavras : UFLA, 2001.

80 p. : il.

Orientador: Moacir de Souza Dias Junior.

Dissertação (Mestrado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Milho. 2. Grau de compactação. 3. Adubação fosfatada. 4. Crescimento. 5. Nutrição mineral. I. Universidade Federal de Lavras. II.

Título.

CDD-633.15895

GISLENE APARECIDA DOS SANTOS

**GRAUS DE COMPACTAÇÃO E ADUBAÇÃO FOSFATADA NO
CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO DO MILHO (*Zea mays* L.)
EM SOLOS DISTINTOS**

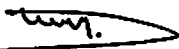
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Agronomia, área de concentração Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de "Mestre".

APROVADA em 22 de fevereiro de 2001

Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Junior DCS/UFLA

Prof. Dr. Antonio Eduardo Furtini Neto DCS/UFLA.

Prof. Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães EPAMIG



Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Junior
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL

Aos meus pais Ikson e Maria Leonilda.

Aos meus irmãos Lucilene, Miridilene, Ikson e Amilson

Aos meus tios Carlos e Carmem

Pelo carinho, compreensão, apoio e incentivo

Dedico

A Deus
Ofereço

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Ciência do Solo pela oportunidade concedida.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa.

À Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) pelo apoio financeiro na execução deste trabalho.

Ao professor Moacir de Souza Dias Junior pelo incentivo, orientação, empreendimento e sugestões indispensáveis na realização de todas as fases deste trabalho.

Ao pesquisador Paulo Tácito Gontijo Guimarães e ao Prof. Antonio Eduardo Furtini Neto pelo grande apoio amizade e dedicação.

A todos os professores e funcionários que acreditaram, apoiaram e se dedicaram à minha formação.

Aos colegas de mestrado e doutorado pela amizade, compreensão, apoio, colaboração e sugestões, em especial: Geraldo César, Marcos Kondo, Reginaldo e Alcivânia, Elka Élice, Wellington, Serginho, Isabel e Duda.

Ao amigo Túlio pela preciosa colaboração na execução deste trabalho.

Aos amigos Guadalupe, Rosana, Luciana, Avelino, Binho e família, Rosa e Juliana, Fatinha, Dulce, Carlos Spaggiari, Arystides, Fábio pelo incentivo de sempre.

À Dulce e ao Delanne pelo apoio e incentivo.

Ao amigo Jairinho "in memoriam", pelos momentos de alegria

Por último e não menos importante a todos aqueles os quais me auxiliaram de alguma maneira direta ou indiretamente nesta conquista.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	i
ABSTRACT	iii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO	3
3 MATERIAL E MÉTODOS	10
3.1 Solos, seus atributos e características	10
3.2 Análises preliminares de laboratório:	12
3.3 Montagem dos experimentos	15
3.4 Condução do experimento	17
3.5 Coleta de dados	17
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
4.1 Neossolo Quartzarênico.....	18
4.1.1 Matéria Seca Total.....	18
4.1.2 Matéria Seca da Parte Aérea	20
4.1.3 Teor de fósforo na parte aérea.....	23
4.1.4 Fósforo Acumulado na Parte Aérea.....	24
4.1.5 Razão de penetração de Raiz.....	26
4.1.6 Matéria Seca da Raiz.....	28
4.2 Latossolo Vermelho Amarelo distrófico.....	33
4.2.1 Matéria Seca Total.....	33
4.2.2 Matéria Seca da Parte Aérea	34

4.2.3 Teor de P na Parte Aérea.....	37
4.2.4 Fósforo Acumulado na Parte Aérea.....	38
4.2.5 Razão de Penetração de Raiz.....	40
4.2.6 Matéria Seca da Raiz.....	42
4.3. Latossolo Vermelho distrófico típico.....	46
4.3.1 Matéria Seca Total.....	46
4.3.2 Matéria Seca da Parte Aérea	47
4.3.3 Teor de P na Parte Aérea.....	50
4.3.4 Fósforo Acumulado na Parte Aérea.....	51
4.3.5 Razão de Penetração de Raiz.....	51
4.3.6 Matéria Seca da Raiz.....	54
5 CONCLUSÕES.....	59
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
7 ANEXOS	74

RESUMO

SANTOS, Gislene Aparecida dos. **Graus de compactação e adubação fosfatada no crescimento do milho (*Zea mays L.*) em solos distintos.**

Lavras: UFLA, 2001. 80p. (Dissertação - Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)¹.

Para avaliar o efeito do grau de compactação no crescimento do milho (*Zea mays L.*), utilizou-se à variedade de milho Híbrido Simples C 909. Foram utilizadas amostras da camada de 0 a 20 cm de três solos de diferentes texturas: um argiloso (Latossolo Vermelho distrófico típico - LVd), um com textura média (Latossolo Vermelho Amarelo distrófico - LVAd), ambos originários no campus da UFLA, e outro arenoso (Neossolo Quartzarênico - RQ), originário do município de Itutinga (MG). O material do solo foi caracterizado química e fisicamente para montagem dos vasos. Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação, utilizando-se os seguintes graus de compactação: para a Neossolo Quartzarênico foram utilizados (GC = 72%; 75%; 85% e 95%) e para o Latossolo Vermelho Amarelo distrófico e Latossolo Vermelho distrófico típico (GC = 65%; 75%; 85% e 95%). Estas determinações foram feitas em laboratório para cada tipo de solo, através da curva de compactação obtida através do ensaio de Proctor normal. O delineamento experimental usado para os três solos foi o inteiramente casualizado, arranjado em esquema fatorial 4x4x3, sendo quatro graus de compactação, quatro doses de fósforo e três repetições, para cada solo. A fertilização com o fósforo foi distinta entre os solos. Para LVd e LVAd, as doses corresponderam a 0, 100, 200 e 400 mg dm⁻³; para o RQ, as doses foram 0, 50, 100 e 200 mg dm⁻³. Concluiu-se que quanto maior o grau de compactação, maiores terão que ser as doses de fósforo aplicadas, para uma produção satisfatória. O fósforo aplicado funcionou como um fator de alívio da compactação do solo, resultando em uma maior produção para um mesmo grau de compactação.

¹ Comitê de orientação: Moacir de Souza Dias Junior – UFLA (orientador), Antonio Eduardo Furtini Neto – UFLA, Paulo Tácito Gontijo Guimarães – EPAMIG

ABSTRACT

SANTOS, Gislene Aparecida dos. Degrees of compaction and P-fertilization in the maize (*Zea mays L.*) growth in different soils.

Lavras: UFLA, 2001. 80p. (Dissertation – Master of Science in Soil and Plant Nutrition)¹.

To evaluate the of degree of compaction effect in the growth of maize crop (*Zea mays L.*), it was used the Simple Hibrid maize C 909 variety. Samples of the 0-0.20m depth of three soils with different texture were used: a clay soil (Red Latossol distrofic), a loamy soil (Red Yellow Latossol distrofic), both located in the UFLA Campus and a sandy soil (Neossolo Quartzarênico) located in the Itutinga County, MG. The experiment was carried out in a green house. The soils used to assembled the pots were chemistry and physically characterized. The degrees of compaction used were (DC = 72%; 75%; 85% and 95%) for the sandy soil and (DC = 65%; 75%; 85% and 95%) for the clay soil and loamy soil. The determination of the degree of compaction was made in labortory using the soil compaction curve obtained in the normal Proctor test. The experimental design used was a complete randomized arranged scheme 4x4x3, being four degrees of compaction four P doses an three replications. The P supply was different for the soils. The applied P for the clay soil and loamy soil was 0, 100, 200 and 400 mg dm⁻³ and 0, 50, 100 and 200 mg dm⁻³ for the sandy soil. It was observevd that as the degrees of compaction increases, the applied P increases in order to obtain a satisfactory crop production. The applied P alleviated the soil compaction effects of compaction.

¹ Guidance Commitee: Moacir de Souza Dias Junior – UFLA (Major Professor), Antonio Eduardo Furtini Neto – UFLA, Paulo Tácito Gontijo Guimarães – EPAMIG

1 INTRODUÇÃO

O bom crescimento e desenvolvimento das plantas, levando-as a produzir grãos, fibras e outros produtos comerciáveis, são dependentes de vários fatores ambientais. A absorção de nutrientes é um dos principais fatores necessários para uma boa produção, sendo que obstáculos ao desenvolvimento radicular podem restringir tal absorção (Camargo e Alleoni, 1997).

Algumas plantas têm a habilidade em absorver fósforo em camadas compactadas com é o caso do milho, pois suas raízes tem a habilidade de se desenvolverem dentro das camadas compactadas (Shierlaw e Alston, 1984).

A compactação em solos explorados pela agropecuária ocorre quando estes sofrem compressão pela passagem de máquinas agrícolas, pastoreio e até pelo homem. Durante a compressão, partículas do solo são rearranjadas e pressionadas umas contra as outras, ocorrendo redução da porosidade total do solo. Esta redução da porosidade total é devida a uma redução do volume de macroporos, enquanto os microporos permanecem inalterados (Hillel, 1982)

Os ensaios mais utilizados para estudar a compactação do solo em laboratório têm sido o ensaio de Proctor Normal e o ensaio de compressão uniaxial. Neste estudo, ênfase será dada ao ensaio de Proctor Normal, devido ao fato de ser possível, através dele, obter camadas compactadas com diferentes graus de compactação para assemelhar o efeito destas no desenvolvimento das culturas.

O ensaio Proctor Normal é rotineiramente utilizado na Engenharia Civil, seu uso na agricultura tem sido restrito. Apesar disso, algumas pesquisas tem sido conduzidas para fins agrícolas (Raghavan et al.,1990; Figueiredo, 1998), Novak, 1989),

Experimentos tradicionais para verificar o efeito da compactação do solo sobre o desenvolvimento das plantas têm utilizado a densidade do solo como

indicador da sua compactação (Warncke e Oliveira, 1972; Hira e Smigh, 1977; Salles, Ortolan e Coan, 1981; Cornish et al., 1984; Primavesi et al., 1984; Pedó, 1986; Moraes, 1988; Rosolem et al., 1994; Seiffert, 1995; Fernandez et al., 1995; Kothari e Sing, 1996; Borges, 1997; Carvalho et al., 1998; Laboski et al., 1998; Pabin, et al., 1998; Pace et al., 1998; Silva et al., 1998; Rosolem et al., 1999; Borges et al., 1999; Corsini e Ferraudo, 1999; Queiroz-Voltan, Nogueira e Miranda, 2000; Krzic, Fortin e Bomke, 2000; Díaz-Zorita, 2000). Entretanto, Corrêa et al. (1998) utilizaram como indicador da compactação do solo o grau de compactação. Neste estudo, observou-se que houve uma redução linear na concentração dos nutrientes na parte aérea à medida que aumentou o grau de compactação para as duas variedades de cana-de-açúcar nos solos latossolos utilizados. Em outro experimento avaliando os efeitos da compactação no desenvolvimento do cafeeiro em diferentes graus de compactação e diferentes classes de solos, Corrêa et al. (1998) concluíram que o alto grau de compactação influenciou na concentração de macro e micronutrientes, sendo que P e o S sofreram redução na parte aérea do cafeeiro em todos os latossolos em estudo.

Para serem absorvidos pelas raízes das plantas, os íons devem entrar em contato com a sua superfície, havendo, em geral, três maneiras de alcançarem a superfície radicular: por interceptação radicular, por fluxo de massa de íons na solução e pela difusão de íons na solução do solo. A maior parte do fósforo e do potássio move-se até as raízes pelo processo de difusão, que ocorre quando os íons translocam-se de uma área de maior concentração para uma de menor concentração (Tisdale, Nelson e Beaton, 1985).

Se a maior parte do fósforo se move até as raízes pela difusão, esta, quando se considera a interação colóide-fósforo será menor quanto mais argiloso for o solo (Benko, 1963; Olsen e Waranabe, 1970), devido ao seu poder de adsorção (Place, Phillips e Brown, 1968).

A concentração e conteúdo de fósforo no exudato xilemático foram maiores para um latossolo mais argiloso quando comparado a um arenoso, quando se aumentou a densidade do solo para os dois latossolos estudados (Ribeiro, 1999).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi o de avaliar o crescimento do milho (*Zea mays* L.), influenciado por diferentes graus de compactação do solo e fornecimento de fósforo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Adensamento é o fenômeno da redução natural do espaço poroso e conseqüente aumento da densidade de camadas ou horizontes do solo por dessecação, iluviação ou precipitação química (Curi et al., 1993). Em mecânica do solo, adensamento, segundo Dias Junior (1996), ocorre quando há uma redução de volume devido à expulsão de água dos poros.

O termo compactação do solo refere-se à compressão do solo não saturado, durante a qual existe um aumento da densidade do solo em conseqüência da redução do seu volume (Gupta e Allmaras, 1987; Gupta et al., 1989), devido à expulsão de ar dos poros do solo.

A compactação é um processo de degradação do solo usualmente descrito como uma deterioração de sua estrutura e manifesta pela alteração de importantes propriedades físicas do solo (Lal, 1979).

Alguns pesquisadores (Watson Jr., Musser e Jeffries, 1951; Weaver e Jamieson, 1951; Baver, Gardner e Gardner, 1956; Grohmann e Queiroz Neto, 1966; Harris, 1971; Warketin, 1971; Vieira, 1978; Lindemann, Ham e Randall, 1982; Saini e Chow 1984; Campbell e Dickson, 1984; Reichardt, 1985;

Thangavadivelu, 1994; Ribeiro, 1987; Ballestro, 1992; Maziero, 1993; Lebert e Horn, 1991; Figueiredo e Dias Junior, 1997; Figueiredo, 1998; Lal e Ahmadi, 2000) investigaram a compactação do solo com o de máquinas agrícolas e de equipamentos de preparo e cultivo do solo, relacionado tal ação com a alteração das propriedades do solo, causando um aumento da densidade do solo, da resistência à penetração e um decréscimo da porosidade, o que pode afetar a produção das culturas.

A compactação aumenta a densidade do solo, diminuindo o número e tamanho de macroporos, conseqüentemente impedindo a difusão de O_2 e CO_2 no solo. Muitos solos são ainda compactados por: tráfego de pedestres, pastejo de animais, área de camping, parques, áreas em construção, áreas de extração de madeira e pomares. O crescimento reduzido das plantas em solo compactado está associado à diminuição da aeração do solo e à resistência mecânica, bem à redução da infiltração e à retenção de água (Stepniewski, Glinski e Ball 1994; Kozłowski, Kramer e Pallardy, 1990).

Em outro estudo entretanto, o aumento da compactação do solo, expresso pelo acréscimo da densidade do solo, provocou sensível redução na produção do milho (Phillips & Kirkham, 1962). Estudos indicam também que a compactação é influenciada pela umidade do solo (Voorherrs, et al., 1985; Shafiq et al., 1994; Thangavadivelu, 1994; Dias Junior e Pierce, 1995; Pabin et al., 1998; Silva, 1998; Kondo, 1998), textura e matéria orgânica (Campbell e Dickson, 1984; Silva et al., 1986; Baumgartl & Horn, 1991; Albuquerque, 1995; Kothari & Sing, 1996;) e história de manejo (Dias Junior, 1994; Dias Junior e Pierce, 1995; Kondo, 1998; Silva, 1998).

Estudando a variação da densidade do solo em relação à umidade quando se aplicava uma energia, Proctor (1933) verificou que a densidade aumentava com a umidade até atingir um máximo e logo diminuía com maiores acréscimos de água. O valor máximo atingido foi denominado "Densidade Solo Máxima" e

a umidade correspondente, “Umidade Ótima, ou Crítica, de Compactação”. A curva de compactação possui dois “ramos”: o “ramo” seco se encontra na parte ascendente da curva. Com o incremento na umidade, a película de água adsorvida fica mais espessa, provocando a lubrificação das partículas, que deslizam e se orientam, formando uma massa mais densa; e o “ramo” úmido está na parte descendente da curva. Os altos teores de água promovem um efeito de diluição das partículas, comportando-se o solo como um fluido (Baver, Gardner e Gardner, 1973 e Hillel, 1982).

Analisando curvas de compactação em duas profundidades em um LR, Figueiredo e Dias Junior (1997) observaram que nas duas condições, quando se aplicava a mesma energia de compactação, a densidade do solo aumentava com o aumento da umidade, atingindo um valor máximo e diminuindo, a seguir, com o aumento da umidade.

O conhecimento do solo que se pretende manejar é de grande importância pois, o teor de matéria orgânica, teor de argila (Moraes, 1988; Torres, Saraiva e Galerani, 1993) e o teor de areia (Pacheco e Dias Junior, 1990) também influenciam o processo de compactação. Em um trabalho em que se compararam solos da região de Lavras (MG), através do ensaio de Proctor normal, Miranda e Dias Junior (1998) observaram que à medida que os teores de areia aumentaram, a densidade do solo máxima aumentou, ou seja, a compactação de um solo está relacionada, também, com a sua textura.

Solos compactados com alta quantidade de areia limitam mais intensamente o aprofundamento radicular de leguminosas, quando comparados com latossolos, mais argilosos (Zambrana, 1994). O autor comparou três solos [Areia Quartzosa (AQ), Latossolo Una (LU) e Latossolo Vermelho-Escuro (LE)] e verificou que a compactação no solo AQ limitou mais severamente a produção de matéria seca de raízes de soja e caupi, devido à uma maior alteração nos valores da porosidade total determinada em comparação com os latossolos.

Rosolem et al. (1999), ao estudar o crescimento de plântulas de milho, concluíram que uma em uma mesma densidade do solo, quanto mais argiloso fosse o solo, maior seria a resistência a penetração de raízes.

O tipo de mineral de argila exerce, também, influência sobre a suscetibilidade do solo à compactação. Ferreira (1988), estudando a influência da mineralogia das argilas nas propriedades físicas dos latossolos, verificou que a caulinita e a gibbsita foram as que mais exerceram influência, especialmente sobre a estabilidade dos agregados e sobre a condutividade hidráulica, sendo estes minerais responsáveis pelo desenvolvimento da estrutura dos latossolos, enquanto os óxidos de ferro (goethita e hematita) não tiveram correlações com os valores das determinações físicas.

A importância das argilas silicatadas, como a caulinita, no processo de compactação ou adensamento, uma vez que este mineral argiloso apresenta uma microestrutura laminar, com um arranjo orientado que permite uma aproximação mais uniforme das unidades estruturais com a elevação do teor de água, resultaram em uma maior compactação, ao se estudar um Latossolo Vermelho Amarelo de tabuleiro (Achá, 1976).

Vários pesquisadores (Meredith e Patrick, 1961; Bodman e Constantin, 1965; Silva, 1984; Saini e Chow, 1984; Garcia, Benedito e Dias, 1986; Peres e Diaz, 1989; Zambrana, 1994; Wagner, Ambe & Ding., 1994; Thomas, Haszler e Blevins, 1996; Ekwue e Stone, 1997, 1995; Zhang, Hartge e Ringe, 1997; Mion e Souza, 1998; Aragón et al., 2000; Barzegar & Assodar, 2000), utilizando o ensaio de Proctor Normal, verificaram a influência da umidade, da textura e da matéria orgânica na compactação de solos agricultáveis. Para cada classe de solo e uma determinada pressão, o grau de compactação dependeria, principalmente, do teor de água (Soane, 1970).

Hakansson e Lipiec (2000) afirmam que o grau de compactação é um dos parâmetros mais usados para o estudo dos efeitos da compactação do solo no crescimento de várias culturas.

Grau de compactação é a relação entre a densidade do solo e a densidade máxima do mesmo solo, obtida pelo ensaio de "Proctor" em laboratório (Anon., 1964).

O Grau de Compactação é expresso por:

$$GC(\%) = (D_s/D_{m\acute{a}x.}) \times 100, \text{ onde:}$$

GC = Grau de Compactação

D_s = Densidade do solo

$D_{m\acute{a}x.}$ = Densidade do solo máxima determinada pelo ensaio de Proctor.

A utilização da $D_{m\acute{a}x.}$ como característica de referência é relacionada ao fato de que, quando o solo atinge a densidade máxima, a macroporosidade está quase totalmente reduzida a zero (O'Connell, 1975). Nessa condição, os solos apresentariam um estado de compactação de 100% e as expressões, a partir desse valor, indicariam estados gradativos de compactação, independentemente das classes de solos.

Quando compararam graus de compactação e retenção de água em latossolos submetidos a diferentes sistemas de manejo, Dias Junior e Estanislau (1999), concluíram que com o aumento do grau de compactação diminuiu a água disponível nos três tipos de solo e em todas as condições de manejo.

Avaliando a disponibilidade de fósforo para a cultura do milho em diferentes graus de compactação de um Latossolo Vermelho Amarelo, Santos et al. (1998) concluíram que houve um acréscimo na produção de matéria seca e no fósforo acumulado na parte aérea das plantas no grau de compactação igual a 40%, quando se aplicou a maior dose de fósforo 200 mg dm³.

Alguns pesquisadores (Hingston, Posner e Quirk, 1972; Sawhney, 1974) e Sposito (1989) relatam o efeito dispersivo do fósforo nos colóides do solo,

podendo alterar as propriedades físicas e comprometer o estado de agregação do solo. Uma predisposição à compactação foi observada para os solos estudados quando uma alta dose de fósforo foi aplicada, afirma Silva (1998), quando avaliou o efeito da adsorção de fósforo em parâmetros físicos e na compressibilidade dos solos.

Para serem absorvidos pelas raízes das plantas, os íons devem entrar em contato com a sua superfície, havendo, em geral, três maneiras de alcançarem a superfície radicular: por interceptação radicular, por fluxo de massa de íons na solução e pela difusão de íons na solução do solo. A maior parte do fósforo e do potássio move-se até as raízes pelo processo de difusão, que ocorre quando os íons translocam-se de uma área de maior concentração para uma de menor concentração (Tisdale, Nelson e Beaton, 1985). Por outro lado, Schenk e Barber (1979) compararam, através de estudos de absorção de P pela cultura do milho, que o P e o K, por se difundirem muito lentamente, podem ter uma de suas partes absorvida pelas partículas do solo e outra pode alcançar as raízes durante o ciclo da cultura. De acordo com Barber (1995), à medida que a concentração na superfície radicular diminui, o P e o K movimentam-se pelo processo difusivo, no sentido de ressuprir o que foi absorvido pela planta.

Reduções na absorção de fósforo são relatados em cana de açúcar (Juang e Uehara, 1969) e soja (Ribeiro et al., 1985), à medida que se aumenta a compactação do solo. Dependendo do tipo de solo, do grau de compactação e da umidade, a inibição da elongação radicular não é necessariamente correlacionada com a absorção de nutrientes, o que pode ser explicado por um maior poder tampão do solo, quando a compactação é maior (Silberbush et al., 1983), uma vez que a maioria das raízes pode estar numa camada de maior concentração de nutrientes. Porém, em solos de regiões semi-áridas, tal comportamento pode ser uma exceção (Russel e Goss, 1974).

A compactação do solo afeta a sua porosidade, induzindo a decréscimos na difusão de oxigênio, na permeabilidade de água, na resistência mecânica, etc. Pode haver uma redução no comprimento do sistema radicular, alterando o diâmetro da raiz para maiores valores (Vepraskas, 1994), compensando a redução do comprimento

Avaliando a razão de penetração de raiz (RPR), para a qual se utilizaram três anéis sobrepostos, cujo anel o superior constituía uma camada com solo sem compactação, o anel central a camada compactada e o anel inferior outra camada não compactada, onde houve a contagem das raízes da parte superior da camada compactada e também a contagem das raízes que atravessaram a camada compactada. Com base no número de raízes da parte superior em função do número raízes que atravessaram as camadas compactadas, obteve-se a (RPR). Em um experimento com a cultura do feijoeiro Asady, Smucker e Adams, (1985) concluíram que à medida que razão de penetração de raiz aumentou, a produção foi cada vez maior, ou seja, as melhores condições de espaço poroso do solo permitiram às raízes uma maior penetração na camada compactada. Conseqüentemente, houve maior absorção de água e nutrientes, proporcionando aumento significativo na produção.

Raízes mais longas e mais finas, para uma mesma massa (mesmo consumo metabólico), resultam em maior área superficial e, conseqüentemente, maior aptidão em absorver nutrientes. Raízes longas e finas são características desejáveis aos genótipos melhorados, especialmente por aumentarem a eficiência de absorção de nutrientes pouco móveis no solo, como o fósforo, cujo mecanismo dominante de suprimento às raízes é por difusão (Anghinoni e Meurer, 1999).

O adensamento do solo proporciona concentração superficial das raízes a menores profundidades (Barber, 1995). Assim, aplicação de nutrientes, como fósforo e o nitrogênio, em linhas, faixas ou à lanço, na superfície do solo, afeta o

crescimento radicular, o estado nutricional das plantas e o desenvolvimento das culturas (Anghinoni e Barber, 1980; Borkert e Barber, 1985; Anghinoni, 1992, Kleker e Anghinoni, 1993, 1995).

O aumento na eficiência de absorção e utilização do fósforo, resultante do incremento do crescimento de raízes na posição do solo fertilizada com fosfato solúvel, tem sido constatado, primordialmente, em estudos de curta duração em vasos (Anghinoni, 1999).

Os autores Klepker e Anghinoni (1993) verificaram que o padrão de crescimento das raízes do milho foi alterado pela forma de aplicação dos adubos. A maior absorção desse nutriente ocorreu quando o adubo foi incorporado na camada superficial do solo.

O crescimento da parte aérea, de raízes e da absorção de fósforo por plântulas de milho cultivados em vasos até os dezoito dias, em função do aumento do teores deste nutriente, foi avaliado por Anghinoni (1979), concluiu que, a partir do momento em que a disponibilidade de fósforo atende a demanda da planta, o fósforo adicional é, juntamente com os fotoassimilados, alocado no crescimento da parte aérea, que passa a ser priorizado. Com o aumento da densidade do solo, aumenta a concentração dos íons disponível por unidade de volume do solo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Solos, seus atributos e características

Para avaliar o efeito do grau de compactação no crescimento do milho (*Zea mays* L.), utilizou-se a variedade de milho Híbrido Simples C 909. Foram utilizadas amostras da camada de 0 a 20cm de três solos de diferentes texturas: um argiloso (Latossolo Vermelho distrófico típico), um com textura média

(Latossolo Vermelho Amarelo distrófico), ambos originários no campus da UFPA, e outro arenoso (Neossolo Quartzarênico), originário do município de Itutinga (MG). A amostragem dos solos foram feitas na camada de 0-20 cm.

Coletaram-se amostras indeformadas e deformadas. As indeformadas para determinação da densidade do solo (D_s) e deformadas para determinações físicas e químicas e para montagem dos vasos. O material do solo foi caracterizado química e fisicamente conforme Vettori (1969), com modificações EMBRAPA (1997). Nas tabelas 1 e 2 são apresentados os atributos físicos e químicos dos solos em estudo:

TABELA 1. Atributos físicos e químicos dos solos usados no experimento

Atributos	RQ	LVd	LVAd
PH em água (1:2,5)	4,8	5,0	5,1
P Mehlich (mg dm^{-3})	10,0	1,5	1,0
K Mehlich (mg dm^{-3})	24,0	39,0	31,0
Ca (cmolc dm^{-3})	0,4	0,5	0,4
Mg (cmolc dm^{-3})	0,1	0,2	0,1
Al (cmolc dm^{-3})	1,1	0,9	0,8
t (CTC efetiva) (cmolc dm^{-3})	1,7	1,7	1,4
T (CTC a pH 7,0) (cmolc dm^{-3})	6,2	7,1	5,6
Zn (mg dm^{-3})	0,5	0,4	3,7
V (%)	10,1	11,3	10,4
Matéria Orgânica (dag dm^{-3})	2,15	2,7	0,1
Densidade do solo (Mg m^{-3})	1,25	1,28	1,34
Densidade de partículas (Mg m^{-3})	2,68	2,81	2,63

Solos utilizados: RQ = Neossolo Quartzarênico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico típico; LVAd = Latossolo Vermelho Amarelo distrófico.

TABELA 2. Teores de argila, silte e areia fracionada em cinco classes, para os três solos em estudo

Solo	Areia					Areia Total	Argila	Silte
	AMG	AG	AM	AF	AMF			
	g kg ⁻¹					g kg ⁻¹		
RQ	8,0	90,0	376,0	384,0	69,0	927,0	49,0	24,0
LVd	70,0	130,0	102,0	84,0	28,0	414,0	356,0	230,0
LVAd	26,0	130,0	160,0	179,0	32,0	527,0	326,0	147,0

Onde: AMG = Areia Muito Grossa; AG = Areia Grossa; AM = Areia Média; AF = Areia Fina; AMF = Areia Muito Fina

3.2 Análises preliminares de laboratório:

Na realização do ensaio de Proctor Normal, foram utilizados 5 kg de amostras dos solos previamente secas ao ar e peneiradas em peneira 4,76mm, colocando-os em cilindros de maneira que, após compactados, suas alturas fossem iguais a 1/3 dos cilindros. Foram tomadas três amostras, que foram submetidas a 25 golpes por camada com um soquete de 2,5 kg. Após compactado o corpo de prova, o mesmo foi extraído, coletando uma amostra do seu centro para a determinação da umidade e da densidade do solo. Após obtidos 5 valores de densidade do solo (Ds) e de umidade gravimétrica (U), plotaram-se os resultados em um gráfico (Ds - eixo das ordenadas; U - eixo das abcissas) (Stancati et al., 1981). Ajustou-se, a seguir, um polinômio do 2º grau, obtendo-se, então, a curva de compactação. A umidade ótima foi obtida pela expressão: $U_{ót.} = -b/2a$ e a densidade máxima $D_{s_{máx.}} = (-\Delta/4a)$ (Miranda & Dias Junior 1999).

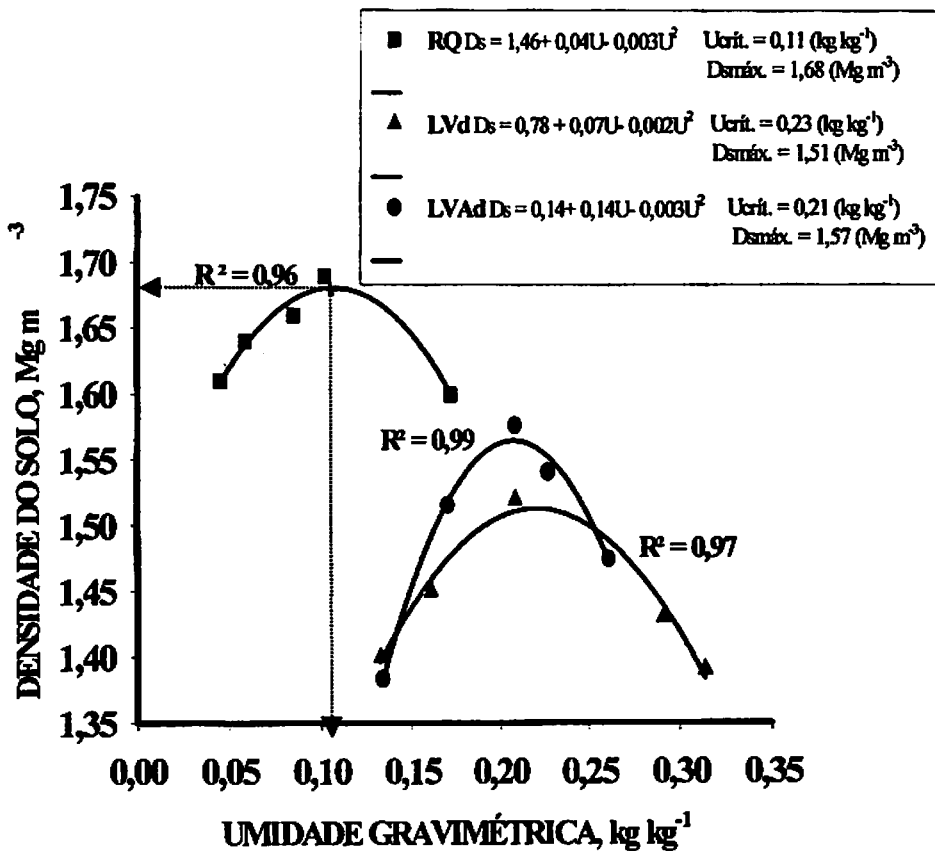


FIGURA 1. Curvas de compactação para os três solos estudados.

Após obtidas as curvas de compactação (Figura 1) calculou-se o Grau de Compactação destes solos em estudo, utilizando-se a expressão:

$$G.C. = Ds(\text{campo})/Ds(\text{máxima de laboratório}).$$

À medida que o grau de compactação aumenta, tanto no ramo seco como no ramo úmido, a água retida a baixas sucções e a água disponível diminuem (Dias Junior e Estanislau, 1999). A escolha das densidades para cada solo foi

feita para que houvesse quatro graus de compactação situados no ramo seco da Curva de compactação obtida através do ensaio de Proctor normal.

Os experimentos foram conduzido utilizando os seguintes graus de compactação: Neossolo Quartzarênico (GC = 72%; 75%; 85% e 95%); Latossolo Vermelho Amarelo distrófico e Latossolo Vermelho distrófico típico (GC = 65%; 75%; 85% e 95%). Estas determinações foram feitas em laboratório para cada tipo de solo, através da Curva de compactação. Na Tabela 3 são apresentados os graus de compactação e suas respectivas densidade máxima e umidade crítica de compactação.

TABELA 3. Graus de compactação e suas respectivas densidades de campo e máximas e umidades críticas de compactação dos solos em estudo. (UFLA – Lavras – MG - 2001)

Solo	Grau de Compact. (%)	Ds _{campo} (Mg m ⁻³)	Ds _{máx.} ⁽¹⁾ (Mg m ⁻³)	U _{crit.} ⁽¹⁾ (kg kg ⁻¹)
RQ	72	1,22		
	75	1,27		
	85	1,44	1,68	0,11
	95	1,60		
LVd	65	0,98		
	75	1,13		
	85	1,28	1,51	0,23
	95	1,43		
LVAd	65	1,02		
	75	1,18		
	85	1,33	1,57	0,21
	95	1,49		

Onde: RQ = Neossolo Quartzarênico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico típico; LVAd = Latossolo Vermelho Amarelo distrófico; Ds_{Grau compactação} = Densidade calculada em função Ds_{máx.} = 100% ; Ds_{máx.} = Densidade máxima de compactação, (Curva de Compactação); U_{crit.} = Umidade crítica de compactação (Curva de Compactação). 1= média de 4 repetições.

3.3 Montagem dos experimentos

Delineamento

O delineamento experimental usado para os três solos foi o inteiramente casualizado, arranjado em esquema fatorial $4 \times 4 \times 3$, sendo quatro graus de compactação, quatro doses de fósforo e três repetições, para cada solo.

Na análise estatística foi utilizado o programa SANEST "Sistema de Análise Estatística para Microcomputadores" (Zonta e Machado, 1980); o teste para os níveis dos fatores foi efetuado através de regressão polinomial; com significância ao nível de 5% e com o grau do polinômio quadrático. As equações de regressão foram ajustadas para as variáveis em função dos Graus de Compactação e Doses de Fósforo.

Preparo das amostras de solo

Os solos foram peneirados em malha de 4,76mm para o plantio do milho, separados em quantidade suficientes para, em cada solo, completar o volume de $1,8 \text{ dm}^3$, correspondente à capacidade do vasos utilizados, e foram acondicionados em sacos plásticos. Foi feita a calagem usando calcário dolomítico com PRNT = 100%, para o V% = 60%, além de uma adubação básica: S=40mg dm^{-3} , K=150mg dm^{-3} , N=100mg dm^{-3} , B=0,8mg dm^{-3} , Cu=1,3mg dm^{-3} , Mn=3,6mg dm^{-3} , Fe=1,5mg dm^{-3} , Mo=0,15mg dm^{-3} e Zn 5,0mg dm^{-3} . A fertilização com o fósforo foi distinta entre os solos. Para LVd e LVAd, as doses corresponderam a 0, 100, 200 e 400 mg dm^{-3} ; para o RQ, as doses foram 0, 50, 100 e 200 mg dm^{-3} . Utilizaram-se soluções contendo nutrientes, oriundas das seguintes fontes: K_2SO_4 , KCl, NH_4NO_3 , H_3BO_3 , $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, Fe_{EDTA} , $\text{H}_2\text{MoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Zn SO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$. Para a fertilização

com o fósforo, foram utilizadas as fontes H_3PO_4 e $NH_4H_2PO_4$. Utilizou-se solução nutritiva para a fertilização e aplicação através de pipetagem para a adubação básica e aplicação das doses de fósforo. Após a fertilização, os solos permaneceram incubados por 22, dias com uma umidade aproximada à capacidade de campo. Com o término do tempo de incubação, os solos foram secos ao ar novamente e peneirados em malha de 4,76mm.

Com os solos já preparados e adubados, calculou-se a umidade necessária para os correspondentes graus de compactação escolhidos de acordo com a Equação da Curva de Compactação de cada solo (Figura 1), em que se tem a $D_{s_{campo}}$, Tabela 3, obtendo-se a umidade para a compactação do solo no respectivo grau de compactação para os solos distintos.

Em um anel de PVC com 15cm de diâmetro e 10cm de altura, foram coletadas as amostras ($1,8 \text{ dm}^3$). Foram aplicados diferentes graus de compactação e para a compactação das amostras dos solos utilizou-se o soquete do ensaio de Proctor Normal.

Para que não houvesse deformação do anel no momento da compactação, foi necessária a utilização de uma braçadeira confeccionada em latão, na dimensão que possibilitasse seu encaixe. Utilizou-se também uma chapa de ferro com o mesmo diâmetro do anel, para vedar o fundo, impedindo que o solo quando compactado o atravessasse. O procedimento foi feito com o anel envolvido por esta braçadeira, que possuía uma maior fixação, com o auxílio de duas porcas “borboleta” e a colocação da chapa ao fundo.

A compactação do solo no anel, para cada grau, foi feita a partir do solo seco correspondente ao volume total do anel, ou seja, o volume de $1,8 \text{ dm}^3$ para os solos distintos; e a umidade ideal para a compactação relativa a cada grau de compactação foi obtida através das $D_{s_{campo}}$ (Tabela 3), das equações da curva de compactação (Figura 1), para cada solo. A compactação no vaso foi feita com o solo corrigido com a adubação básica e com fertilização com as dose de fósforo

adicionando-se a água para o grau de compactação desejado, dividindo-se estes solos em 3 partes iguais, para que a compactação ficasse uniforme, e aplicando a compactação com o soquete de Proctor Normal até atingir a densidade do solo correspondente ao grau desejado. Os vasos foram vedados com uma placa de isopor tamanho 20X20cm e impermeabilizados com cola de silicone para evitar que houvesse escorrimento por ocasião da irrigação.

Coletou-se para cada grau obtido, um corpo de prova utilizando um cilindro de 4,7cm de diâmetro e 5cm de altura, para, posteriormente serem obtidos os VTP em cada grau de compactação e, assim, efetuar-se a irrigação para graus e solos distintos.

3.4 Condução do experimento

O plantio do milho foi feito diretamente nos vasos de cultivo, inicialmente, com 6 sementes após desbaste, foram conduzidas 3 plantas até o final do experimento. Durante o período experimental, a umidade do solo nos anéis foi mantida em 70% do VTP, através de pesagens diárias dos anéis, repondo-se o volume evapotranspirado com água desmineralizada.

3.5 Coleta de dados

Após 35 dias de cultivo, as plantas foram cortadas rente ao solo e o material vegetal separado em parte aérea e sistema radicular. Foi avaliada a Razão de Penetração de Raiz (RPR), adaptada de Asady, Smucker e Adams, (1985). Esta adaptação foi necessária devido ao fato de haver somente uma camada homogênea, na qual se padronizou a contagem do número de raízes na profundidade de 1,5cm da superfície da camada compactada, o que representou o número de raízes da parte superior da camada (n° raízes superior); o outro

parâmetro para a razão foi obtido através da contagem do número de raízes que atravessaram as camadas compactadas (n° raízes atrav.), através da expressão:

$$RPR = (n^{\circ} \text{ raízes atrav.} / n^{\circ} \text{ raízes superior}) \times 100.$$

Os seguintes dados foram avaliados:

Matéria seca total; Matéria seca da parte aérea; Teor de fósforo na parte aérea; Fósforo acumulado na Parte aérea; Razão da penetração da raiz; Matéria seca da raiz.

O material vegetal foi seco em estufa com circulação de ar a 70°C até peso constante, para posterior pesagem e determinação da matéria seca. Os teores de fósforo na matéria seca da parte aérea foram determinados no extrato obtido pela digestão nitro-perclórica (Sarruge e Haag, 1974).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando a interação colóide-fósforo, a difusão será menor quanto mais argiloso for o solo (Benko, 1963; Olsen e Waranble, 1970), devido ao poder de adsorção (Place, Phillips e Brown, 1968). Assim, no presente trabalho optou-se para a aplicação de doses de fósforo menores para o Neossolo e maiores e para os Latossolos (por terem maior teor de argila, as aplicações foram de doses maiores de fósforo).

4.1 Neossolo Quartzarênico

4.1.1 Matéria Seca Total

Analisando a Figura 2a, nota-se que à medida que se aumentou a dose de fósforo a produção de matéria seca total (MST_{Total}) aumentou linearmente, para as doses 0 e 50 mg dm⁻³, no entanto, não houve diferença significativa ao nível de 5%. A maior produção de MST_{Total} (9,2g vaso⁻¹) foi obtida com a aplicação da maior dose de fósforo, 200mg dm⁻³, correspondente ao grau de compactação 73%, (Figura 2b). Na Figura 2b, observa-se que à medida que o grau de compactação aumentou, houve um ponto de produção máxima com a maior dose de fósforo aplicada (9,23 g vaso⁻¹), que correspondeu ao grau de compactação 76%. Após este ponto ocorreu um decréscimo na produção de matéria seca total, em que a menor produção (6,5 g vaso⁻¹) ocorreu para o grau de compactação de 95%, como mostra a Tabela 4.

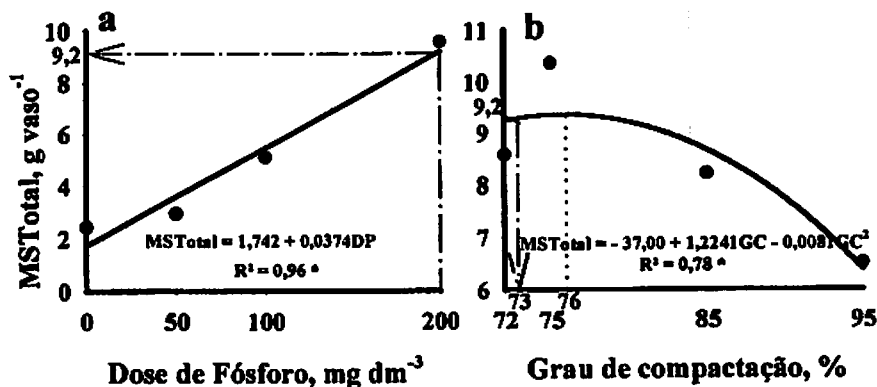


FIGURA 2. Produção de Matéria Seca Total em função das doses de fósforo (a) e dos graus de compactação (b) na Neossolo Quartzarênico. (UFLA- Lavras – MG, 2001)

TABELA 4. Valores médios da matéria seca total e da parte aérea, teor e P acumulado na parte aérea para as plantas cultivadas no Neossolo Quartzarênico com a aplicação de quatro doses de fósforo (mg dm^{-3}) quando submetidas a quatro graus de compactação (%). (UFLA, Lavras - MG, 2001)

Doses de Fósforo (mg dm^{-3})	M S Total (g vaso^{-1})	M S P A (g vaso^{-1})	Teor de P na P A (g kg^{-1})	P acumulado P A (mg vaso^{-1})
0	2,43 (ns)	0,93(ns)	1,21(ns)	1,03
50	2,95 (ns)	1,31(ns)	1,11(ns)	1,56
100	5,1*	2,48*	1,53*	3,54
200	9,58*	5,04*	2,51*	12,12
Grau de compactação (%)	M S Total (g vaso^{-1})	M S P A (g vaso^{-1})	Teor de P na P A (g kg^{-1})	P acumulado P A (mg vaso^{-1})
72	8,58*	4,61*	2,28*	9,62
75	10,36*	4,99*	2,67*	15,76
85	8,21*	3,82*	2,32*	8,05
95	6,5*	2,85*	1,83*	5,46

Onde: * = houve diferença significativa ao nível de 5%; ns = a diferença não foi significativa

4.1.2 Matéria Seca da Parte Aérea

A produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) aumentou linearmente à medida que aumentou a dose de fósforo. A maior produção de MSPA ($4,8\text{g vaso}^{-1}$) foi obtida com a aplicação da maior dose de fósforo, (200mg dm^{-3}) (Figura 3a), correspondente ao grau de compactação (72%) (Figura 3b), observando que acima deste ponto houve uma acentuada queda na produção de matéria seca da parte aérea. A menor produção ($2,85\text{g vaso}^{-1}$) ocorreu para o grau de compactação de 95% (Tabela 4).

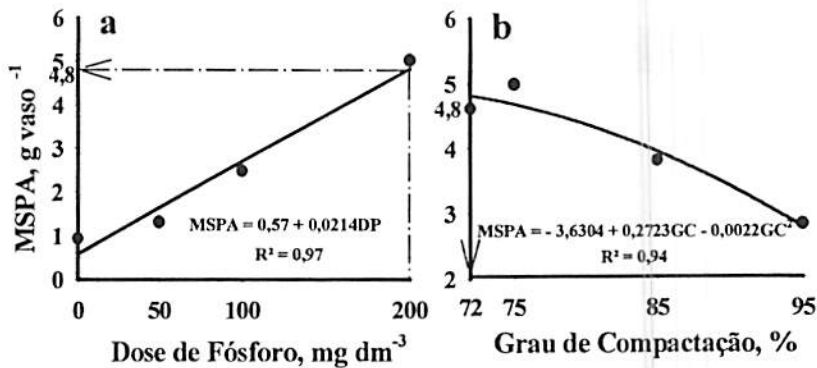


FIGURA 3. Produção de Matéria Seca da Parte Aérea em função das doses de fósforo e (a) e dos graus de compactação (b) na Neossolo Quartzarênico (UFLA - Lavras – MG, 2001)

O que pode claramente ser observado através da Figuras 4, é que não havendo aplicação de fósforo houve pouco desenvolvimento das plantas para todos os graus de compactação, (Figura 4a); e quando foram aplicadas as maiores doses, a tendência foi o maior desenvolvimento, principalmente na maior dose aplicada na Figura 4b, o mesmo ocorrendo com as Figuras 4c e 4d. sendo o fósforo um agente compensador da compactação do solo.

O comprometimento da produção de matéria seca, quando o grau de compactação foi aumentado para este solo, se explica devido ao fato de que quando se aplica uma energia externa em materiais arenosos, ocorre o rearranjo das partículas finas, forçando-as a se assentarem nos vazios do solo (Mantovani, 1987) podendo também se relacionar aos solos arenosos, os quais possuem uma fraca estrutura, nos quais uma pequena energia pode compactá-lo facilmente, formando, também, uma camada de selamento ou impermeabilização (Camargo e Alleoni, 1997). Porém, o efeito da compactação foi reduzido quando maiores doses de fósforo foram aplicadas.

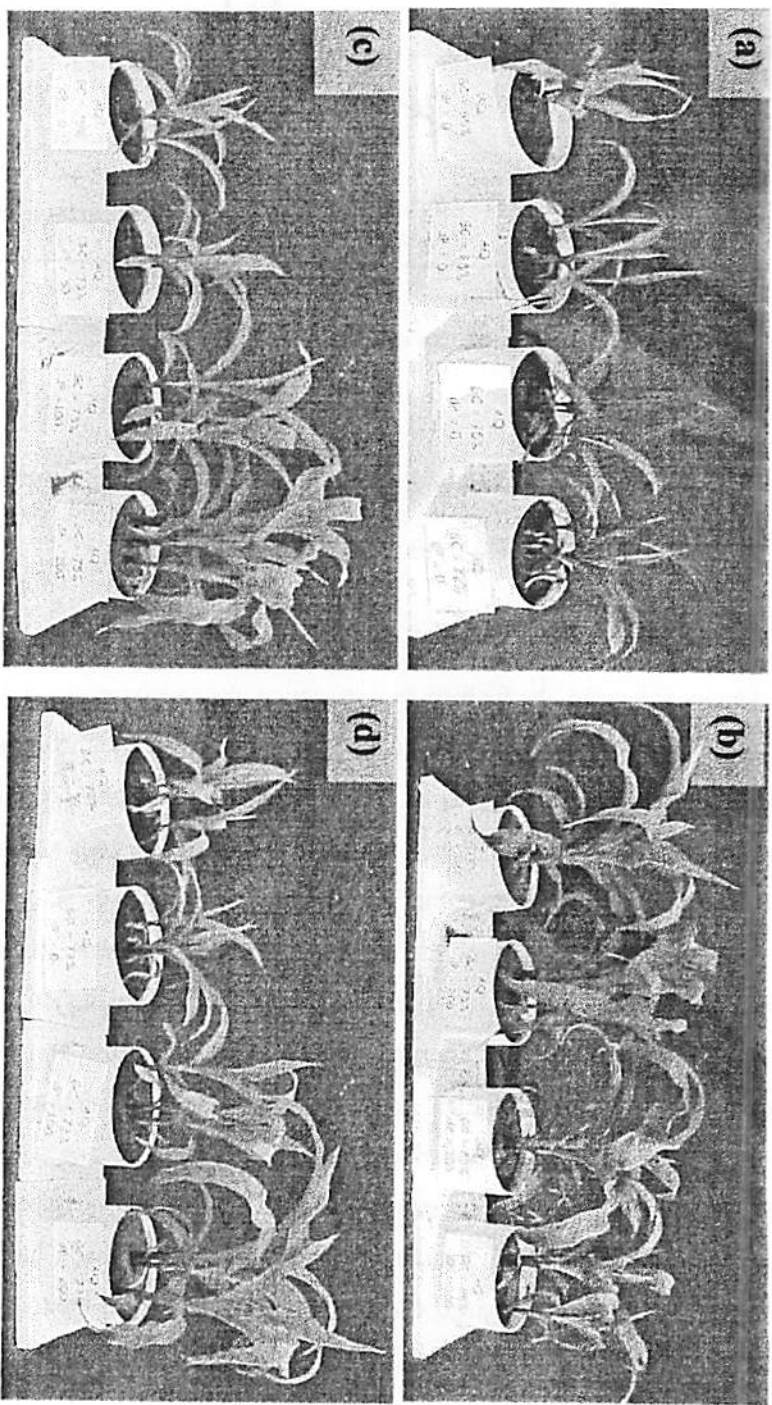


FIGURA 4. Planta do milho cultivada Neossolo Quartzarênico (a) GC = 65, 75, 85 e 95% na DP = 0 (zero) mg dm^{-3} ; (b) GC = 95, 85, 75 e 65% DP = 400 mg dm^{-3} ; (c) DP = 0 (zero), 100, 200, 400 mg dm^{-3} para o GC = 65% e (d) DP = 0 (zero), 100, 200, 400 mg dm^{-3} GC = 95%.

Com os resultados obtidos no presente trabalho, a produção de matéria seca, tanto a total quanto a da parte aérea, foram comprometidas com o aumento da compactação para o Neossolo Quartzarênico. No entanto aumentando as doses de fósforo aplicada notou-se um aumento da produção, em que o fósforo está agindo como um agente de compensação da compactação deste solo. O que explica um ponto de máxima produção de matéria seca total quando se aplicou o grau de compactação 76% pode ser, segundo Borges (1995), onde afirma que uma leve compactação pode ser benéfica para um maior crescimento do sistema radicular, melhorando a distribuição da relação ar/água e a maior disponibilidade de água e nutrientes próximo ao sistema radicular.

4.1.3 Teor de fósforo na parte aérea

À medida que se aumentou a dose de fósforo, o teor de fósforo na parte aérea (Teor de P na P.A.) aumentou segundo uma parábola. O maior valor ($2,5\text{g kg}^{-1}$) foi obtido com a aplicação da maior dose de fósforo (200mg dm^{-3}) (Figura 5a), correspondente ao grau de compactação igual a 76%, (Figura 5b). Na Figura 5b, na dose de fósforo que permitiu o máximo valor do Teor de P na P.A., o comportamento quadrático indica que com a dose de fósforo aplicada, o grau de compactação poderia ser maior, ou seja, este atingiu um ponto máximo ($2,54\text{g kg}^{-1}$) do teor de P na parte aérea, correspondendo ao grau de compactação 79%, para o qual a compactação foi benéfica (Borges, 1995). Para os graus de compactação maiores que este valor, o teor de fósforo decresceu. O menor valor do teor de P na parte aérea ($1,83\text{ g kg}^{-1}$) ocorreu para o grau de compactação de 95% (Tabela 4).

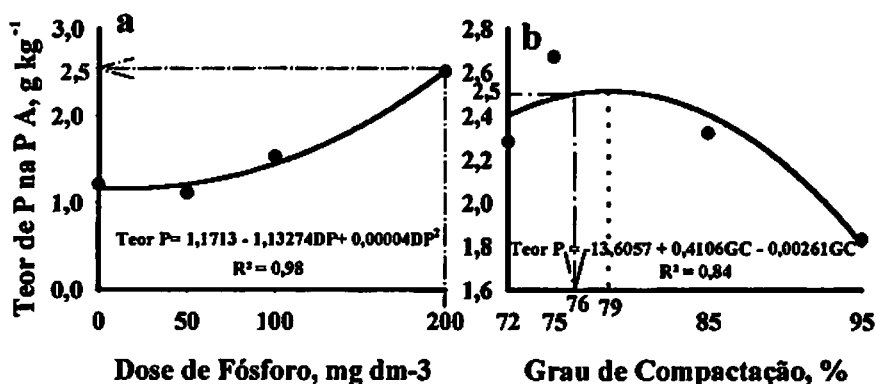


FIGURA 5. Teor de Fósforo na Parte Aérea em função das doses de fósforo e (a) e dos graus de compactação (b) na Neossolo Quartzarênico. (UFLA - Lavras - MG, 2001).

4.1.4 Fósforo Acumulado na Parte Aérea

À medida que se aumentou a dose de fósforo aplicada, o fósforo acumulado (P acumulado) na parte aérea aumentou. O maior valor (12,0 mg vaso⁻¹) foi obtido com a aplicação da maior dose de fósforo, 200mg dm⁻³, (Figura 6a). Na Figura 6b, observa-se que a maior quantidade de P acumulado (12 mg dm⁻³), foi obtido no grau de compactação mais baixo, ou seja, igual a 72% acima deste ponto ocorreu um decréscimo do fósforo acumulado na parte aérea, onde o menor valor (5,46mg vaso⁻¹) ocorreu para o grau de compactação de 95% (Tabela 4).

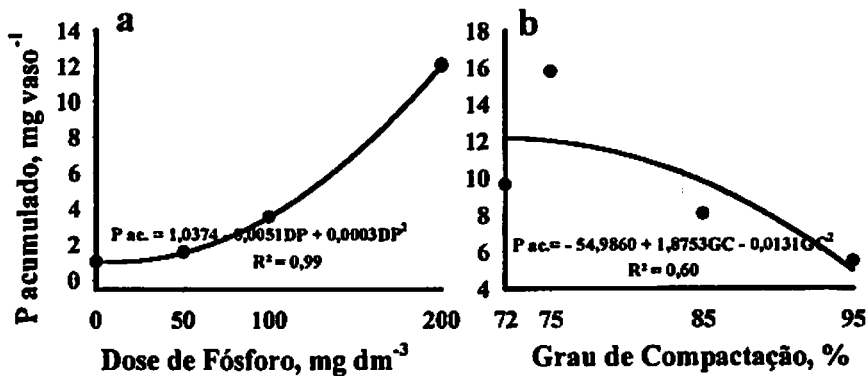


FIGURA 6. Fósforo acumulado na parte aérea em função das doses de fósforo (a) e dos graus de compactação (b) no Neossolo Quartzarênico. (UFLA- Lavras – MG, 2001).

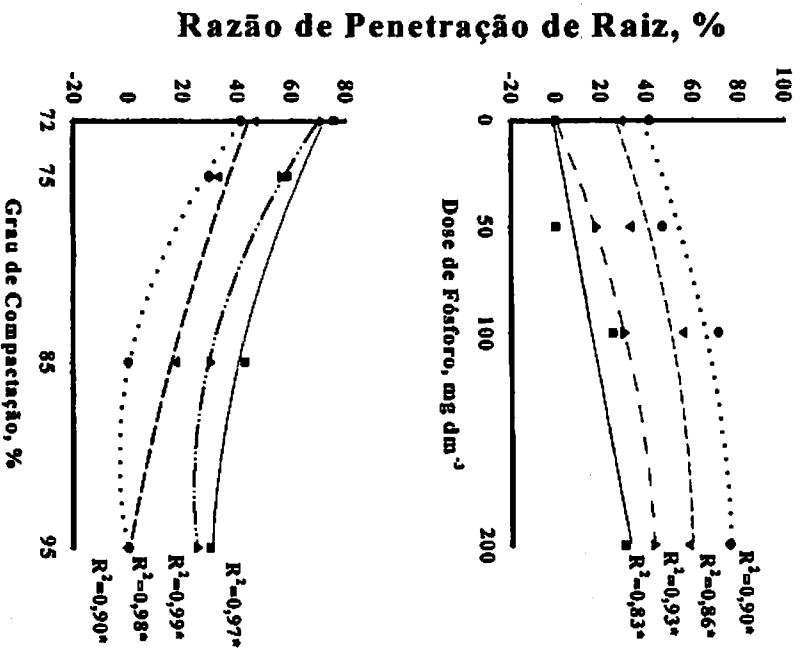
Esta redução acentuada do P acumulado pode ser explicada através da afirmação de que solos arenosos, com menor teor de umidade ou mais compactados, apresentam maior tortuosidade, portanto menor difusão (Vale et al., 1997). Com os resultados obtidos para o teor de P e o P acumulado na parte aérea, observa-se claramente que com o aumento do grau de compactação para a Neossolo Quartzarênico, foi dificultada a disponibilidade de fósforo para as plantas de milho. A compactação aumentou a participação de microporos e a energia de retenção de água no solo, aumentando a viscosidade da água e a interação de íons de fosfato e superfícies dos colóides ao longo de sua trajetória de difusão, fazendo com que o fosfato tenha que se difundir cada vez mais próximo de superfícies positivamente carregadas (Novais e Smyth, 1999). Devido ao fósforo se movimentar através do processo de difusão, o teor de umidade é um fator muito importante, já que a irrigação dos vasos ocorreu de maneira que ficasse em 70% do VTP, para cada grau de compactação, ocorrendo em quantidades menores para os valores mais altos. O efeito da umidade sobre a

difusão de fósforo será mais crítico quanto maior for a participação de areia na composição granulométrica do solo, devido à baixa retenção de água necessária ao transporte do nutriente até a superfície radicular, sendo que o solo arenoso possui uma maior condutividade hidráulica que o argiloso (Olsen e Kemper, 1968; Barber, 1974; Nye e Tinker, 1977 e 1979). Já Hillel (1971), afirma que em condições não saturadas, a condutividade hidráulica diminui mais em solos arenosos que em argilosos. Para o Neossolo Quartzarênico, uma leve compactação facilitou a absorção de P.

4.1.5 Razão de penetração de Raiz

Na Figura 7a e Tabela 5, observa-se que à medida que o grau de compactação aumentou, ocorreu um decréscimo na razão de penetração de raiz (RPR), para todas as doses de fósforo aplicadas. A maior restrição ao desenvolvimento do sistema radicular ocorreu para a dose 0 (zero) mg dm^{-3} de P aplicado e o maior desenvolvimento ocorreu na dose 200mg dm^{-3} de P (Figura 7b). Na Figura 7b, observa-se que à medida que a dose de fósforo aumentou, a razão de penetração de raiz também aumentou para todos os graus de compactação. Assim, para um mesmo grau de compactação, a maior restrição ao desenvolvimento do sistema radicular ocorreu na menor dose de P aplicado e o maior desenvolvimento ocorreu na maior dose, o fósforo contribuiu como agente estimulante ao crescimento de raízes

Os autores Asady, Smucker e Adams, (1985), afirmam trabalhando com a cultura do feijoeiro, afirmaram que a produção foi cada vez maior quanto maior foi a razão de penetração de raiz (RPR), e obtiveram maior absorção de nutrientes e água, ocasionando maior produção.



Grado de Compactação (%)

●	$RPR_{72} = 38,4564 + 0,3503DP - 0,0008DP^2$
▼	$RPR_{75} = 26,7249 + 0,3167DP - 0,0008DP^2$
▲	$RPR_{85} = 0,0920 + 0,3893DP - 0,0008DP^2$
■	$RPR_{95} = -0,9720 + 0,1681DP$

Dose de P (mg dm⁻³)

●	$RPR_0 = 1099,9939 - 24,4460GC + 0,1354GC^2$
▼	$RPR_{30} = 372,8988 - 6,5776GC + 0,0279GC^2$
▲	$RPR_{100} = 1009,5716 - 21,4560GC + 0,1168GC^2$
■	$RPR_{300} = 630,8470 - 12,2684GC + 0,0626GC^2$

FIGURA 7. Razão de Penetração de Raiz em função das doses de fósforo e (a) e dos graus de compactação (b) no Neossolo Quartzarênico. (UFPA - Lavras - MG, 2001)

TABELA 5. Valores médios da Razão da Penetração de Raiz - RPR (%) pelas plantas de milho cultivadas no Neossolo Quartzarênico com a aplicação de quatro doses de fósforo (mg dm^{-3}) quando submetidas a quatro graus de compactação (%). (UFLA, Lavras, MG, 2001)

Grau de Compactação (%)	Doses de Fósforo (mg dm^{-3})			
	0	50	100	200
	----- RPR (%) -----			
72	41,15	46,77	70,80	75,33
75	29,49	43,26	56,19	58,23
85	0,00	10,59	30,01	42,67
95	0,00	0,00	25,04	29,90

No presente trabalho, no qual se utilizou uma adaptação da metodologia proposta por estes autores, o que foi verificado é que a RPR foi maior quanto maior foi a dose de fósforo aplicada para todos os graus de compactação aplicados.

4.1.6 Matéria Seca da Raiz

Para a Matéria Seca da Raiz (MSRA), não houve diferença significativa ao nível de 5%, na interação entre os fatores grau de compactação e doses de fósforo. Entretanto, houve significância para os níveis das doses de fósforo aplicado, em função do grau de compactação ter sido o fator limitante ao desenvolvimento do sistema radicular desde seu nível mais baixo. À medida que aumentou a dose de fósforo aplicada, houve um aumento significativo da produção de matéria seca da raiz (MSRA) (Figura 8 e Tabela 6), corroborando

Anghinoni e Meurer (1999). Estudando as melhores formas de aplicação de fertilizantes fosfatados, verificaram um aumento na eficiência de absorção e utilização do fósforo, resultante do incremento de raízes na posição do solo fertilizada, podendo ser observado através da Figura 9.

A maior produção ocorreu para a dose 200 mg dm⁻³ (4,07g vaso⁻¹) e a menor, para a dose (zero) mg dm⁻³ (Tabela 6). Ainda nesta Tabela, observa-se que a aplicação de P promoveu um aumento da produção de MSRA, de até 239%, para a dose de P de 200mg dm⁻³. Este fato mostra a significância do uso do fertilizante no sistema radicular, o que implica uma maior produção. Com o aumento da dose de P aplicada, aumentou a produção de MSRA.

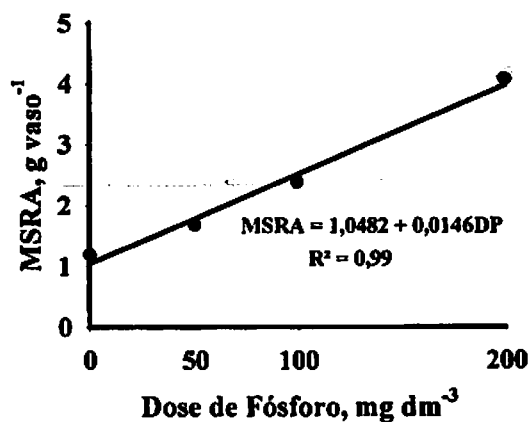


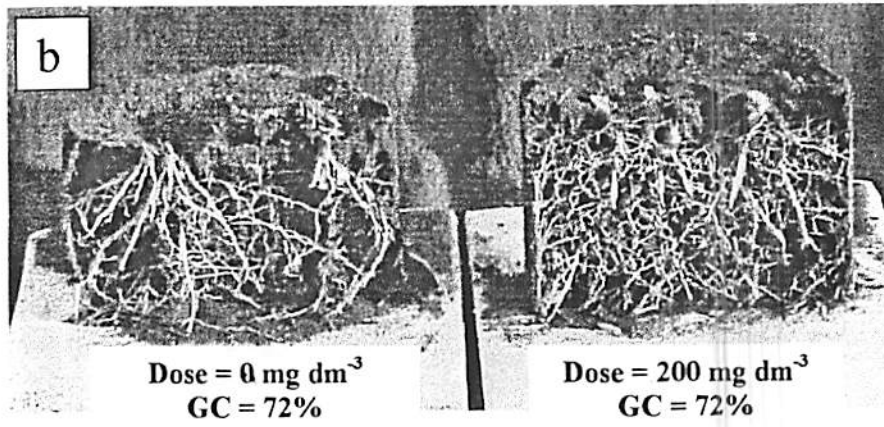
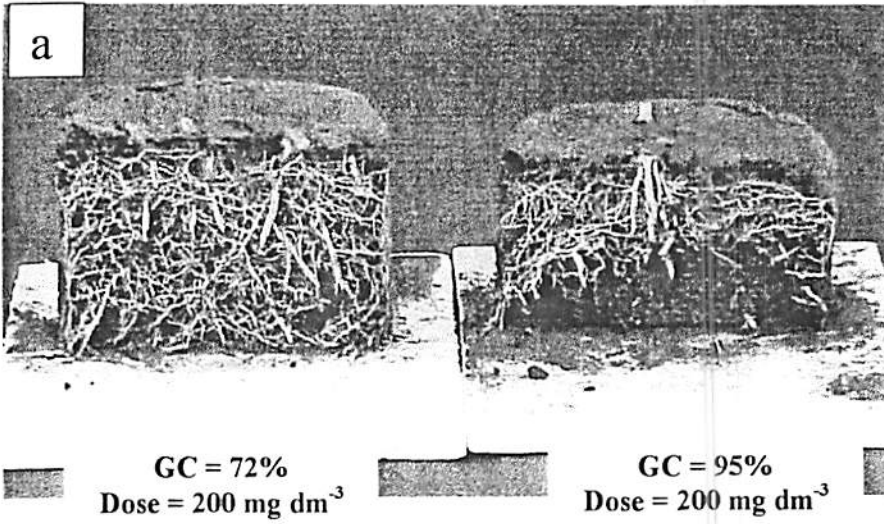
FIGURA 8. Produção de Matéria Seca da Raiz em função das doses de fósforo no Neossolo Quartzarênico (UFLA- Lavras – MG, 2001).

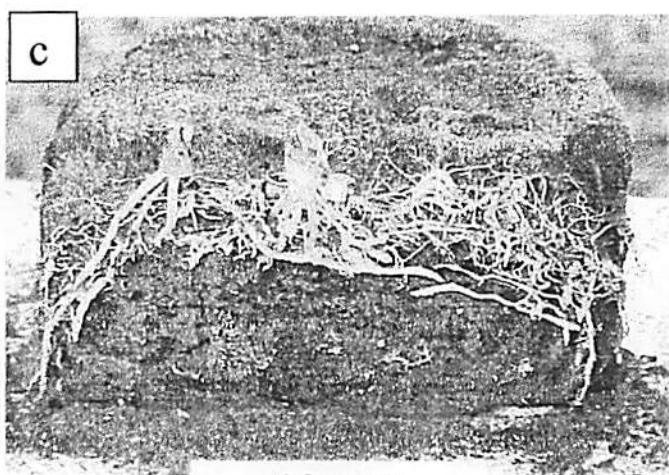
TABELA 6. Valores médios da Matéria Seca da Raiz - MSRA (g vaso⁻¹) por plantas de milho cultivadas na Neossolo Quartzarênico com a aplicação de quatro doses de fósforo - DP (mg dm⁻³). (UFLA, Lavras, MG, 2001).

Doses de Fósforo (mg dm ⁻³)	MSRA (g vaso ⁻¹)	Incremento (%)
0	1,20	
50	1,68	40
100	2,38	98
200	4,07	239

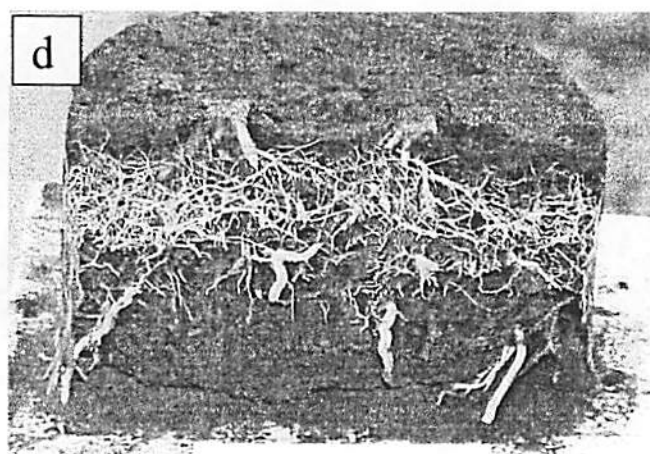
A compactação do Neossolo Quartzarênico, reduziu severamente o crescimento do sistema radicular da soja e do caupi, quando comparados com latossolos (Zambrana, 1985), explicando que no presente trabalho o fator limitante para o desenvolvimento radicular foi o grau de compactação, sendo este efeito reduzido com a aplicação de maiores doses de fósforo.

O grau de compactação limitou o desenvolvimento do sistema radicular. Para as plantas cultivadas no Neossolo Quartzarênico, obteve-se um considerável incremento da MSRA, quando a dose de fósforo foi aumentada.





GC = 95%
Dose = 0 mg dm⁻³



GC = 95%
Dose = 200 mg dm⁻³

FIGURA 9. Sistema radicular do milho cultivado no Neossolo Quartzarenico: (a) dose de 200mg dm⁻³ de P aplicada e com os graus de compactação 72 e 95%; (b) grau de compactação 72% nas doses de 0mg dm⁻³ e 200mg dm⁻³ de P aplicadas.

4.2 Latossolo Vermelho Amarelo distrófico

4.2. 1 Matéria Seca Total

À medida que aumentou a dose de fósforo, aumentou a produção de matéria seca total (MSTotal) linearmente. A maior produção (9,50g vaso⁻¹) foi obtida com a aplicação da dose de fósforo 400mg dm⁻³. Com esta dose, a absorção foi facilitada (Figura 10a), correspondente ao grau de compactação igual a 76%, no qual foi obtida a produção máxima para a dose de P aplicada (Figura 10b). A compactação foi benéfica neste ponto, segundo Borges (1995). Para os graus de compactação maiores do que este valor, a produção de matéria seca total decresceu. A menor produção (5,96 g vaso⁻¹) ocorreu para o grau de compactação 95%, como mostra a Tabela 7.

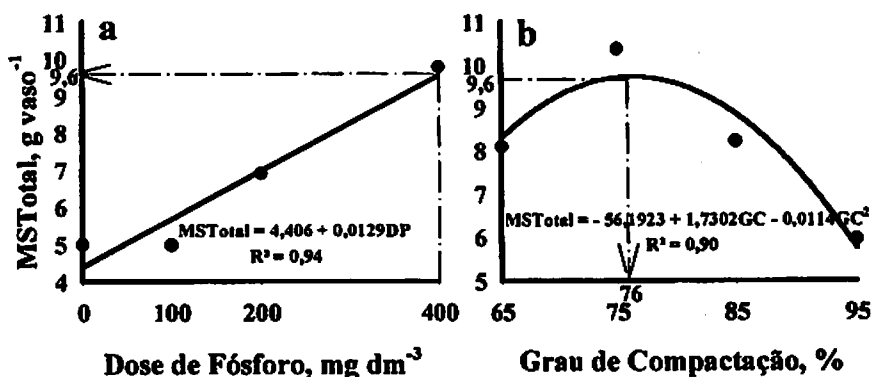


FIGURA 10. Matéria Seca Total em função das doses de fósforo (a) e dos graus de compactação (b) no Latossolo Vermelho Amarelo distrófico. (UFLA- Lavras – MG, 2001).

TABELA 7. Valores médios da matéria seca total e da parte aérea, teor e P acumulado na parte aérea para as plantas cultivadas no LVAd com a aplicação de quatro doses de fósforo (mg dm^{-3}), quando submetidas a quatro graus de compactação (%). (UFLA, Lavras, MG, 2001)

Doses de Fósforo (mg dm^{-3})	M S Total (g vaso^{-1})	M S P A (g vaso^{-1})	Teor de P na P A (g kg^{-1})	P acumulado P A (mg vaso^{-1})
0	4,99*	2,4*	1,47*	3,91*
100	4,98*	2,58*	1,30 (ns)	3,32*
200	6,90*	3,65*	1,70*	6,10*
400	9,80*	5,88*	2,89*	15,80*
Grau de compactação (%)	M S Total (g vaso^{-1})	M S P A (g vaso^{-1})	Teor de P na P A (g kg^{-1})	P acumulado P A (mg vaso^{-1})
65	8,10*	4,52*	2,77*	12,82*
75	10,38*	6,24*	2,88*	17,60*
85	8,22*	5,26*	2,20*	11,78*
95	5,96*	3,22*	2,14*	6,48*

4.2.2 Matéria Seca da Parte Aérea

À medida que se aumentou a dose de fósforo, aumentou a produção de matéria seca da parte aérea (MSRA) segundo uma parábola. A maior produção ($5,71\text{g vaso}^{-1}$) foi obtida com a aplicação da dose de fósforo (400mg dm^{-3}) (Figura 11a), correspondente ao grau de compactação 65% (Figura 11b). Na Figura 11b, observa-se que à medida que o grau de compactação aumentou, houve uma produção máxima da MSPA ($6,0\text{g vaso}^{-1}$) até o grau de compactação 73%, indicando que o grau de compactação poderia ser maior para este solo. A partir deste valor, a produção de matéria seca da parte aérea decresceu.

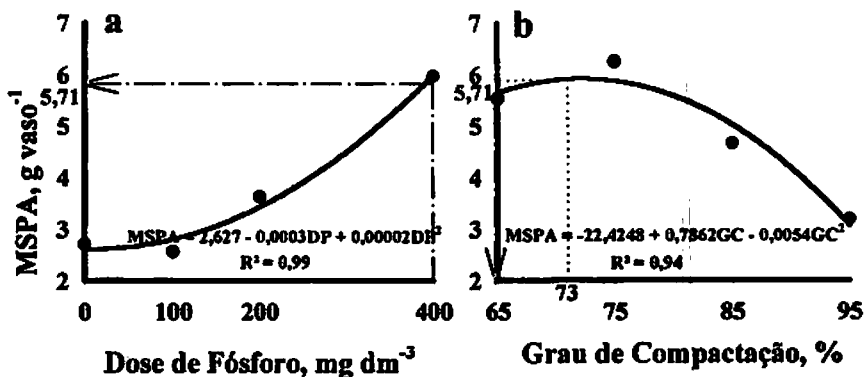


FIGURA 11. Matéria Seca da Parte Aérea em função das doses de fósforo (a) e dos graus de compactação (b) no Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (UFLA- Lavras – MG, 2001).

A menor produção de MSPPA (3,22 g vaso⁻¹) ocorreu para o grau de compactação 95%, (Tabela 7).

O aumento da compactação do solo, expresso pelo acréscimo da densidade do solo, provocou uma sensível redução na produção do milho (Phillips e Kirkman, 1962). Este fato ocorreu com a produção de matéria seca, tanto a total quanto à da parte aérea, mas esta redução foi compensada quando se aplicou maior dose de fósforo. O que explicaria os pontos de máxima seria o fato de uma leve compactação possibilitar um maior crescimento de raízes (Borges, 1995), aumentando a disponibilidade de fósforo, ou seja, maior contato solo raiz favorecendo o processo de difusão, comprometida para os graus de compactação mais altos.

Observando as Figura 12 (a) e (b), nota-se um maior crescimento das plantas de milho quando foi aplicada a maior dose de fósforo (400 mg dm⁻³), quando comparado com o obtido pela dose 0 mg dm⁻³; fato também notado para os graus de compactação 65 e 95%.

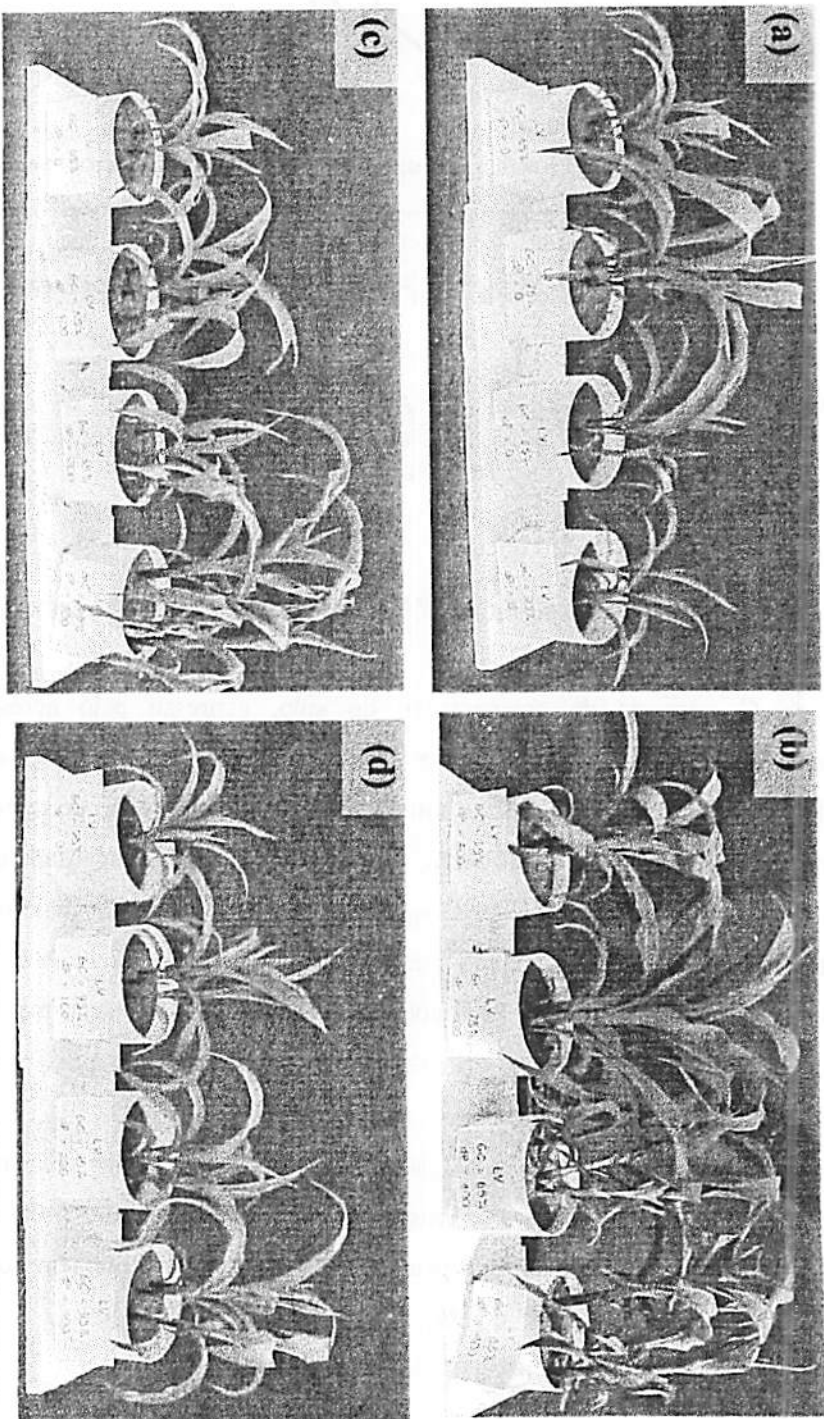


FIGURA 12. Planta do milho cultivada em Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, (a) GC = 65, 75, 85 e 95% na DP = 0 (zero) mg dm⁻³; (b) GC = 95, 85, 75 e 65% DP = 400 mg dm⁻³; (c) DP = 0 (zero), 100, 200, 400 mg dm⁻³ para o GC = 65% e (d) DP = 0 (zero), 100, 200, 400 mg dm⁻³ GC = 95%.

Ribeiro (1999) observou, trabalhando com um Latossolo Vermelho Amarelo textura franco arenosa em várias densidades do solo superiores ao Latossolo Vermelho, que o aumento da densidade do solo, ofereceu menores restrições ao crescimento e ao aproveitamento pelas plantas (soja e eucalipto) do fósforo aplicado ao solo.

Sendo este solo um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico com textura média quanto à aeração Phillips e Kirkman (1962) destacam a importância da aeração que está mais relacionada com solos argilosos, não havendo, em geral, efeito em densidades maiores em solos de textura média e grosseira.

4.2. 3 Teor de P na Parte Aérea

À medida que se aumentou a dose de fósforo, aumentou o teor de fósforo na parte aérea (Teor de P na P.A.) linearmente. O maior valor ($2,7\text{g kg}^{-1}$) foi obtido com a aplicação da dose de fósforo 400mg dm^{-3} (Figura 13a), correspondente ao grau de compactação 72% (Figura 13b). Na Figura 13b, observa-se que à medida que o grau de compactação aumentou, houve um decréscimo no teor de P na parte aérea. O menor valor ($2,14\text{g kg}^{-1}$) ocorreu para o grau de compactação 95% (Tabela 7). Os resultados corroboram os de Corrêa et al. (1998), onde utilizaram como indicador da compactação do solo o grau de compactação. Neste estudo, observou-se que houve uma redução linear na concentração dos nutrientes na parte aérea à medida que se aumentou o grau de compactação para as duas variedades de cana-de-açúcar, nos solos latossolos utilizados.

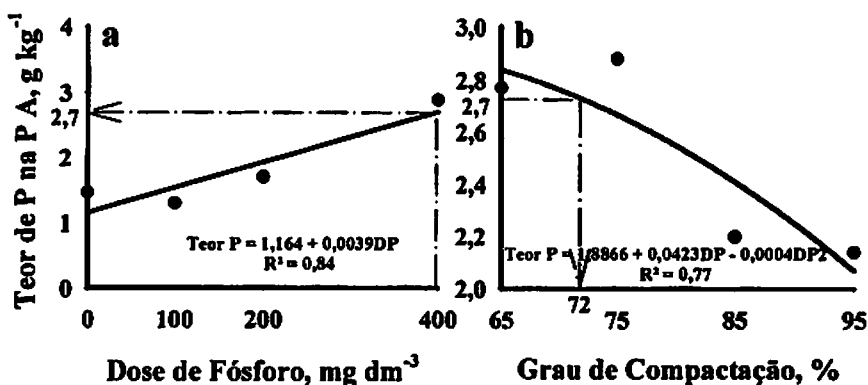


FIGURA 13. Teor de Fósforo na parte aérea em função das doses de fósforo (a) e dos graus de compactação (b) no Latossolo Vermelho Amarelo distrófico. (UFLA- Lavras – MG, 2001).

4.2. 4 Fósforo Acumulado na Parte Aérea

À medida que se aumentou a dose de fósforo, aumentou o fósforo acumulado na parte aérea. O maior valor (15,8 mg vaso⁻¹) foi obtido com a aplicação da dose de fósforo 400mg dm⁻³ (Figura 14a), correspondente ao grau de compactação 75% (Figura 14b). Na Figura 14b, observa-se que à medida que o grau de compactação aumentou, houve um aumento (16,0 mg vaso⁻¹) até o grau de compactação 75%. Para graus de compactação maiores que este valor de fósforo acumulado na parte aérea decresceu. O menor valor de P acumulado na parte aérea (6,48mg vaso⁻¹) ocorreu para o grau de compactação 95% (Tabela 7).

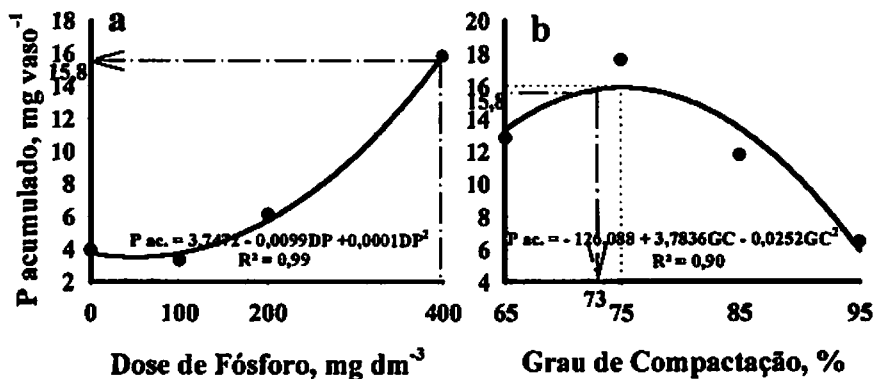


FIGURA 14. Fósforo acumulado na parte aérea em função das doses de fósforo (a) e dos graus de compactação (b) no Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (UFLA- Lavras – MG, 2001).

Os resultados são semelhantes quando se avaliou a disponibilidade de fósforo para a cultura do milho, em diferentes graus de compactação de um Latossolo Vermelho Amarelo, Santos et al. (1998) concluíram que houve um acréscimo na produção de matéria seca e no fósforo acumulado na parte aérea das plantas no grau de compactação igual a 40%, quando se aplicou a maior dose de fósforo $200\ mg\ dm^{-3}$.

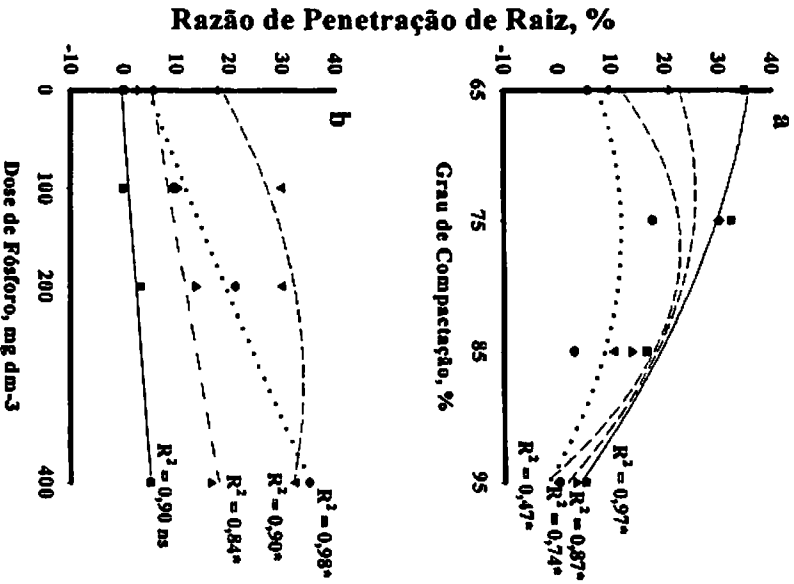
Estes resultados corroboram os resultados obtidos por Corrêa et al. (1998) quando foi avaliada a parte aérea do cafeeiro. Estes autores concluíram que o alto grau de compactação influenciou na concentração de macro e micronutrientes, sendo que P e o S sofreram redução em todos os latossolos em que as plantas foram cultivadas.

4.2. 5 Razão de Penetração de Raiz

Para o Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, na Figura 15a e Tabela 8 observa-se que houve um aumento da razão de penetração de raiz até grau de compactação 75%, exceto para a dose 400mg dm^{-3} , que apresentou uma redução na razão de penetração de raiz com o aumento do grau de compactação. A partir deste ponto, houve um decréscimo na razão de penetração de raiz. A maior restrição ao desenvolvimento do sistema radicular ocorreu para a dose de P aplicado 0 (zero) mg dm^{-3} e o maior desenvolvimento para a dose foi de 400mg dm^{-3} . À medida que a dose de P aplicada foi aumentada, houve um aumento na razão de penetração de raiz (Figura 15b). A maior restrição ao desenvolvimento do sistema radicular ocorreu na dose 0 (zero) mg dm^{-3} de P aplicada e o maior desenvolvimento ocorreu na maior dose para um mesmo grau de compactação.

As doses mais altas de fósforo estão agindo como um fator de alívio da compactação do solo, pois com o aumento das doses para todos os graus de compactação, houve um maior desenvolvimento do sistema radicular.

De acordo com a afirmação de Vepraskas (1994) de que a compactação do solo afeta a sua porosidade, induzindo a decréscimos na difusão de oxigênio, na permeabilidade de água, na resistência mecânica, etc. Houve uma redução no comprimento do sistema radicular alterando o diâmetro da raiz para maiores valores, compensando a redução do comprimento. Neste caso a presença de raízes finas também é notada, pois foi influenciada pela aplicação do fósforo Figura 17.



Dose de P (mg dm⁻³)

●	RPR0 = -494,5037 + 13,4378GC - 0,0872GC ²
▼	RPR100 = -436,0262 + 11,9294GC - 0,0775GC ²
▲	RPR200 = -234,2657 + 7,1417GC - 0,0362GC ²
■	RPR400 = -33,5329 - 2,5210GC - 0,0224GC ²

Grau Compactação (%)

●	RPR0s = 4,6410 + 0,0699DP
▼	RPR10s = 18,6681 + 0,1027DP + 0,0002DP ²
▲	RPR20s = 5,29 + 0,0316DP
■	RPR40s = -0,3640 + 0,0135DP

FIGURA 15. Razão de Penetração de Raiz em função das doses de fósforo e (a) e dos graus de compactação (b) no Latossolo Vermelho Amarelo distrófico. (UFPA-Lavras - MG, 2001)

TABELA 8. Valores médios da Razão da Penetração de Raiz - RPR (%) de plantas de milho cultivadas no Latossolo Vermelho Amarelo distrófico com a aplicação de quatro doses de fósforo (mg dm^{-3}) quando submetidas a quatro graus de compactação (%). (UFLA, Lavras, MG, 2001)

Grau de Compactação (%)	Doses de Fósforo (mg dm^{-3})			
	0	100	200	400
	----- RPR (%) -----			
65	5,57	9,33	21,13	34,90
75	37,63	29,27	30,20	32,37
85	2,82	10,37	13,65	16,40
95 (ns)	0,00	0,00	3,10	4,92

4.2.6 Matéria Seca da Raiz

Na Figura 16a observa-se que houve uma redução da MSRA à medida que o grau de compactação aumentou para as doses 100 e 400mg dm^{-3} . Entretanto, para as doses 0 (zero) e 200mg dm^{-3} , à medida que o grau de compactação aumentou, houve um aumento na MSRA até o grau de compactação 79% ($2,68\text{g vaso}^{-1}$) para a dose 0 (zero) mg dm^{-3} e até 82% ($2,97\text{g vaso}^{-1}$) para a dose 200 mg dm^{-3} . Além destes pontos, houve um decréscimo da produção de matéria seca da raiz com o aumento do grau de compactação. Para um mesmo grau de compactação, a maior produção de MSRA ocorreu na dose 400mg dm^{-3} e a menor, na dose 0 (zero) mg dm^{-3} .

Na Figura 16b, observa-se, em geral, que à medida que a dose de fósforo aplicada aumentou para todos os graus de compactação, a produção de matéria seca da raiz aumentou. Para uma mesma dose de fósforo aplicada, a maior produção de MSRA ocorreu no grau de compactação 75% e menor, no grau de compactação 95% (Tabela 9). Podendo ser observado este efeito através da Figura 17.

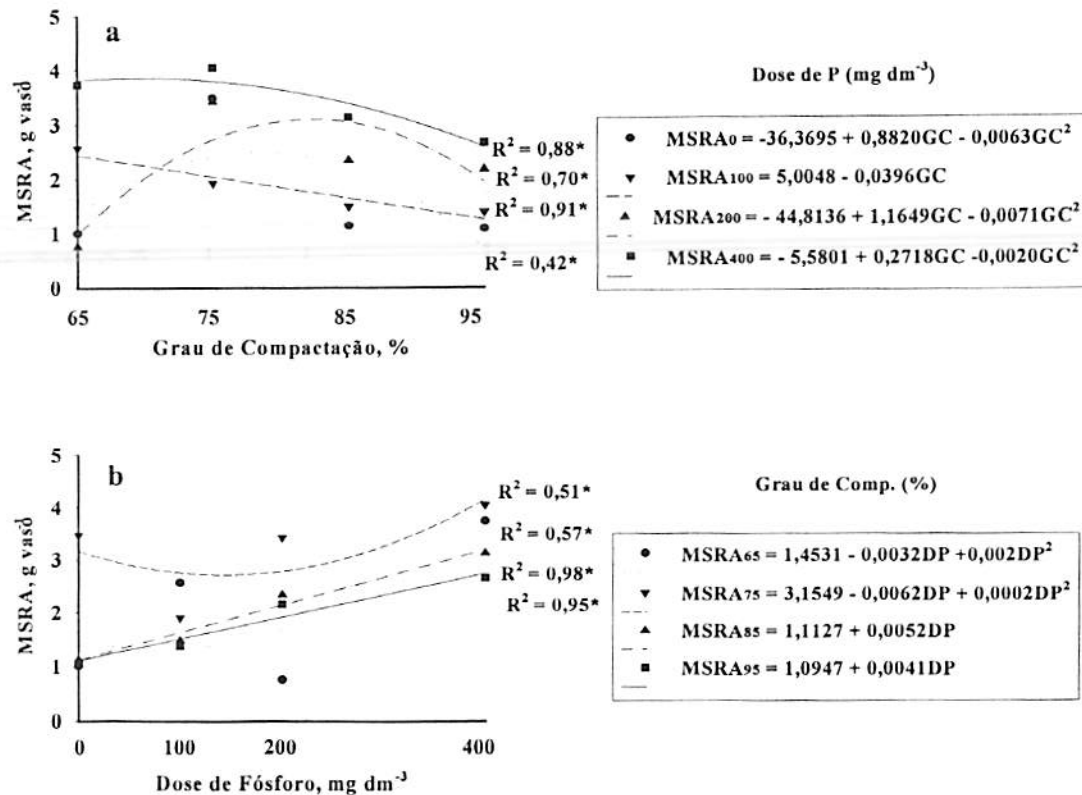
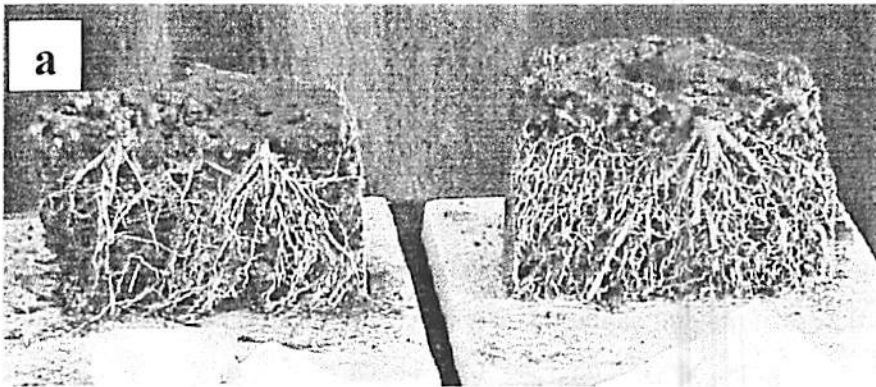


FIGURA 16. Matéria Seca da Raiz em função dos graus de compactação (a) e das doses de fósforo (b) no Latossolo Vermelho Amarelo distrófico. (UFLA- Lavras – MG, 2001)

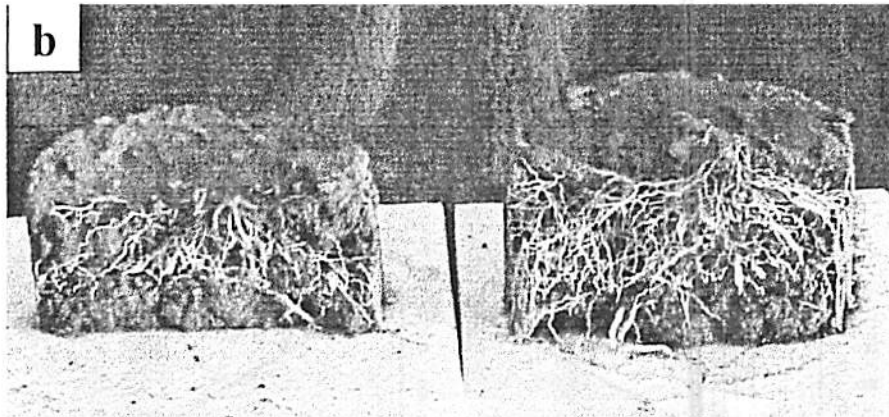
TABELA 9. Valores médios da Matéria Seca da Raiz - MSRA (%) de plantas de milho cultivadas no Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, com a aplicação de quatro doses de fósforo (mg dm^{-3}) quando submetidas a quatro graus de compactação (%). (UFLA, Lavras, MG, 2001)

Grau de Compactação (%)	Doses de Fósforo (mg dm^{-3})			
	0	100	200	400
	----- MSRA (g vaso^{-1}) -----			
65	1,00	2,56	0,75	3,73
75	3,47	1,91	3,41	4,04
85	1,13	1,49	2,33	3,12
95	1,07	1,38	2,16	2,65



Dose = 0 mg dm⁻³
GC = 65%

Dose = 400 mg dm⁻³
GC = 65%



Dose = 0 mg dm⁻³
GC = 95%

Dose = 400 mg dm⁻³
GC = 95%

FIGURA 17. Sistema radicular do milho cultivado em um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico com as doses de 0mg dm⁻³ e 400mg dm⁻³ de P aplicada e para o grau de compactação (a) 65% e (b) 95%.

4.3. Latossolo Vermelho distrófico típico

4.3.1 Matéria Seca Total

Observa-se que no LVd, à medida que se aumentou a dose de fósforo, aumentou a produção de matéria seca total (MSTotal) linearmente. No entanto, para a dose zero mg dm^{-3} aplicada, não houve diferença significativa ao nível de 5%. A maior produção ($10,6 \text{ g vaso}^{-1}$) foi obtida com a aplicação da dose de fósforo 400 mg dm^{-3} (Figura 18a), correspondente ao grau de compactação 65% (Figura 18b). Na Figura 18b, observa-se que à medida que o grau de compactação aumentou, houve um decréscimo acentuado na produção de matéria seca total. A menor de MSTotal ($4,79 \text{ g vaso}^{-1}$) ocorreu para o grau de compactação 95%, como mostra a Tabela 10.

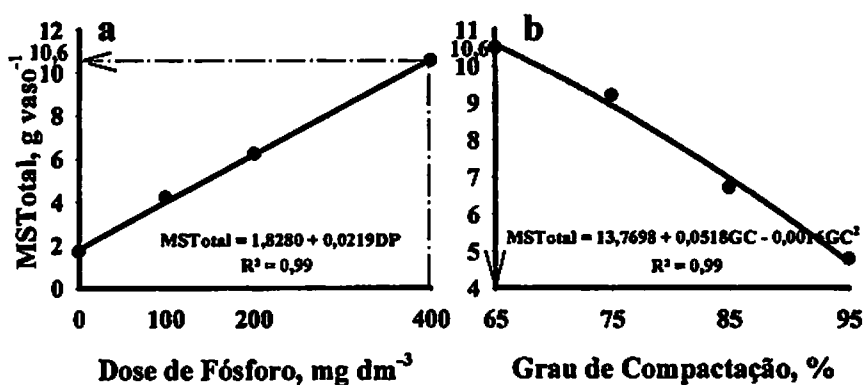


FIGURA 18. Matéria Seca Total em função das doses de fósforo (a) e dos graus de compactação (b) no Latossolo Vermelho distrófico típico. (UFLA- Lavras – MG, 2001).

TABELA 10. Valores médios da matéria seca total e da parte aérea, teor e P acumulado na parte aérea para as plantas cultivadas no Latossolo Vermelho distrófico típico, com a aplicação de quatro doses de fósforo (mg dm^{-3}) quando submetidas a quatro graus de compactação (%) (UFLA, Lavras, MG, 2001)

Doses de Fósforo (mg dm^{-3})	M S Total (g vaso^{-1})	M S P A (g vaso^{-1})	Teor de P na P A (g kg^{-1})	P acumulado P A (mg vaso^{-1})
0	1,69 (ns)	0,88 (ns)	1,12 (ns)	0,91 (ns)
100	4,20*	2,21*	1,38 (ns)	2,94 (ns)
200	6,22*	3,49*	2,10*	6,94*
400	10,55*	5,84*	3,35*	19,74*
Grau de compactação (%)	M S Total (g vaso^{-1})	M S P A (g vaso^{-1})	Teor de P na P A (g kg^{-1})	P acumulado P A (mg vaso^{-1})
65	10,50*	5,86*	3,15*	17,90*
75	9,20*	5,61*	3,16*	16,68*
85	6,71*	4,17*	2,66*	10,70*
95	4,79*	2,53*	1,61*	4,02*

Onde: * = houve diferença significativa ao nível de 5%; ns = não foi significativa.

4.3.2 Matéria Seca da Parte Aérea

Para o Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd), à medida que aumentou a dose de fósforo, aumentou a produção de matéria seca total linearmente. A maior produção ($5,9\text{g vaso}^{-1}$) foi obtida com a aplicação da dose de fósforo 400mg dm^{-3} (Figura 19a), correspondente ao grau de compactação 65%, (Figura 19b). Na Figura 19b, observa-se que à medida que o grau de compactação aumentou, houve um decréscimo na produção de matéria seca da parte aérea. A menor produção de MSPA ($2,53\text{g vaso}^{-1}$) ocorreu para o grau de compactação 95% (Tabela 10).

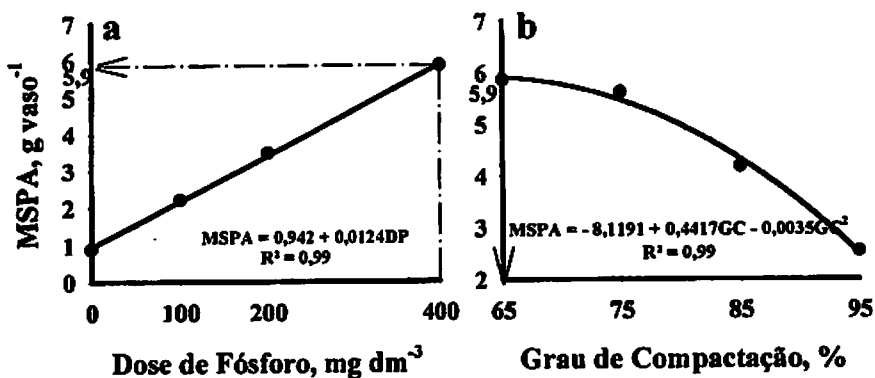


FIGURA 19. Matéria Seca da Parte Aérea em função das doses de fósforo (a) e dos graus de compactação (b) no Latossolo Vermelho distrófico típico, (UFLA- Lavras – MG, 2001).

Para a matéria seca, tanto total quanto da parte aérea, somente se pode obter uma maior produção com o acréscimo das doses de fósforo, sendo esta no grau de compactação mais baixo aplicado. O fósforo funcionou como um agente de alívio o que pode ser observado na Figura 20.

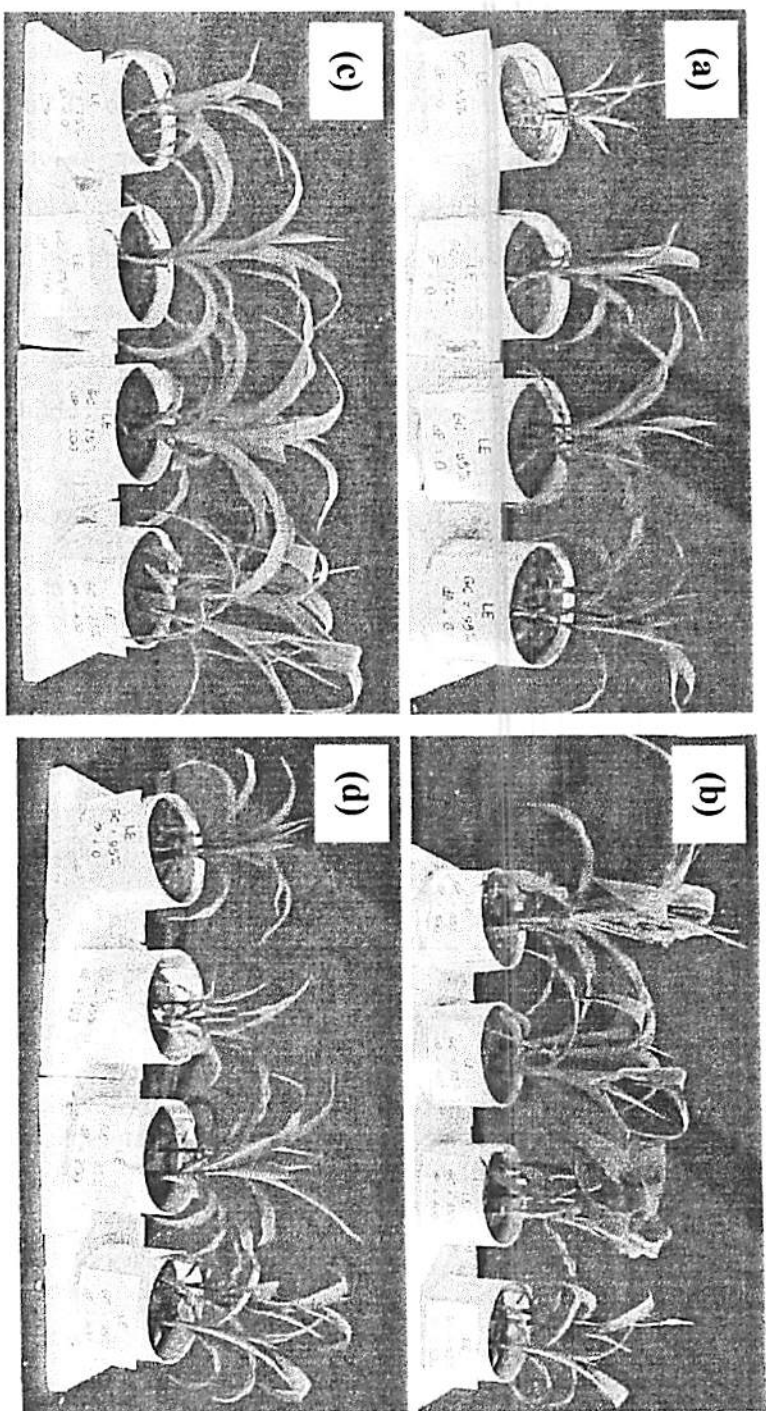


FIGURA 20. Planta do milho cultivada em Latossolo Vermelho distrófico típico (a) GC = 65, 75, 85 e 95% na DP = 0 (zero) mg dm^{-3} ; (b) GC = 95, 85, 75 e 65% na DP = 400 mg dm^{-3} ; (c) DP = 0 (zero), 100, 200, 400 mg dm^{-3} GC = 75% e (d) DP = 0 (zero), 100, 200, 400 mg dm^{-3} ; GC = 95%.

4.3.3 Teor de P na Parte Aérea

Para o Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd), à medida que aumentou a dose de fósforo, aumentou o teor de fósforo na parte aérea linearmente. O maior valor ($3,2\text{g vaso}^{-1}$) foi obtido com a aplicação da dose de fósforo 400mg dm^{-3} (Figura 21a), correspondente ao grau de compactação 69% (Figura 21b). Na Figura 21b, observa-se que à medida que o grau de compactação aumentou, houve um aumento no teor de fósforo até o grau de compactação 69%, que corresponde ao maior valor obtido. Para grau de compactação maior que este valor, o teor de P decresceu. O menor valor do teor de P ($1,61\text{ g kg}^{-1}$) ocorreu para o grau de compactação 95% (Tabela 10).

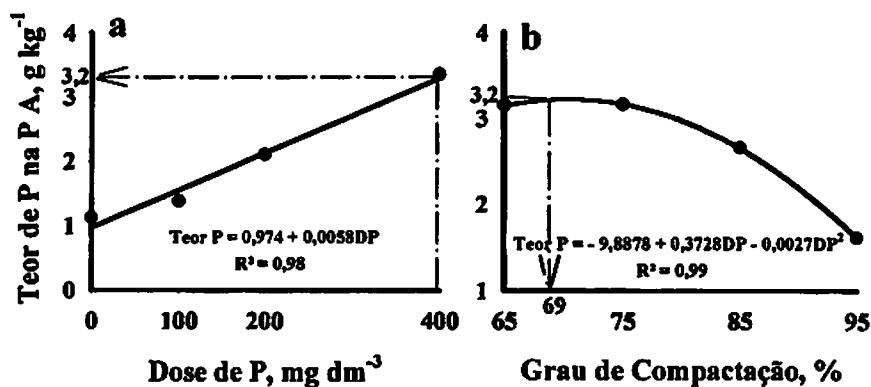


FIGURA 21. Teor de Fósforo na parte aérea em função das doses de fósforo (a) e dos graus de compactação (b) no Latossolo Vermelho distrófico típico. (UFLA- Lavras – MG, 2001).

4.3.4 Fósforo Acumulado na Parte Aérea

Para o Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd), à medida que aumentou a dose de fósforo, aumentou o teor de fósforo na parte aérea linearmente. O maior valor ($19,0\text{mg vaso}^{-1}$) foi obtido com a aplicação da dose de fósforo 400 mg dm^{-3} (Figura 22a), correspondente ao grau de compactação 66% (Figura 22b). Na Figura 22b, observa-se que à medida que o grau de compactação aumentou, houve um decréscimo no teor de fósforo na parte aérea. O menor valor ($4,02\text{mg vaso}^{-1}$) ocorreu para o grau de compactação 95% (Tabela 10).

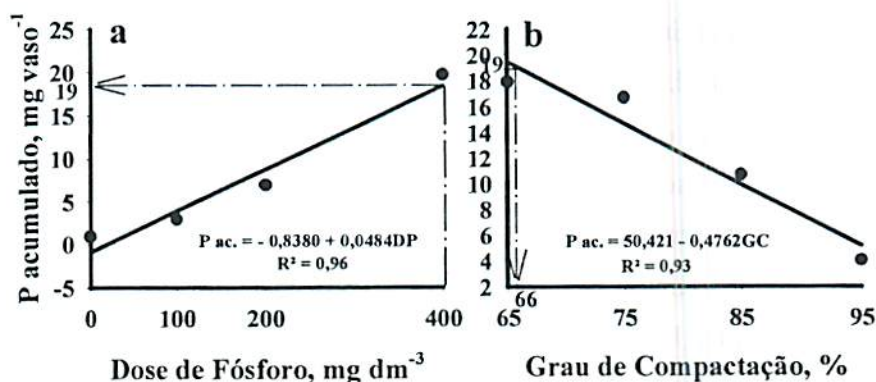


FIGURA 22. Fósforo acumulado na parte aérea em função das doses de fósforo (a) e dos graus de compactação (b) no Latossolo Vermelho distrófico típico (UFLA- Lavras – MG, 2001).

4.3.5 Razão de Penetração de Raiz

Para o Latossolo Vermelho distrófico típico (Figura 23a e Tabela 11), observa-se que a razão de penetração de raiz decresceu com o aumento do grau de compactação para todas as doses, exceto para a dose de 400mg dm^{-3} . Nesta dose, a razão de penetração aumentou com o acréscimo do

grau de compactação. Este aumento foi verificado até o grau de compactação de 75%, ou seja, até este ponto houve um maior contato do solo e raiz a compactação foi benéfica (Borges, 1995). Para graus de compactação maiores do que este valor, a razão de penetração de raízes reduziu. Para um mesmo grau de compactação a maior restrição ao desenvolvimento do sistema radicular e o maior desenvolvimento ocorreram na dose 0 (zero) mg dm^{-3} . À medida que a dose de P aplicado aumentou, houve um aumento na razão de penetração de raiz para todos os graus de compactação (Figuras 23b). Nesta Figura observa-se também que o grau de compactação mais restritivo ao desenvolvimento do sistema radicular foi o de 95%, para todas as doses, enquanto o que mais favoreceu o desenvolvimento foi o de 75%.

Rosolem et al. (1999) ao estudar o crescimento de plântulas de milho concluíram que uma em uma mesma densidade do solo, quanto mais argiloso fosse o solo, maior seria a resistência à penetração de raízes, semelhante aos resultados obtidos para este solo.

Em um LV muito argiloso Borges (1985) concluiu que a resistência mecânica foi o fator limitante mais importante na elongação das raízes no solo compactado.

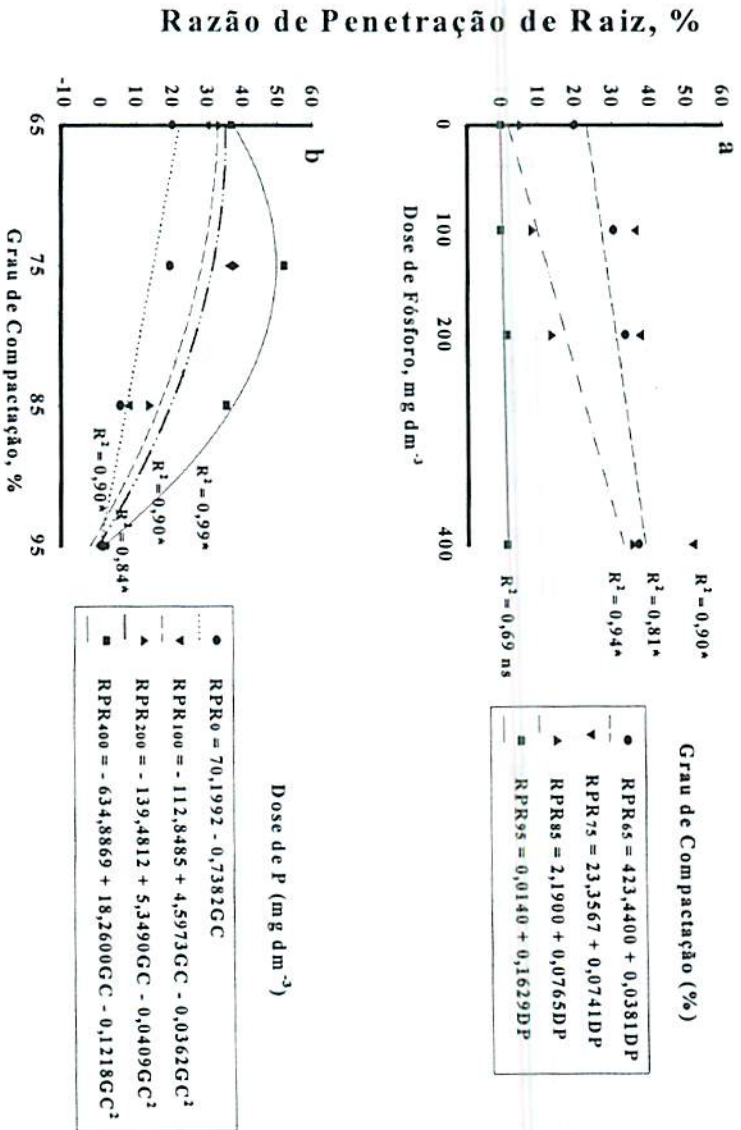


FIGURA 23. Razão de Penetração de Raiz em função das doses de fósforo e (a) e dos graus de compactação (b) no Latossolo Vermelho distrófico típico. (UFLA - Lavras - MG, 2001)

TABELA 11. Valores médios da Razão da Penetração de Raiz - RPR (%) por plantas de milho cultivadas no Latossolo Vermelho distrófico típico com a aplicação de quatro doses de fósforo (mg dm^{-3}) quando submetidas a quatro graus de compactação (%). (UFLA, Lavras, MG, 2001).

Grau de Compactação (%)	Doses de Fósforo (mg dm^{-3})			
	0	100	200	400
	----- RPR (%) -----			
65	19,98	30,34	33,33	36,76
75	19,24	36,56	37,70	51,76
85	5,36	8,25	13,51	35,16
95 (ns)	0,00	0,00	1,52	1,45

Onde: ns não significativo ao nível de 5% e RPR = Razão de Penetração de raiz na dose 400mg dm^{-3} .

Também foi observado que a resistência mecânica foi o fator limitante para a elongação do sistema radicular por Ribeiro (1999), trabalhando com soja e eucalipto em diferentes níveis de densidade do solo.

4.3.6 Matéria Seca da Raiz

Na Figura 24a e Tabela 12, observa-se que houve um decréscimo linear na produção de MSRA à medida que aumentou o grau de compactação, sendo que a maior produção ocorreu no $\text{GC}=65\%$ ($2,50\text{g vaso}^{-1}$) e a menor no $\text{GC}=95\%$ ($1,35\text{g vaso}^{-1}$), com um decréscimo de 46% em relação à maior produção (Figura 25). Quando a dose de P foi aumentada (Figura 24b e Tabela 12), observa-se que ocorreu um incremento na produção de MSRA, sendo a menor produção para a dose (zero) mg dm^{-3} de P ($0,87\text{g vaso}^{-1}$) e a maior, para dose 400mg dm^{-3} ($3,31\text{g vaso}^{-1}$) (Figura 25); assim, com o aumento da dose de P, houve um incremento de 280% na produção (Tabela 12).

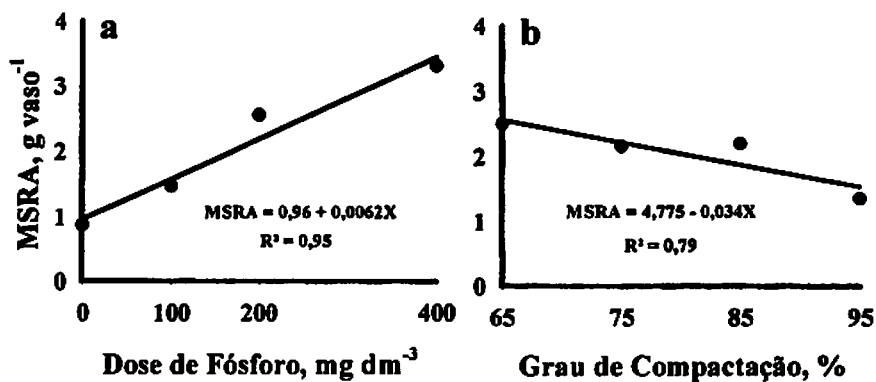


FIGURA 24. Matéria da Raiz em função das doses de fósforo (a) e dos graus de compactação (b) no Latossolo Vermelho distrófico típico. (UFLA- Lavras – MG, 2001).

TABELA 12. Equações e médias de três repetições da Matéria Seca da Raiz (MSRA) em função do grau de compactação e dose de fósforo

Doses de Fósforo (mg dm ⁻³)	MSRA (g vaso ⁻¹)	Incremento (%)
0	0,87	
100	1,47	69
200	2,56	194
400	3,31	280
Grau de compactação (%)	MSRA (g vaso ⁻¹)	Redução (%)
65	2,50	
75	2,16	14
85	2,21	12
95	1,35	46

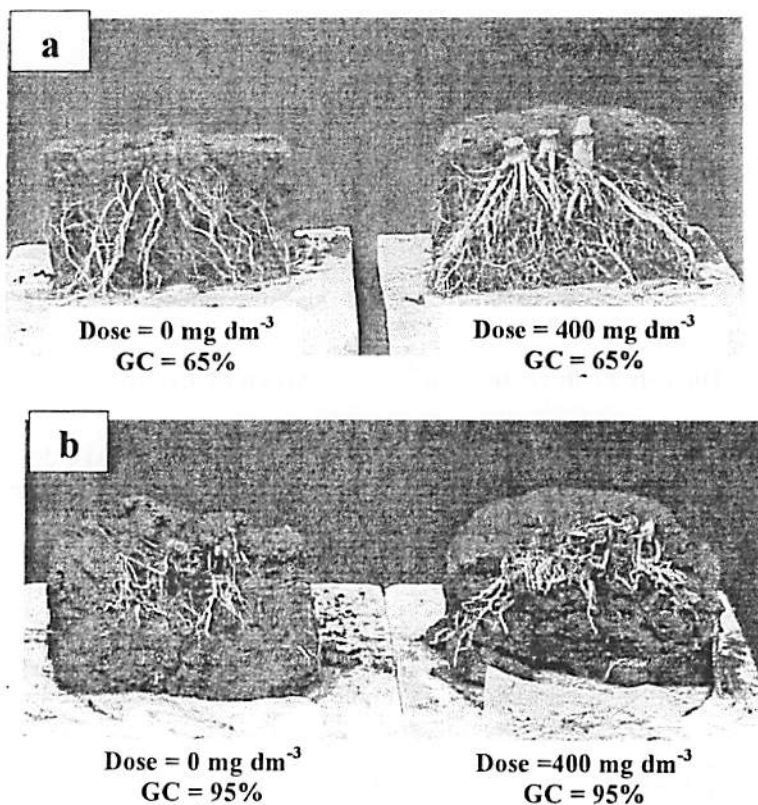


FIGURA 25. Sistema radicular do milho cultivado em um Latossolo Vermelho distrófico com as doses de 0mg dm⁻³ e 400mg dm⁻³ de P aplicada e para o grau de compactação (a) 65% e (b) 95%.

A influência da textura do solo no grau de compactação foi estudada por Raney e Edminister (1965); solos de textura média a moderadamente grosseira são mais susceptíveis à compactação. Os autores observaram que dois solos argilosos com uma mesma distribuição granulométrica, podem apresentar grandes diferenças nas propriedades coloidais, dependendo do tipo do mineral presente, bem como o seu arranjo no material de solo. De acordo com os resultados obtidos para os três solos estudados verifica-se que a quantidade de P na parte aérea variou entre os solos, e ocorreu um acréscimo à medida que

aumentou a dose de fósforo, aumentando também de acordo com aumento do teor de argila dos solos estudados.

Aumentando a dose de fósforo para o LVd, aumentou o teor de P acumulado na parte aérea. A produção de matéria seca da parte aérea foi menor quando comparada com o LVAd, pois se obteve uma maior concentração causado pela maior compactação. Mesmo a produção de MSRA sendo menor para o LVd, o sistema radicular foi mais eficiente na absorção, além da difusão ter sido maior também, par este caso o conteúdo de água no LVd facilitou a difusão sendo corroborando aos autores Villani et al., (1993), que afirmam que o conteúdo de água do solo, está diretamente relacionado à difusão do fósforo no solo. Observaram que é mais efetivo aumentar a dose de fósforo no solo arenoso que no argiloso, onde estudou a difusão de P em solos diferentes texturas e níveis de umidade. observaram que no solo mais argiloso (LV), mesmo com doses de fósforo maiores do que as testadas no LVAm. Tornando claro o problema da difusão de fósforo nos solos com maior adsorção LV é maior que para o LVA, no presente trabalho para um mesmo grau de compactação, o fósforo acumulado foi maior quando se aumentou a dose de fósforo aplicada.

Em um LVA muito argiloso, Alvarenga et al. (1996) mostraram que com o aumento da densidade do solo, houve um decréscimo na porosidade total e na macroporosidade das amostras e acréscimo microporosidade e na resistência à penetração de raízes, semelhantes às observações do presente trabalho.

Ribeiro (1999) observou, trabalhando com um LVA textura franco arenosa em várias Ds superiores ao LV, que o aumento da densidade do solo, ofereceu menos restrições ao crescimento e ao aproveitamento pelas plantas, (soja e eucalipto) do fósforo aplicado ao solo. Com o aumento da Ds o crescimento das espécies estudadas (mais prejudicial) diminui, o que foi mais pronunciado no LV do que no LVA.

Com os resultados obtidos, para todas as variáveis analisadas, para os três solos, RQ, LVAd e LVd, houve uma influência da textura, relacionada à absorção de fósforo, pelas plantas de milho, ou seja, para o RQ a produção ficará comprometida com graus de compactação, mais baixos. O mesmo ocorrendo para o LVd. Sendo que para o LVAd textura média os graus de compactação poderão ser um pouco mais alto quando comparados com os dois primeiros.

5 CONCLUSÕES

Quanto maiores os graus de compactação, maiores foram as doses de fósforo a serem aplicadas, para a obtenção de uma produção satisfatória variáveis estudadas: matéria seca total e da parte aérea, teor e fósforo acumulado na parte aérea, matéria seca da raiz e para o aumento na razão de penetração de raiz.

O fósforo aplicado funcionou como um fator de alívio da compactação do solo, resultando em uma maior produção para um mesmo grau de compactação.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACHÁ, L.P. Latossolo Vermelho-Amarelo de tabuleiro no Espírito Santo – formação características e classificação. Recife, UFRPe, 1976. 113p. (Tese de Doutorado).
- ALVARENGA, R.C.; COSTA, L.M.; MOURA FILHO, W. REGAZZI, A.J. Crescimento de Raízes de Leguminosas em camadas de Solo compactadas artificialmente. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.20, n.2, p.319-326, maio/ago. 1996.
- ANGHINONI, I. Predicting the most efficient phosphate placement for corn using a simulation model. West Lafayette: Purdue University, 1979. 170p. (Tese de Doutorado).
- ANGHINONI, I. Uso do fósforo pelo milho afetado pela fração de solo fertilizada com fosfato solúvel. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.16, n.3, p.349-353, out./dez. 1992.
- ANGHINONI, I.; BARBER, S.A. Phosphorus influx and growth characteristics of corn roots as influenced by phosphorus supply. *Agronomy Journal*, Madison, v.72, n.4, p.682-688, July/Aug. 1980.
- ANGHINONI, I.; MEURER, E. J., Eficiência de absorção de nutrientes pelas raízes. In: WHORKSHOP SOBRE SISTEMA RADICULAR: METODOLOGIA E ESTUDO DE CASOS, 1999, *Anais...* 1999. p.57-88.
- ARAGÓN, A.; GARCÍA, M.G.; FILGUEIRA, R.R. ; PACHEPSKY, Y.A. Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test; The relationship with organic carbon and water content. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v.56, n.3/4, p.197-204, Aug. 2000.
- ASADY, G.H.; SMUCKER, A.J.M.; ADAMS, M.W. Seedling for the quantitative measurement of root tolerances to compacted soil. *Crop Science*, Madison, v.25, n.5, p.802-806, Sept./Oct. 1985.
- BALLESTRO, S.D. Efeito da semeadura de milho em quatro níveis de umidade na compactação de um Latossolo Vermelho Escuro. Piracicaba: ESALQ/USP, 1992. 89p. (Tese – Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas).

- BARBER, R.G.; HERRERA, C.; DIAZ, O. Compaction status and compaction suscetibility of alluvial soil in Santa Cruz, Bolivia. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.15, n.3/4, p.153-67, 1989.
- BARBER, S.A. **Soil nutrient biavailability: a mechanistic approach**. New York: John Wiley & Sons, 1995. 414p.
- BARZEGAR, A.R.; M.A.ASSODAR, M.A. Effectiveness of sugarcane residue incorporation at different water contents and Proctor compaction loads in reducing soil compactibility. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.57, p.167-172, 2000.
- BAUMGARTL, T.; HORN, R. Effect of aggregate stability on soil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.19, n.3/4, p.203-213, 1991.
- BAVER, L.D.; GARDENER, W.H.; GARDNER, W.R. **Soil physics**. 3.ed. New York: J. Wiley, 1956. 489p.
- BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. **Física de suelos**. Mexico: Hispano Americana, 1973. 529p.
- BENKO, V. Phosphorus diffusion in soil. **Soil & Fertilizers**, Oxford, v.26, p.227, 1963.
- BODMAN, G.B.; CONSTANTIN, G.K. Influence of particle size distribution in soil compaction. **Hilgardia**, Berkeley, v.36, n.15, p.567-91, Oct. 1965.
- BOELS, D.; DAVIES, D.B.; JOHNSTON, A.E. **Soil degradation**. Rotterdam: Boalkema, 1982. 180p.
- BORCH, K.; BOUMA, T.; BROWN, K.; LYNCH, J.P. Interactions of ethylene and phosphorus nutrition on root growth. In: FLORES, H.E; LYNCH, J.P.; EISSENSTAT, D. (eds). **Advances and perspectives on function of plant roots**. Rockville: American Society of Plant Physiologists, 1998. p.391-393.
- BORGES, E.N. **Efeito de doses de gesso + massa seca de crotalária e de níveis de compactação em atributos físicos de um latossolo vermelho-escuro**. Piracicaba: ESALQ, 1995. 136p. (Tese - Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas).
- BORGES, E.N.; LOMBARDI NETO, F.; CORRÊA, G.F.E.; BORGES, E.V.S. **Alterações físicas introduzidas por diferentes níveis de compactação em**

Latossolo Vermelho Escuro textura média. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.9, p.1663-1667, set. 1999.

- BORGES, E.V.S. **Efeito da compactação e da desinfestação do solo no desenvolvimento radicular e nodulação da soja, inoculada ou não com *Bradyrhizobium japonicum***. Piracicaba: ESALQ, 1997. 49p. (Dissertação – Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)
- BORKET, C.M.; BARBER, S.A. Soybean shoot na root growth and phosphorus concentration as affected by phosphate placement. **Soil Science Society of America Journal**, Alexandria, v.49, n.1, p.152-155, Jan./Feb. 1985.
- BOWEN, H.D. Alleviating mechanical impedance. In: ARKIN, G.F.; TAYLOR, H.M. **Modifying the root environment to reduce crop stress**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1981. cap. 2, p.21-57.
- CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba, 1997. 132p.
- CAMPEBELL, D.J.; DICKSON, J.N. Effect of four alternative front tires on seedbed compaction by tractor fitted with arear whwll designed to minimize compaction. **Journal of Agricultural Engineeering Research**, London, v.29, n.1, p.83-91, 1984.
- CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 3.ed. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos,1973. v.1, 242p.
- CARVALHO, L.A.; SANTANA, M.B.; PAIVA, A.Q.; SOUZA, L.S. Comportamento da parte aérea e de raízes de mandioca “cigana preta” submetidas a diferentes níveis de compactação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 1998, Brasília. **Anais...** Brasília, 1998.
- CORNISH, P.H.; SO H.B.; McWILLIAM, J.R. Effects of soil bulk density and water regime on root growth and uptake of phosphorus by ryegrass. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v.35, p.631-644, 1984.
- CORRÊA, J.B.D.; ANDRADE, L.A.; DIAS JUNIOR, M. de S.; ALVES, V.G. Efeito da compactação na concentração foliar de nutrientes na cana-de-açúcar em três tipos de solos. In: FERTBIO'98, 1998, Lavras. **Anais...** Lavras, 1998. p.57.

- CORSINI, P.C.; FERRAUDO, A. S. Efeito de sistemas de cultivos na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em Latossolo Roxo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.34, n.2, p.289-298, fev. 1999.
- CURI, N.; LARACH, J.O.I.; KÄMPF, N.; MONIZ, A.C.; FONTES, L.E.F. **Vocabulário de ciência do solo**. Campinas: SBC, 1993. 89p.
- DIAS JUNIOR, M. de S.; PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.20 p.175-182, mai/ago. 1996.
- DIAS JÚNIOR, M.S. Compactação do solo In: UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS. **Roteiro das aulas práticas de física do solo**. Lavras, 1996. p.27-29
- DIAZ ZAMBRANA, M.O. **Efeito da compactação sobre propriedades físicas em três materiais de solo e sobre o crescimento das raízes de soja e caupi**. Viçosa: UFV, 1994. 58p (Dissertação – Mestrado em solos e Nutrição de Plantas).
- DÍAZ-ZORITA, M. Effect of deep-tillage and nitrogen fertilization interactions on dryland corn (*Zea mays* L.) productivity. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.54, n.1/2, p.11-19, Mar. 2000.
- DONAHUE, R.L. **Soils: introduction to soils and plant growth**. 2.ed. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1965. 363p.
- EDWARDS, W.W.; FEHRENBACHER, J.B.; VARVA, J.P. The effect of discret ped density on corn root penetration in planossol. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madson, v.28, n.4, p.560-564, July/Aug. 1964.
- EKWUE, E.I. STONE, R.J. Density-moisture relations of some Trinidadian soils incorporated with sewage sludge. *Transactions of the American Society Agricultural Engineering*, St. Joseph, v. n. p. N. 40,
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p. (EMBRAPA- CNPS. Documentos, 1).

FERNANDEZ, E.M.; CRUSCIOL, C.A.C.; THIMOTEO, C.M. de S.; ROSOLEM, C.A. Matéria seca e nutrição da soja em razão da compactação do solo e adubação fosfatada. *Científica*, Jaboticabal, v.23, n.1, p.117-132, 1995.

FERREIRA, M.M. **Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos brasileiros.** Viçosa, MG: UFV. Imprensa Universitária, 1988. 79p. (Tese Doutorado).

FIGUEIREDO, L.H.A.; DIAS JUNIOR, M.S. Efeito dos Sistemas de preparo do solo na $D_{s_{m\acute{a}x}}$ e Umidade ótima de compactação em um Latossolo Roxo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 1997, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: SBSC, 1997. p.26.

GARCIA, M.C.; BENEDITO, E.; DIAS, F. Iniciación de estudio de la compactación de los suelos em Galicia. *Anales de Edafologia y Agrobiologia*, Madrid, v.45, p.1415-30, 1986.

GROHMANN, F.; QUEIROZ NETO, J.P. Efeito da Compactação Artificial de dois Solos Limo-Argilosos sobre a Penetração de Raízes de Algodão. *Bragantia*, Campinas, v.25, n.38, p.421-432, dez. 1966.

GROLEAU-RENAUD, V.; PLANTUREUX, S.; GUCKERT, A. Influence of plant morphology on root exudation of maize subjected to mechanical impedance in hydroponic conditions. *Plant and Soil*, Dordrecht, v.201, n.2, p.231-239, Apr. 1998.

GUPTA, S.C.; ALLMARAS, R.R. Models to access the susceptibility of soil to excessive compaction. *Advances in Soil Science*, v.6, p.65-100, 1987

GUPTA, S.C.; HADAS, A.; VOOHEERS, W.B.; WOLF, D.; LARSON, W.E.; SCHNEIDER, E.C. Modeling soil mechanical behavior during compaction. In: LARSON, W.L.; BLAKE, G.R.; ALLMARAS, R.R.; VOOHEERS, W.B.; GUPTA S.C. (eds). **Mechanical and related process in structured agricultural soils.** The Netherlands: Kluwer Academic Publishes, 1989. p.137-152, 1989.

HANKASSON, I.; LIPIEC J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.53, p.7-85, 2000.

- HARREL, J.W.; SAEED, M. The effects of moisture on phosphorus diffusion in coal mine spoils. *Soil Science*, Baltimore, v.129, n.5, p.261-265, May 1980.
- HARRIS, W.L. The soil compaction process. In: BARNES, K.K. (ed.) **Compaction of agricultural soils**. St. Joseph: ASAE, 1971. p.9-44.
- HE, C.J.; MORGAN, P.W.; DREW, M.C. Enhanced sensitivity to ethylene in nitrogen or phosphate – starved roots of *Zea mays* L. during aerenchyma formation. *Plant Physiology*, Rockville, v.98, n.1, p.137-142, Jan. 1992.
- HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. New York: Academic Press, 1982. 365p.
- HILLEL, D. **Soil and water: physical principles and process**. New York: Academic Press, 1971. 288p.
- HINGSTON, F.J.; POSNER, A.M.; QUIRK, J.P. Anion adsorption by goethite and gibbsite. I The role of proton in determining adsorption envelopes. *Journal of Soil Science*, Oxford, v.23, n.2 p.177-192, June 1972.
- HIRA, G.S.; SINGH, N.T. Observed and Predicted Rates of Phosphorus Diffusion in Soils of varying Density and Water content. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.41, n.3, p.537-40, May/June 1977.
- JUANG, T.C.; UEHARA, G. Effects of ground-water table and soil compaction on nutrient element uptake and growth of sugar cane. **Proc. Int. Soc. Can. Tech.**, v.58, p.679-87, 1969.
- KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Phosphate uptake and corn root distribution as affected by fertilizer placement and soil tillage. **Agronomy (Trends in Agricultural Science)**, Arlington, v.1 p.111-115, 1993.
- KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Crescimento radicular e aéreo do milho em vasos em função do nível de fósforo no solo e da localização do adubo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.19, n.3, p.403-408, set./dez. 1995.
- KONDO, M.K. **Compressibilidade de três latossolos sob diferentes usos**. Lavras: UFLA, 1998. 105p (Dissertação – Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).

- NYE, P.H.** Diffusion of cations and uncharged solutes in soil clays. *Advance in Agronomy*, New York, v.31, p.225-272, 1979.
- NYE, P.H.; TINKER, P.B.** Solute movement in the soil-root system. Berkeley University of California, 1977. 342p.
- O'CONNELL, D. J.** The measurement of apparent specific gravity of soil and its relationship to mechanical composition and plant root growth. In: **CONDON.** Ministry of Agriculture and Fish Food. **Soil physical conditions and crop production.** Condon, 1975. p.298-313. (Technich Bulletin, 29).
- OLSEN, WARTANABE, F.S.** Diffusive supply of phosphorus in relation to soil textural variations. *Soil Science*, Baltimore, v.110, p. 318-327, 1970
- PABIN, J.; LIPIEC, J.; WLODEK, S.; BISKUPSKI, A.; KAUS, A.** Critical soil bulk density and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.46, n.3/4, p.203-208, June 1998.
- PACE, L.; FOLONI, J.S.S.; TIRITAN, C.S.; ROSOLEM, C.A.** Desenvolvimento radicular e acúmulo de nutrientes em adubos verdes de verão submetidos à compactação do solo. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO**, 1998, Brasília. *Anais... Brasília*, 1998. CD-ROM.
- PACHECO, A.A.R.C.; DIAS JUNIOR, M. de S.** Estudo comparativo de métodos de campo e laboratório aplicados à confecção de blocos em adobe. *Ciência e Prática*. Lavras, v.14, n.2, p.176-190, maio/ago. 1990.
- PEDÓ, F.** **Rendimento e distribuição de raízes de seis espécies de plantas em dois níveis de compactação do solo.** Porto Alegre: UFRGS, 1986. (Dissertação de Mestrado).
- PERES, M.; DIAZ, V.** Resistencias del suelo y susceptibilidad a la compactacion en terrenos de monte sometidos a pastoreo. *Anales de Edafologia y Agrobiologia*, Madrid, v.42, p.377-86, 1983.
- PHILLIPS, R.E.; BROWN, D.A.** Counter diffusion of Rb^{86} and Sr^{89} in compacted soils. *Journal of Soil Science*, Oxford, v.17, n.1, p.200-211, Mar. 1968.

- PLACE, G.A. PHIPPLIPS, R.E.; BROWN, P.A. Self-diffusion of phosphorus in clays and soils II. The effect of pH. *Proceedings American Society Horticulture Science*, Madison, v.32, p.657-660, 1968.
- PRIMAVESI, O.; MELLO, F.A.F.; LIBARDI, P.L. Seleção preliminar de parâmetros físicos mais adequados para estudar o efeito da compactação de amostras seca do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). *Anais da ESALQ*, Piracicaba, v.41, p.449-463, 1984.
- PROCTOR, R.R. Fundamental principles of soil compaction. *Engineering News-Record*, New York, v.5, p.286-289, 1933.
- QUEIROZ-VOLTAN, R.B.; NOGUEIRA, S. dos S.S.; MIRANDA, M.A.C. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.35, n.5, p.929-938, maio 2000.
- RAIJ, B. van. *Fertilidade do solo e adubação*. São Paulo: Agronômica Ceres, 1991. 343p.
- RAIJ, B. van; FEITOSA, C.T.; CANTARELLA, H.; CAMARGO, A.P.; DECHEN, A.R.; ALVES, S.; SORDI, G.; VEIGA, A.; CAMPANHA, M.P. PENTINELLI, A.; NERY, C. O emprego da análise do solo para discriminar respostas à adubação para a cultura do milho. *Bragantia*, Campinas, v.40, p.57-76, 1981.
- RANEY, W.A.; EDMINISTER, T.W. Current status for research in soil compactions. *Soil Science Society of America Proceeding*, Madison, v.19, n.4, p.423-428, July/Aug. 1965.
- REICHARDT, K. *Processos de Transferência no Sistema Solo-Planta-Atmosfera*. Piracicaba – SP: Fundação Cargill, 1985. 286p.
- REMER, W.; SCHILLING, G. Effect of the soil water regime on the diffusion coefficient of phosphate ions. *Soviet Soil Science*, Silver Spring, v.13, p.110-114, 1981.
- RIBEIRO, M.A.V. *Resposta da soja e eucalipto a fósforo em solos de diferentes texturas e níveis de densidade e umidade*. Lavras: UFLA, 1999. 71p. (Tese - Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas).

- RIBEIRO, M.A.V.; FABRES, A.S.; NOVAIS, R.F.; COSTA, L.M. Efeito de compactação do solo e níveis de fósforo sobre o crescimento de soja em casa de vegetação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 20., 1985, Belém. Programa e Resumos... Campinas: SBPC, 1985. p.125.
- RIBEIRO, S.A. Efeitos da colheita mecânica na produção de capim elefante (*Pennisetum purpureum*, Schun). Piracicaba: ESALQ/USP, 1987. 64p. (Dissertação – Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas).
- ROSOLEM, C.A.; FERNANDEZ, E.M.; ANDREOTTI, ; CRUSCIOL, C.A.C.; Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.34, n.5, p.821-828, maio 1999.
- ROSOLEM, C.A.; VALE, L.R.; GRASSI FILHO, H.; MORAES, M.H. Sistema radicular do milho em função da calagem e da compactação do solo. Revista Brasileira de Ciência do solo, Campinas, v.18, n.4, p.491-497, set./out. 1994.
- RUSSEL, R.S.; GOSS, M.J. Physical aspects of soil fertility: The response of roots to mechanical impedance. Netherland Journal of Agricultural Science, v.22, p.305-318, 1974.
- SAINI, G.R.; CHOW, T.L. Compactibility indexer of some agricultural soils of New Brunswick Canadá. Soil Science, Baltimore, v.137, n.1, p.33-38, Jan. 1984.
- SALLES, H.C.; ORTOLAN, A.F.; COAN, O. Influência da compactação do solo no desenvolvimento da soja (*Glycine max* (L.) MERRIL). XI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 11., 1981, Brasília. Anais... Brasília, 1981. v.3.
- SANTOS, G.A.; SOUZA, C. A.S.; DIAS JUNIOR, M.S.; FURTINI NETO, A.E.; GUIMARÃES, P.T.G. Disponibilidade de fósforo e produção de matéria seca de plantas de milho (*Zea mays* L.), cultivadas em diferentes graus de compactação e fertilização, em um Latossolo Vermelho Amarelo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 1998, Brasília. Anais... Brasília, 1998. CD-ROM.
- SARRUGE, J.R.; HAAG, H.P. Análises químicas em plantas. Piracicaba: ESALQ, 1974. 56p.

- SAWHNEY, B.L. Charge characteristics of soils as affected by phosphate sorption. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, v.38, n.1, p.159-160, Jan./Feb. 1974.
- SCHENK, M.K.; BARBER, S.A. Roots characteristics of corn genotypes as related to P uptake. *Agronomy Journal*, Madison, v.71, n.6, p.921-924, Nov./Dec. 1979.
- SEIFFERT, S.; KASELOWSKY, J.; JUNGK, A.; CLAASSEN, N. Observed and calculated potassium uptake by maize as affected by soil water content and bulk density. *Agronomy Journal*, Madison, v.87, n.6, p.1070-1077, Nov./Dec. 1995.
- SHIERLAW, J.; ALSTON, A.M. Effect of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. *Plant and Soil*, The Hague, v.77, n.1, p.15-26, 1984.
- SILBERBUSH, M.; HALLMARK, W.B.; BARBER, S.A. Simulation of effects of soil bulk density and P addition on K of Soybean. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v.14, p.287-96, 1983.
- SILVA, A.P. **Influência da compactação nas propriedades físicas do solo e no sistema radicular de plântulas de algodão (*Gossypium hirsutum*, L.).** Piracicaba: ESALQ/USP, 1984. 75p. (Dissertação – Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)
- SILVA, R.B. da. **Efeito da adsorção de fósforo em parâmetros físicos e na compressibilidade de solos da micro-região dos Campos da Mantiqueira, MG.** Lavras: UFLA, 1998. 109p. (Dissertação – Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas)
- SILVA, R.H.; ROSOLEM, C.A. Crescimento radicular de espécies vegetal em função da compactação do solo In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 1998, Brasília. *Anais...* Brasília, 1998. CD-ROM.
- SOANE, B.D. The effects of traffic and implements on soil compaction. *J. Prof. Int. Agric. Eng.*, 25: 115-26, 1970.
- SPOSITO, G. Surface reactions in natural and aqueous colloidal systems. *Chimia*, Zurich, v.43, p.169-176 1989.

- STANCATI, G.; NOGUEIRA, J.B.; & VILAR, O.M. **Ensaio de laboratório de Mecânica dos Solos**. São Carlos: USP. Escola de Engenharia de São Carlos, 1981. 208p.
- STEPNIEWSKI, W.; GLINSKI, J.; BALL, B.C. In: SOANE, B.D.; VAN OUWERKERK, **Soil Compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. cap.8, p.167-189
- THANGAVADIVELU, S. Soil response to track na wheel tractor traffic. **Journal of Terramechanic**, v. 31, n.1 p.41-50, 1994.
- THOMAS, G.W.; HASZLER, G.R.; BLEVINS, R.L. The effects is organic matter and tillage on maximum compactibility of soil using the Proctor test. **Soil Science**, Baltimore, v.161, n.8, p.502-508, Aug. 1996.
- TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D. **Soil fertility and fertilizers**. 4.ed. New York: Macmillan, 1985. 634p.
- TORRES, E.; SARAIVA, O.F.; GALERANI, P.R. **Manejo do solo para cultura da soja**. Londrina: EMBRAPA-CNPSO, 1993. 71p. (EMBRAPA-CNPSO. Circular Técnica, 12).
- VALE, F.R.; GUILHERME, L.R.G.; GUEDES, G.A.A.; FURTINI NETO, A.E. **Dinâmica e disponibilidade dos nutrientes de plantas**. 1997.
- VEPRASKAS, M.J. Plant response mechanisms to soil compaction. In: WILKINSON, R.E. **Plant-environment interactions**. New York: Marcel Dekker, 1994. p.263-287.
- VIEIRA, M.J. Propriedades físicas do solo que afetam a produtividade agrícola. In: INSTITUTO AGROPECUÁRIO DO PARANÁ. **Manual agropecuário para o Paraná**. Londrina, 1978. v.2, p.37-44.
- VILLANI, E.M.Z.; NOVAIS, R.F.; BARRO, N.F.; FONTES, L.E.F.; NEVES, J.C.L. Difusão de fósforo em solos com texturas e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.17, n.3, p.343-347, set./dez. 1993.
- WAGNER, L.E.; AMBE, N.M.; DING, D. Estimating a Proctor density curve from intrinsic soil properties. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineering**, St. Joseph, v.37, p.1121-1125, 1994.

- MARKETIN, B.P. Effects of Compaction on Content and Transmisson of Water in Soils. In: BARNES, K.K. (ed.). **Compaction of agricultural soils.** Michigan: ASAE, 1971. p.126-153.
- WARNCHE, D.D.; BARBER, S.A. Diffusion of zinc in soil: II. The influence of soil bulk density and its interactions with soil moisture. **Journal Soil Science American Procedures**, Madison, v.36, n.1, p.42-6, 1972.
- WATSON JÚNIOR, J.R. ; MUSSER, H.B.; JEFFRIES, C.D. Soil compaction determination with a soil penetrometer as compared with the geiger counter X-ray spectrometer. **Agronomy Journal**, Madison, v.43, n.5, p.55-58, May 1951.
- WEAVER, H.A.; JAMIESON, V.C. Effects os moisture on tractor tire compaction of soil. **Soil Science**, Baltimore, v.71, p.15-23, 1951.
- WELCH, L.F.; MULVANEY, D.L.; BOONE, L.V.; Mc KIBEEN, G.E.; PENDLETON, J.M. Relative efficiency of broadcast versus banded phosphorus for corn. **Agronomy Journal**, Madison, v.58, n.3, p.283-287, May/June 1966.
- WHALLEY, W.R.; BENGOUGH, A.G.; DEXTER, A.R. Water stress induced by PEG decreases the maximum growth pressure of the roots of pea seedlings. **Journal Experimental of Botany**, Oxford, v.49, n.327, p.1689-1694, Oct. 1998.
- ZHANG, H.; HARTGE, K.H.; RINGE, H. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactability. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.40, n.3, p.317-323, 1997.

7 ANEXOS

ANEXO A - Neossolo Quartzarênico (ao nível de 5%):	75
TABELA 1A. Análise de Variância da Variável Matéria Seca Total.....	75
TABELA 2A. Análise de Variância da variável Matéria Seca da Parte Aérea	75
TABELA 3A. Análise de Variância da variável Teor de Fósforo na Parte Aérea	75
TABELA 4A. Análise de Variância da variável Fósforo Acumulado na Parte Aérea...	76
TABELA 5A. Análise de Variância da variável Razão de Penetração de Raiz.....	76
TABELA 6A. Análise de Variância da variável Matéria Seca da Raiz	76
ANEXO B - Latossolo Vermelho Amarelo distrófico:.....	77
TABELA 1B. Análise de Variância da variável Matéria Seca Total.....	77
TABELA 2B. Análise de Variância da variável Matéria Seca da Parte Aérea.....	77
TABELA 3B. Análise de Variância da variável Teor de Fósforo na Parte Aérea	77
TABELA 4B. Análise de Variância da variável Fósforo Acumulado na Parte Aérea ..	78
TABELA 5B. Análise de Variância da variável Razão de Penetração de Raiz.....	78
TABELA 6B. Análise de Variância da variável Razão de Penetração de Raiz.....	78
ANEXO C. Latossolo Vermelho distrófico típico:.....	79
TABELA 1C. Análise de Variância da variável Matéria Seca Total.....	79
TABELA 2C. Análise de Variância da variável Matéria Seca da Parte Aérea.....	79
TABELA 3C. Análise de Variância da variável Teor de Fósforo na Parte Aérea	79
TABELA 4C. Análise de Variância da variável Fósforo Acumulado na Parte Aérea...	80
TABELA 5C. Análise de Variância da variável Razão de Penetração de Raiz.....	80
TABELA 6C. Análise de Variância da variável Matéria Seca da Raiz	80

ANEXO A - Neossolo Quartzarênico (ao nível de 5%):

TABELA 1A. Análise de Variância da Variável Matéria Seca Total

CV	GL	S.Q	QM	VALOR F	PROB.F
GC	3	5,9259	1,975	1,891	0,1498
DP	3	282,742	94,247	90,245	0,00001
GC*DP	9	21,236	2,359	2,259	0,0432
RESIDUO	32	33,418	1,044		
TOTAL	47	343,323			

Média Geral = 4,412708

Coefficiente De Variação = 23,159 %

TABELA 2A. Análise de Variância da variável Matéria Seca da Parte Aérea

CV	GL	S.Q	QM	VALOR F	PROB.F
GC	3	6,3175	2,1058	1,88,3302	0,00051
DP	3	93,6315	31,2105	123,4604	0,00001
GC*DP	9	7,2015	0,8001	3,1653	0,00776
RESIDUO	32	8,0895	0,2527		
TOTAL	47	115,2402			

Média Geral = 2,115833

Coefficiente de Variação = 23,763 %

TABELA 3A. Análise de Variância da variável Teor de Fósforo na Parte Aérea

CV	GL	S.Q	QM	VALOR F	PROB.F
GC	3	0,4534	0,1511	3,8965	0,0174
DP	3	11,3881	0,1511	97,8579	0,00001
GC*DP	9	0,9277	0,1030	2,6573	0,0199
RESIDUO	32	1,2413	0,0387		
TOTAL	47	14,0106			

Média Geral = 1,4506

Coefficiente de Variação = 13,577 %

TABELA 4A. Análise de Variância da variável Fósforo Acumulado na Parte Aérea

CV	GL	S.Q	QM	VALOR F	PROB.F
GC	3	42,6516	14,2172	3,3948	0,0290
DP	3	723,0304	241,0101	57,5487	0,00001
GC*DP	9	74,1304	8,2367	1,9668	0,0770
RESIDUO	32	134,0137	4,1879		
TOTAL	47	973,8262			

Média Geral = 3,8566

Coefficiente de Variação = 53,062 %

TABELA 5A. Análise de Variância da variável Razão de Penetração de Raiz

CV	GL	S.Q	QM	VALOR F	PROB.F
GC	3	15565,0962	5188,3654	232,5962	0,00001
DP	3	8196,1276	2732,0425	122,4784	0,00001
GC*DP	9	1234,6366	137,1818	6,1499	0,00014
RESIDUO	32	713,8023	22,3063		
TOTAL	47	25709,6629			

Média Geral = 36,6508

Coefficiente de Variação = 12,886 %

TABELA 6A. Análise de Variância da variável Matéria Seca da Raiz

CV	GL	S.Q	QM	VALOR F	PROB.F
GC	3	0,6616	0,2205	0,5859	0,6324
DP	3	56,9437	18,9812	50,4259	0,00001
GC*DP	9	6,6187	0,7354	1,9537	0,0790
RESIDUO	32	713,8023	22,30638		
TOTAL	47	25709,6629			

Média Geral = 2,3292

Coefficiente de Variação = 26,341 %

ANEXO B - Latossolo Vermelho Amarelo distrófico:

TABELA 1B. Análise de Variância da variável Matéria Seca Total

CV	GL	S.Q	QM	VALOR F	PROB.F
GC	3	80,5044	26,8348	149,0302	0,00001
DP	3	159,4026	53,1342	295,0870	0,00001
GC*DP	9	63,5865	7,0651	39,2373	0,00001
RESIDUO	32	5,7620	0,1800		
TOTAL	47	309,2555			

Média Geral = 4,7591

Coefficiente de Variação = 8,916 %

TABELA 2B. Análise de Variância da variável Matéria Seca da Parte Aérea

CV	GL	S.Q	QM	VALOR F	PROB.F
GC	3	32,43771	10,8125	64,4589	0,00001
DP	3	77,9565	25,9855	154,9122	0,00001
GC*DP	9	18,7634	2,0848	12,4287	0,00001
RESIDUO	32	5,3677	0,1677		
TOTAL	47	134,5255			

Média Geral = 2,684375

Coefficiente de Variação = 15,257 %

TABELA 3B. Análise de Variância da variável Teor de Fósforo na Parte Aérea

CV	GL	S.Q	QM	VALOR F	PROB.F
GC	3	1,19384	0,3979	23,3860	0,00001
DP	3	13,1190	4,3730	256,9866	0,00001
GC*DP	9	1,8383	0,2042	12,0034	0,00001
RESIDUO	32	0,5445	0,0170		
TOTAL	47	16,6957			

Média Geral = 1,6087

Coefficiente de Variação = 8,109 %

TABELA 4B. Análise de Variância da variável Fósforo Acumulado na Parte Aérea

CV	GL	S.Q	QM	VALOR F	PROB.F
GC	3	184,1727	61,3909	77,3423	0,00001
DP	3	824,2297	274,7432	346,1305	0,00001
GC*DP	9	118,6216	13,1801	16,6048	0,00001
RESIDUO	32	25,4001	0,7937		
TOTAL	47	1152,4243			

Média Geral = 5,1818

Coefficiente de variação = 17,193 %

TABELA 5B. Análise de Variância da variável Razão de Penetração de Raiz

CV	GL	S.Q	QM	VALOR F	PROB.F
GC	3	5990,0907	1996,6969	142,1795	0,00001
DP	3	860,1269	286,7089	20,4158	0,00001
GC*DP	9	1191,8440	132,4271	9,4298	0,00001
RESIDUO	32	449,3917	14,0434		
TOTAL	47	8491,4534			

Média Geral = 15,7727

Coefficiente de Variação = 23,759 %

TABELA 6B. Análise de Variância da variável Razão de Penetração de Raiz

CV	GL	S.Q	QM	VALOR F	PROB.F
GC	3	14,6287	4,8762	44,7369	0,00001
DP	3	21,6603	7,2201	66,2409	0,00001
GC*DP	9	15,2445	1,6938	15,5401	0,00001
RESIDUO	32	3,4879	0,1089		
TOTAL	47	55,0215			

Média Geral = 2,2608

Coefficiente de variação = 14,603 %

ANEXO C. Latossolo Vermelho distrófico típico:

TABELA 1C. Análise de Variância da variável Matéria Seca Total

CV	GL	S.Q	QM	VALOR F	PROB.F
GC	3	58,4018	19,4672	21,5350	0,00001
DP	3	264,9456	88,3152	97,6958	0,00001
GC*DP	9	30,1061	3,3451	3,7004	0,00312
RESIDUO	32	28,9274	0,9039		
TOTAL	47	382,3810			

Média geral = 4,4706

Coefficiente de Variação = 21,267 %

TABELA 2C. Análise de Variância da variável Matéria Seca da Parte Aérea

CV	GL	S.Q	QM	VALOR F	PROB.F
GC	3	19,9661	6,6553	62,3792	0,00001
DP	3	96,0879	32,0293	300,2033	0,00001
GC*DP	9	10,4594	1,1621	10,8927	0,00001
RESIDUO	32	3,4141	0,1066		
TOTAL	47	129,9275			

Média Geral = 2,395208

Coefficiente de variação = 13,637 %

TABELA 3C. Análise de Variância da variável Teor de Fósforo na Parte Aérea

CV	GL	S.Q	QM	VALOR F	PROB.F
GC	3	1,8318	0,6106	14,8616	0,00003
DP	3	19,2008	6,4002	155,7720	0,00001
GC*DP	9	5,0129	0,5569	13,5562	0,00001
RESIDUO	32	1,3147	0,0410		
TOTAL	47	27,3603			

Média Geral = 1,6914

Coefficiente de variação = 11,984 %

TABELA 4C. Análise de Variância da variável Fósforo Acumulado na Parte Aérea

CV	GL	S.Q	QM	VALOR F	PROB.F
GC	3	205,81088	68,6036	40,3154	0,00001
DP	3	1093,9392	364,6464	214,2871	0,00001
GC*DP	9	276,7863	30,7540	18,0728	0,00001
RESIDUO	32	54,4535	1,7016		
TOTAL	47	1630,9900			

Média Geral = 5,2014

Coefficiente de variação = 25,079 %

TABELA 5C. Análise de Variância da variável Razão de Penetração de Raiz

CV	GL	S.Q	QM	VALOR F	PROB.F
GC	3	9083,1549	3027,7183	278,5566	0,00001
DP	3	2490,7634	830,2544	76,3852	0,00001
GC*DP	9	1220,8294	135,6477	12,4799	0,00001
RESIDUO	32	347,8179	10,8693		
TOTAL	47	13142,5656			

Média Geral = 20,6829

Coefficiente de variação = 15,940 %

TABELA 6C. Análise de Variância da variável Matéria Seca da Raiz

CV	GL	S.Q	QM	VALOR F	PROB.F
GC	3	8,8100	2,9366	7,8186	0,00070
DP	3	43,0199	14,3399	38,1782	0,00001
GC*DP	9	5,5567	0,6174	1,6438	0,14459
RESIDUO	32	12,0193	0,3756		
TOTAL	47	69,4061			

Média Geral = 2,0539

Coefficiente de variação = 29,838 %