

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

**AVALIAÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E DA
PRODUTIVIDADE DO MILHO SAFRINHA EM DOIS
ESPAÇAMENTOS DE PLANTIO**

FLÁVIA ARAUJO MATOS

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2008

AVALIAÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E DA PRODUTIVIDADE DO MILHO SAFRINHA EM DOIS ESPAÇAMENTOS DE PLANTIO

FLÁVIA ARAUJO MATOS
Engenheira Agrônoma

Orientador: Dr. Antônio Carlos Tadeu Vitorino

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre

Dourados
Mato Grosso do Sul
2008

633.15 Matos, Flávia Araújo.
M433a Avaliação de atributos físicos do solo e da produtividade do milho safrinha em dois espaçamentos de plantio. / Flávia Araújo Matos. – Dourados, MS : UFGD, 2008.
30p.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Tadeu Vitorino
Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal da Grande Dourados.

1. Milho safrinha – Cultivo. 2. Física do solo. 3. Dinâmica da água no solo. 4. Plantio - Espaçamento. I. Título.

AVALIAÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO E DA PRODUTIVIDADE DO MILHO SAFRINHA EM DOIS ESPAÇAMENTOS DE PLANTIO

por

Flávia Araújo Matos

Dissertação apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de MESTRE EM
AGRONOMIA

Aprovada em: 29 de julho de 2008.

Prof. Dr. Antônio Carlos Tadeu Vitorino
UFGD – FCA
(Orientador)

Prof. Dr. Cristiano M. Alves de Souza
UFGD – FCA
(Coorientador)

Prof. Dr. José Oscar Novelino
UFGD – FCA
(membro da banca)

Prof. Dr. Geraldo César de Oliveira
UFLA
(membro da banca)

DEDICATÓRIA

A Deus, meu alicerce,

DEDICO.

“Debaixo do céu há momento para tudo e tempo certo para cada coisa”.

Eclesiastes, 3;1.

À minha mãe Ademilde, pelas suas orações e pelo seu amor incondicional,
Ao meu pai Dílson Carlos, pelo apoio e conselhos em todos os momentos,
Aos meus irmãos Karlla e Marcelo,
À minha sobrinha Letícia,
À minha avó Elizena
Aos meus amigos de coração
Ao Marcelo Saccol.

OFEREÇO.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Antonio Carlos Tadeu Vitorino, pela sua orientação e paciência.

Ao meu co-orientador Cristiano Márcio Alves de Souza pelas contribuições e sugestões.

À coordenação do Programa de Pós-Graduação em Agronomia da UFGD, pela oportunidade.

À banca examinadora de Qualificação pelas sugestões.

Aos proprietários e hoje amigos, da Fazenda Ângela Pia, pela imensa ajuda e total disponibilidade da área experimental.

Aos Funcionários da UFGD Jesus, Nilda e Juscelino e a secretária do PPGA Maria Lúcia Teles.

A minha amiga Danieli Rondina Gomes, pela sua amizade.

Ao meu amigo Edir, grande companheiro.

Por fim, a todas as pessoas que direta ou indiretamente tenham contribuído para que esse Mestrado se concretizasse.

SUMÁRIO

RESUMO	1
ABSTRACT	2
INTRODUÇÃO	3
REVISÃO DE LITERATURA	5
MATERIAL E MÉTODOS	9
RESULTADO E DISCUSSÃO	13
CONCLUSÃO	23
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24

RESUMO

O milho safrinha é cultivado na segunda safra, de janeiro a abril, quase sempre depois da colheita da soja. No que se relaciona à tecnologia de produção de milho, a redução do espaçamento tradicionalmente usado no cultivo do milho de 0,80 a 0,90 m para 0,45 a 0,50 m tem sido avaliada nos últimos anos, sendo atualmente utilizada na safrinha por grande parte dos agricultores da região da Grande Dourados. O manejo do solo tem por objetivo criar condições favoráveis ao desenvolvimento das culturas, mas nem sempre é isso que eles proporcionam, muitas vezes, problemas relacionados com compactação do solo têm sido ocasionados por práticas de manejo empregadas de forma inadequada, podendo, a compactação do solo, afetar a absorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água, trocas gasosas e o desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea, resultando em diminuição da produtividade das culturas. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de dois espaçamentos de plantio na produtividade de milho safrinha sobre a resistência do solo à penetração e a densidade do solo, avaliados a diferentes profundidades e umidades de um Latossolo Vermelho Distroférrico. O estudo foi realizado no município de Rio Brillhante-MS, onde dentro de uma área experimental foram instaladas os tratamentos que consistiram em dois espaçamentos (parcelas) sendo cada parcela de um hectare cultivado para cada espaçamento (45 e 90 cm) entre linhas, dentro de cada parcela foram alocadas, aleatoriamente, 5 subparcelas medindo cada uma 20x20 m. Em cada subparcela foram determinados cinco pontos amostrais, sendo que em cada ponto foram retiradas amostras em 4 profundidades (sub-subparcela). Para as análises dos atributos físicos do solo, o delineamento experimental foi em parcelas sub-subdivididas com cinco repetições, tendo como parcelas os dois espaçamentos entrelinhas de plantio (45 e 90 cm), e as subparcelas constituídas pelas umidades das amostras, sendo estas referentes às tensões de (-0,006; -0,1; -0,3; -0,5 e -1,5 MPa) e as sub-subparcelas pelas profundidades de coleta (0 a 5; 5 a 10; 10 a 15 e 15 a 20 cm), totalizando 200 amostras. Os valores de resistência mecânica do solo à penetração e de densidade do solo, bem como os índices dos componentes do rendimento foram submetidos à análise de variância e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Foram testados modelos matemáticos no sentido de se encontrar aquele que melhor se ajustasse aos dados experimentais, relacionando a resistência do solo à penetração com a densidade do solo e a umidade do solo. O manejo do espaçamento de plantio do milho safrinha, proporcionou condições físicas do solo mais favoráveis ao desenvolvimento das plantas, tendo sido observada redução dos valores de resistência do solo à penetração e de densidade do solo obtidos no menor espaçamento, é possível inferir que essa prática tende a aliviar as condições de compactação do solo que, em última instância, reflete em aumento da porosidade, redução da densidade e elevação da qualidade estrutural do solo. A produtividade do milho safrinha foi maior no espaçamento de 45 cm (3438,16 kg ha⁻¹) quando comparado ao espaçamento de 90 cm (2437,53 kg ha⁻¹), evidenciando que se pode utilizar a redução do espaçamento para aperfeiçoar o sistema produtivo. Os modelos Quadráticos e Bussecher-Modificado são os que melhor representam a resistência do solo à penetração em função da densidade e da umidade do solo.

Palavras-chave: Física do solo, Dinâmica da água no solo e Espaçamento de plantio.

ABSTRACT

Maize safrinha is grown in second Safra, January to April, after the harvest soya. In relating production technology of maize, the reduction of spacing traditionally used in the cultivation of maize 0, 0, 80 to 90 m to 0, 0, 45 to 50 m has been evaluated in recent years, currently used in safrinha by a large part of the farmers of the region of great Dourados. The soil aims to create favourable conditions for the development of cultures, but is not always what they provide, often, problems with soil compaction have been caused by management employed improperly, and soil compaction, affect the absorption of nutrients, infiltration and redistribution of water, exchanges and the development of the system radicular and air, resulting in reduction in productivity of crops. The purpose of this work was to assess the effect of two spacing planting productivity maize safrinha on the resistance to penetration of soil and density of soil, valued at different depths and humidity of a tropical oxisol Red distroférico. The study was carried out in the municipality of caiuás - Ms, where within an area were installed experimental treatments that consisted of two spacing (parcel each instalment of a hectare grown for each spacing (45 and 90 cm) between rows, within each parcel were allocated at random, 5 subparcelas measuring each 20x20 m. In each subparcela were determined five points and sample size, and at each point were withdrawn samples 4 depths (sub - subparcela). For the analysis of physical attributes of soil, the trial design was in instalments sub - subdivided with five repetition, taking the two parts spacing hidden planting (45 and 90 cm), and subparcelas consist of humidity of samples, and these concerning voltages (- 0,006; - 0, 1 - 0, 3 - 0, and 5 - 1, 5 MPA) and the sub - subparcelas by depths collection (0 to 5; 5 to 10; 10 to 15 and 15 to 20 cm), 200 samples. The values of mechanical strength soil to penetration and density of soil, as well as the indexes of the components of income were referred to the analysis of variance and medium - sized compared test tukey 5% probability. Mathematical models have been tested to find the one that best tune to experimental data, relating to soil resistance to penetration with the density of soil moisture and soil. The management of spacing planting maize safrinha, provided the physical conditions of the soil more development - friendly plant has been observed the soil's resistance to penetration and density of soil obtained in the shortest spacing, you can infer that this practice tends to alleviate the conditions of soil compaction that, ultimately, reflects increased porosity, reduction of density and elevation of quality structural soil. The productivity of maize safrinha was higher in spacing 45 cm (3438, 16 kg HA - 1) when compared to the spacing 90 cm (2437, 53 kg HA - Commission(1), Solutio can be used to reduce the spacing to improve the production system. The Quadratic models and Bussecher-Modified are better represent the resistance of soil to penetration into account the density and soil moisture.

INTRODUÇÃO

O milho é cultivado em todo território nacional, destacando-se das demais culturas por ocupar uma grande área de plantio. É o produto agrícola de segundo maior volume e valor, superado apenas pela soja. No tocante a sua utilização, é o principal insumo utilizado nas indústrias de rações destinadas a alimentação animal, representando 80% de sua produção total. Por outro lado, seu emprego na alimentação humana é de reduzida expressão, respondendo por 13% de sua produção (SOUZA e BRAGA, 2004).

Ao longo dos anos, o milho safrinha tornou-se uma alternativa econômica para os produtores rurais, sendo consolidada no início da década de 80 no Oeste do Paraná (TSUNECHIRO e GODOY, 2001). Com o sucesso crescente do sistema de plantio direto no final da década de 90, o milho safrinha passa a ter um papel fundamental no agronegócio e a contribuir com 12% da produção nacional de milho (FAEDO, 1999). O milho safrinha é cultivado na segunda safra, de janeiro a abril, quase sempre depois da colheita da soja, na região Centro-Sul brasileira. Atualmente, dos 14 milhões de hectares de milho no Brasil, 4,14 milhões são cultivados na safrinha, correspondendo a cerca de $\frac{1}{4}$ da produção total de milho (CONAB, 2007).

A cultura do milho vem passando por várias mudanças tecnológicas, resultando em aumentos significativos da produtividade, tais como adoção de sementes melhoradas, alterações no espaçamento e densidade de semeadura, além da conscientização dos produtores sobre a necessidade de melhoria do manejo dos solos, visando uma produção sustentada (YAMADA e ABDALLA, 2006).

O arranjo de plantas pode interferir sobre o crescimento e desenvolvimento do milho mediante variações na densidade populacional, no espaçamento entre linhas e na distribuição espacial e temporal de indivíduos na linha (ARGENTA et al., 2001). No que se relaciona à tecnologia de produção de milho, a redução do espaçamento tradicionalmente usado no cultivo do milho de 0,80 a 0,90 m para 0,45 a 0,50 m tem sido avaliada nos últimos anos, sendo atualmente utilizada para plantio na safra verão e principalmente na safrinha por grande parte dos agricultores da região da Grande Dourados.

Em relatos feitos por Molin (2000) observa-se que com a redução do espaçamento entre linhas de semeadura, foi possível otimizar a eficiência da

interceptação de luz pelo aumento do índice foliar mesmo nos estádios fenológicos iniciais, melhorando o aproveitamento pela planta na utilização de água e nutrientes, reduzindo a competição inter e intra-específica por esses fatores, aumentando a matéria seca e a produção de grãos.

Se por um lado as alterações nos espaçamentos entre linhas podem afetar a produtividade das plantas, em função da eficiência de uso da radiação interceptada, por outro, diferentes arranjos de plantas devem modificar a distribuição das raízes no perfil do solo, fato relacionado com a capacidade das plantas em explorar o solo na busca de água e nutrientes, processos que são diretamente dependentes das condições físicas, que são passíveis de alterações em função do manejo aplicado.

Embora os manejos de solo tenham por objetivo criar condições favoráveis ao desenvolvimento das culturas, nem sempre é isso que eles proporcionam. Muitas vezes, problemas relacionados com compactação do solo têm sido ocasionados por práticas de manejo empregadas de forma inadequada, podendo, a compactação do solo afetar a absorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água, trocas gasosas e o desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea, resultando em diminuição da produtividade das culturas.

Assim sendo, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de dois espaçamentos de plantio na produtividade de milho safrinha e sobre a resistência à penetração e a densidade do solo, avaliados em diferentes profundidades e potenciais de água em um Latossolo Vermelho Distroférico.

REVISÃO DE LITERATURA

O milho é uma cultura com alto potencial de rendimento, no entanto, o milho safrinha, cultivado no período de fevereiro/março a julho/agosto, em condições climáticas desfavoráveis, relacionadas à deficiência hídrica e à ocorrência de períodos de baixas temperaturas, com risco de formação de geadas, apresenta maiores limitações ao potencial produtivo, sendo que a produtividade média no estado do Mato Grosso do Sul está em torno de 3.300 kg ha⁻¹ (RANNO e BROCH, 2007).

No Estado de Mato Grosso do Sul, o milho safrinha já corresponde a mais de 80% da área total cultivada (safrinha + verão) com esse cereal. No entanto, o milho safrinha não apresenta ampla dispersão geográfica no estado, concentrando-se em regiões onde o clima e o solo são propícios ao seu melhor desempenho. A produção nacional de grãos na safra 2006/07 foi de 131,15 milhões de toneladas de grãos, sendo 44,5% proveniente da soja que contribuiu com 58,42 milhões de toneladas e, 38,6% relacionadas à produção de milho com 50,65 milhões de toneladas, sendo que deste valor, 14,26 milhões de toneladas são oriundas do milho safrinha (CONAB, 2007). Em diagnóstico realizado por Ceccon (2007), em 64 lavouras de milho safrinha em Mato Grosso do Sul, verificou-se que 10,9% das lavouras estavam com espaçamento entre 45 e 50 cm, 7,8% das lavouras estavam com espaçamento entre 70 e 75 cm, 37,5% das lavouras estavam com espaçamento de 80 cm e 43,8% das lavouras estavam com espaçamento de 90 cm.

O espaçamento de 45 cm é utilizado por agricultores que possuem plataforma de corte específica da colhedora. A justificativa de redução do espaçamento é atribuída ao maior aproveitamento do adubo, em alguns casos, para os produtores que cultivam com maior investimento, para a obtenção de maior produtividade e também, pelo maior controle de plantas daninhas (CECCON e XIMENES, 2007).

A densidade e o arranjo de plantas têm grande importância na interceptação da radiação fotossinteticamente ativa, isto é mais significativo no milho do que em outras gramíneas, em função de características morfológicas, anatômicas e fisiológicas da planta (SANGOI, 2001).

A semeadura direta surgiu no Brasil na década de 1970 e vem sendo apontada como uma opção para assegurar a sustentabilidade do meio agrícola (Silva et

al., 2000). Entretanto, o não-revolvimento do solo neste sistema provoca a compactação e a diminuição do volume de macroporos na camada superficial (Bertol et al., 2001). Apesar disso, alguns trabalhos destacam um balanço positivo entre porosidade de aeração e armazenamento de água no solo sob este sistema de manejo (Stone & Silveira, 1999). Há ainda, principalmente na região do Cerrado, uma carência de informações com base em experimentos de longa duração que monitorem o efeito das alterações nas propriedades físicas-hídricas do solo ao longo do tempo (Costa, 1998).

O preparo do solo talvez seja a atividade que mais influi no comportamento físico, pois atua diretamente na estrutura do solo. Além das modificações na porosidade e na densidade, o manejo provoca alterações na estrutura do solo que afetam a retenção de água e a resistência mecânica, entre outros efeitos (Silva et al., 1994).

Do ponto de vista físico-químico coloidal, o solo é um sistema trifásico disperso. Com base no volume, agronomicamente é considerado ideal quando apresentar $0,5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de porosidade total, responsável pela aeração e fornecimento de água às plantas, e $0,5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de volumes de sólidos (BAVER et al., 1973; KIEHL, 1979).

Quatro fatores físicos do solo necessitam ser considerados, prioritariamente, quando se avalia a resposta das culturas a determinado tipo de preparo do solo, a saber: o teor de água, aeração e impedimento mecânico. A compactação do solo pode influenciar todos esses fatores, afetando a planta durante alguma fase do seu ciclo de desenvolvimento (GAMERO, 1984).

A compactação pode ser definida como sendo a ação mecânica por meio da qual se impõe, ao solo, uma redução em seu índice de vazios, que é a relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos (CAMARGO, 1983).

A compactação do solo é considerada por Freitas (1994) a maior limitação à alta produtividade das culturas em todo o mundo, pois afeta diretamente o crescimento das raízes, diminui a capacidade de infiltração de água no solo, reduz a translocação de nutrientes, resultando em uma pequena camada para ser explorada pelas raízes. Destaca ainda que, por depender de vários fatores, principalmente a umidade do solo no período de crescimento das raízes, o efeito da compactação na produção das culturas é difícil de ser quantificado.

A compactação é uma alteração estrutural que promove reorganização das partículas e de seus agregados (STONE et al., 2002), podendo limitar a adsorção, absorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água, trocas gasosas e o

desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea (GHOHMANN e QUEIROZ NETO, 1996), resultando em decréscimo da produtividade das culturas e aumento da energia necessária para o preparo do solo (SOANE e OUWERKERK, 1994). Um dos atributos físicos mais adotados como indicativo da compactação do solo tem sido a resistência do solo à penetração (STONE et al., 2002), por apresentar relações diretas com o crescimento das plantas (HOAD et al., 2001) e por ser mais eficiente na identificação de estudos de compactação comparada à densidade do solo (STRECK et al., 2004).

Segundo Bowen & Kratky (1985), as propriedades mais usadas para avaliar a compactação são a densidade do solo e a resistência mecânica à penetração, demonstrando, esta última, boa correlação com o crescimento radicular, dado que a elongação das raízes varia de forma inversamente proporcional a tal resistência. Conseqüentemente, com a redução do teor de água do solo ocorre um aumento do seu valor, decorrente da maior coesão entre as partículas sólidas do solo (GERARD et al., 1972).

As condições físicas ótimas do solo à expansão do sistema radicular das plantas resultam de uma complexa interação entre a resistência do solo à penetração e a sua capacidade de suprimento de água às raízes (LAPEN et al., 2004). A resistência mecânica à penetração é uma das propriedades que mais variam com as alterações na densidade do solo (KLEIN e LIBARDI, 2000).

A resistência mecânica do solo à penetração tem sido usada, ao longo dos anos, com várias aplicações em diversos campos da pesquisa agrônômica (VIEIRA e SIERRA, 1993). Atualmente várias aplicações estão consolidadas, tais como: detecção de camadas compactadas, estudo da ação de ferramentas de máquinas no solo, prevenção de impedimento mecânico ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas, predição da força de tração necessária para execução de trabalhos, conhecimento e ressecamento, dentre outras.

A resistência mecânica à penetração, fisicamente estabelecida pela pressão, é a razão entre a força necessária para a penetração de uma haste metálica do penetrômetro, provida de um cone na sua extremidade, cuja área basal é conhecida e constante. Na avaliação da resistência mecânica à penetração, comparações entre sistemas de preparo do solo ficam dificultadas devido à variabilidade da umidade, a qual deve ser tomada concomitantemente à da resistência, sendo esta tida como variável de controle. Este procedimento permite que os valores da resistência, que normalmente

apresentam elevada variabilidade, possam ser comparados entre distintos sistemas de preparo. Por outro lado, para um determinado tipo de solo, a resistência mecânica à penetração depende intimamente da sua densidade, do grau de umidade, do teor de matéria orgânica e da estrutura, assim como, varia na razão inversa e direta respectivamente com a umidade e densidade (BENGOUGH et al., 2001). A resistência mecânica à penetração é uma propriedade que varia com as alterações na densidade do solo (KLEIN e LIBARDI, 2000).

Além da determinação das leituras de resistência à penetração, segundo Campbell e O'Sullivan (1991), é recomendável relacionar informações complementares concernentes ao tipo de solo, teor de água e densidade do solo, pois podem ser indicativos da confiabilidade dos resultados.

Na determinação da resistência do solo à penetração são utilizados diversos penetrômetros, o que tem dificultado a interpretação dos resultados. Assim, Herrick e Jones (2002) recomendam a utilização de penetrômetro estático com velocidade constante de penetração, tanto por sua maior precisão quanto para padronizar as determinações.

Em solos compactados ocorrem alterações da estrutura, refletindo em aumento na densidade do solo (GROHMANN e QUEIROZ NETO, 1996), na macroporosidade e no tamanho e continuidade dos poros (MORAES, 1984; DEXTER, 1998). O ambiente físico do solo ao redor das raízes é controlado pela aeração, temperatura, umidade e resistência mecânica, sendo todas essas propriedades físicas do solo, modificadas em grau variável, pela compactação do solo (BOONE e VEEN, 1994; SECCO et al., 2004).

A resistência à penetração do solo, na zona da raiz é frequentemente usada como medida de compactação do solo. Como outros atributos físicos do solo, a resistência à penetração possui elevada variabilidade espacial em profundidade. Zonas de passagem do rodado de máquinas e entre rodado possuem resistência diferentes que dependem de textura do solo, tipo e peso da máquina e implemento, conteúdo de umidade no solo, tempo de cultivo, número e velocidade de passagens de implementos (LARNEY e KLADVIKO, 1989).

A densidade do solo pode fornecer informações importantes sobre a compactação do solo, o que influenciará diretamente propriedades como infiltração e retenção de água no solo e desenvolvimento de raízes.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado na Fazenda Ângela Pia no município de Rio Brillhante, MS, em um Latossolo Vermelho Distroférrico com 610, 100 e 290 g kg⁻¹ das frações argila, silte e areia, respectivamente, classificado como de classe textural muito argilosa. A área de estudo tem sido utilizada em sistema de plantio direto com sucessão de soja no verão e milho safrinha no outono/inverno. As análises laboratoriais foram realizadas no laboratório de Física do Solo da Faculdade de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados.

A semeadura do milho safrinha, foi procedida em 10/03/07, com o auxílio de uma semeadora SEMEATO PS 90/10 com espaçamentos entrelinhas de 45 e 90 cm, população de 66 mil plantas por hectare e adubação de 200 kg ha⁻¹ da fórmula 8 20 20. A cultivar semeada foi Agromem 3150 e a instalação foi realizada segundo instruções agrícolas para a cultura do milho no Estado de Mato Grosso do Sul (FUNDAÇÃO MS, 2007).

Dentro de uma área experimental foram instaladas os tratamentos que consistiram em dois espaçamentos (parcelas), sendo cada parcela de um hectare cultivado para cada espaçamento (45 e 90 cm) entre linhas, em cada parcela foram alocadas, aleatoriamente, 5 subparcelas medindo cada uma 20x20 m. Em cada subparcela foram determinados cinco pontos amostrais, sendo que em cada ponto foram retiradas amostras em 4 profundidades (sub-subparcela).

Para as análises dos atributos físicos do solo, o delineamento experimental foi em parcelas sub-subdivididas com cinco repetições, tendo como parcelas os dois espaçamentos entrelinhas de plantio (45 e 90 cm), e as subparcelas constituídas pelos potenciais de água no solo, sendo estas referentes às tensões de (-0,066; -0,1; -0,3; -0,5 e -1,5 MPa) e as sub-subparcelas pelas profundidades de coleta (0 a 5; 5 a 10; 10 a 15 e 15 a 20 cm), totalizando 200 amostras, sendo 100 delas em cada espaçamento.

A amostragem do solo realizada no centro da entrelinha da cultura do milho safrinha nos meses de setembro e outubro de 2007, foi realizada após a colheita da cultura. As amostras do solo para determinação da densidade, da umidade e da resistência mecânica à penetração, foram retiradas utilizando anéis volumétricos de 100 cm³ centralizados no meio de cada profundidade, e submetidas a diferentes potenciais

(-0,006; -0,1; -0,3; -0,5 e -1,5 MPa) na câmara de pressão de Richards, utilizando-se pressões aplicadas em câmaras com placas porosas, conforme Klute (1986).

Os potenciais extremos de -0,006 e -1,5 MPa foram escolhidos por serem considerados como de equilíbrio da água na capacidade de campo e ponto de murcha permanente, respectivamente (SANTOS, 1997).

Quando as amostras atingiram o equilíbrio de umidade nos referidos potenciais de água no solo, foi medida a resistência do solo à penetração, utilizando um Penetrôgrafo Eletrônico de Bancada desenvolvido por Serafim (2007), com velocidade constante de penetração de 10 mm min^{-1} com diâmetro de base de 4 mm e semi-ângulo de 30° .

No centro geométrico de cada amostra foi introduzida a haste de penetração. As leituras obtidas nos 5 mm superiores e inferiores da amostra foram descartadas, visando eliminar o efeito da periferia da amostra, conforme proposto por Bradford (1986).

A resistência do solo à penetração (ASAE, 1993) foi determinada do quociente da massa lida na célula de carga e a área transversal do cone da haste do Penetrôgrafo de Bancada (SERAFIM, 2007), conforme Equação 1.

$$RP = 9,8067 \cdot 10^{-5} \text{ m/A} \quad (1)$$

em que,

RP é a resistência do solo à penetração em MPa;

m é a massa obtida da célula de carga do penetrôgrafo em g;

A é a área transversal do cone em cm^2 .

A profundidade da ponta da haste foi determinada em função do tempo e da velocidade de descida da ponta cônica, na amostra durante o ensaio (Equação 2).

$$p = v \cdot t \quad (2)$$

em que,

p é a profundidade da ponta da haste em mm;

t é o tempo de duração do teste em min;

v é a velocidade de descida da haste em mm min^{-1} .

A frequência de leitura de resistência à penetração corresponde à coleta de 50 leituras por segundo, obtendo um total de 2150 dados por amostra, das quais um valor médio foi utilizado.

A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997), onde as amostras de solo, coletadas em anéis de 100 cm^3 , foram secas em estufa a 105°C até peso constante, sendo então pesadas e a razão entre massa do solo seco e o volume do anel representa a densidade do solo, expressa em g cm^{-3} . Para as mesmas amostras de solo, foi determinada a umidade do solo pelo método gravimétrico.

Para a avaliação dos componentes de produção de milho, foram colhidas todas as espigas das plantas de uma área correspondente a dez linhas com cinco metros de cada sub-subparcela e realizadas as seguintes avaliações:

Comprimento e diâmetro de espigas: as determinações foram realizadas utilizando-se régua e paquímetro, com resolução de 1 mm e 0,05 mm, respectivamente, medindo-se três espigas, tomadas ao acaso, entre as espigas colhidas de cada sub-subparcela, por tratamento, em cada repetição.

Massa de 1000 grãos: foi determinado em balança de precisão com duas casas decimais, o peso médio de quatro amostras de 1000 grãos de cada sub-subparcela, por tratamento em cada repetição.

Produtividade de grãos: as espigas foram debulhadas e os grãos pesados em balança de precisão de duas casas decimais, corrigindo-se a umidade para 13% base umida, com os valores expressos em kg ha^{-1} .

Os valores de resistência do solo à penetração e densidade do solo, bem como os índices dos componentes do rendimento foram submetidos à análise de variância e quando houve diferença significativa entre os tratamentos, às médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Foi usado o aplicativo computacional SAEG, na realização das análises estatísticas (RIBEIRO JÚNIOR, 2001).

Foram testados modelos matemáticos no sentido de se encontrar aquele que melhor se ajustasse aos dados experimentais, relacionando a resistência do solo à penetração com a densidade do solo e a umidade do solo (Quadro 1).

Quadro 1. Modelos matemáticos utilizados no ajuste aos dados de resistência do solo à penetração com a densidade do solo e a umidade do solo.

Designação do modelo	Modelo	
Linear	$RP = b_0 + b_1 \cdot Ds + b_2 \cdot UR$	(3)
Quadrático	$RP = b_0 + b_1 \cdot Ds + b_2 \cdot UR + b_3 \cdot UR^2$	(4)
Bussecher	$RP = b_0 + UR^{b_1} + Ds^{b_2}$	(5)
Bussecher Modificado	$RP = b_0 + b_1 \cdot UR + b_2 \cdot UR^2 + Ds^{b_3}$	(6)

RP = resistência à penetração (MPa); Ds = densidade do solo ($g\ cm^{-3}$); UR = umidade relativa (%); b_0 , b_1 , b_2 e b_3 = coeficientes de determinação.

Os modelos foram selecionados com base no R^2 e significância dos coeficientes, utilizando-se o teste t, a 5% de probabilidade.

Os modelos tiveram o erro relativo médio (ϵ) testado entre as curvas de dados, que foi determinado como:

$$\epsilon = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|Y - Y_0|}{Y} \right) \quad (7)$$

em que,

Y é o valor observado experimentalmente;

Y_0 é o valor calculado pelos modelos;

n é o número de observações experimentais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios de resistência do solo à penetração (RP) em função das tensões às quais os solos foram submetidos e da profundidade do solo, para cada espaçamento são apresentados no Quadro 2.

Quando se utilizou o espaçamento de 45 cm, os valores de RP para um mesmo potencial de água a que as amostras de solo foram submetidas, nas diferentes profundidades, apenas no potencial de -1,5 MPa, houve diferença significativa, sendo que o maior valor numérico de RP (3,02 MPa) na profundidade de 15-20 cm não diferiu estatisticamente daquele encontrado na camada de 5-10 cm (2,72 MPa) e diferente dos demais (Quadro 2). Como o solo se encontra com umidade próxima do ponto de murcha permanente, provavelmente não seja o momento mais propício para análise interpretativa da resistência do solo à penetração de raízes, pelo fato do fluxo de água, nesse instante, não mais atender, satisfatoriamente, à demanda evapotranspirativa da maioria das plantas cultivadas (OLIVEIRA et al., 2007).

Quadro 2. Médias da resistência do solo à penetração (MPa), em função dos diferentes potenciais de água no solo e da profundidade do solo, para os respectivos espaçamentos.

Profundidade (cm)	Potencial de água no solo (MPa)				
	-0,006	-0,1	-0,3	-0,5	-1,5
	-----Espaçamento de 45 cm-----				
0-5	1,15 Ac	1,24 Ac	2,11 Ab	2,06 Ab	2,53 Ba
5-10	1,22 Ad	1,24 Ad	1,88 Ac	2,32 Ab	2,72 Aa
10-15	1,26 Ac	1,40 Ac	2,06 Ab	2,34 Aab	2,54 Ba
15-20	1,21 Ac	1,42 Ac	2,13 Ab	2,32 Ab	3,02 Aa
	-----Espaçamento de 90 cm-----				
0-5	1,20 Ac	1,40 Ac	1,81 Cb	2,36 Ba	2,59 Aa
5-10	1,34 Ac	1,66 Ac	2,14 BCb	2,65 ABa	2,75 Aa
10-15	1,27 Ab	1,64 Ab	2,49 Aba	2,61 ABa	2,69 Aa
15-20	1,40 Ab	1,68 Ab	2,59 Aa	2,91 Aa	2,82 Aa

Médias seguidas por letras iguais, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

No espaçamento de 90 cm (Quadro 2), quando se analisa os valores de RP para uma mesma tensão a que as amostras de solo foram submetidas, nas diferentes profundidades, observa-se que houve diferença significativa para a resistência à

penetração entre as profundidades, com valores de RP entre 1,81 MPa (0-5 cm) e 2,59 MPa (15-20 cm) e entre 2,36 (0-5 cm) e 2,91 MPa (15-20 cm), quando o solo foi submetido aos potenciais de água de -0,3 e -0,5 MPa, respectivamente, seguindo uma tendência de aumento dos valores de RP à medida em que aumenta o potencial de água no solo.

Analisando ainda os valores RP obtidos no espaçamento de 45 cm, em cada profundidade para as diferentes tensões, observa-se que de maneira geral houve diferença significativa nos valores de resistência do solo à penetração havendo tendência de aumento com o potencial de água, sendo observados valores mínimos a -0,006 e máximos em -1,5 MPa (Quadro 2) seguindo uma tendência clara de aumento dos valores de RP à medida em que se aumenta o potencial de água no solo.

De forma semelhante ao que ocorreu para o espaçamento discutido anteriormente, os valores de resistência à penetração obtidos sob espaçamento de 90 cm, em cada profundidade para os diferentes potenciais de água, aumentam à medida que o solo se torna mais seco, sendo que não houve diferença significativa para RP nas amostras submetidas aos maiores potenciais (-0,5 e -1,5 MPa). Com a umidade próxima à capacidade de campo a RP, na profundidade de 0-20 cm, teve valores máximos de 1,26 MPa no espaçamento de 45 cm e 1,40 MPa no espaçamento de 90 cm, sendo estes valores não restritivos ao melhor desenvolvimento da maioria das plantas cultivadas (CAMARGO & ALLEONI, 1997).

Pauletto et al. (1989) constataram que somente seriam consideradas camadas compactadas aquelas cujos valores de resistência do solo à penetração fossem superiores a 1,72 MPa, alertando também para o fato de que o limite superior de 2,32 MPa impediria o desenvolvimento radicular das plantas de milho. Neste trabalho, valores semelhantes foram encontrados nos potenciais de -0,3; -0,5 e -1,5 MPa. Tavares Filho et al. (2001) trabalhando com Latossolos Vermelhos, mostraram que valores de resistência, quando superiores a 3,5 MPa, não restringiram o desenvolvimento radicular do milho.

Os valores médios de resistência do solo à penetração (RP) em função do espaçamento, dentro dos diferentes potenciais de água no solo e nas profundidades estudadas são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3. Valores médios da resistência do solo à penetração (MPa), em função do espaçamento, nos diferentes potenciais de água no solo e nas profundidades.

Prof. (cm)	Potencial de água no solo (MPa)									
	-0,006		-0,1		-0,3		-0,5		-1,5	
	-----Espaçamento (cm)-----									
	45	90	45	90	45	90	45	90	45	90
0-5	1,15	1,20	1,24	1,40	2,11	1,81	2,06	2,36	2,53	2,59
	Aa	Aa	Aa	Aa	Aa	Cb	Ab	Ba	Ba	Aa
5-10	1,22	1,34	1,24	1,66	1,88	2,14	2,32	2,65	2,72	2,75
	Aa	Aa	Ab	Aa	Aa	BCa	Ab	ABa	ABa	Aa
10-15	1,26	1,27	1,40	1,64	2,06	2,49	2,34	2,61	2,54	2,69
	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	ABa	Ab	ABa	Ba	Aa
15-20	1,21	1,40	1,42	1,68	2,13	2,59	2,32	2,91	3,02	2,82
	Aa	Aa	Aa	Aa	Ab	Aa	Ab	Aa	Aa	Aa

Médias seguidas por letras iguais maiúsculas nas colunas (em cada espaçamento) e minúscula na linha (dentro do mesmo potencial de água no solo), não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Analisando os resultados de RP apresentados no Quadro 3, observa-se que para os extremos de potenciais de água estudados (-0,006 e -1,5 MPa) não foram encontradas diferenças significativas para a resistência do solo à penetração entre os espaçamentos avaliados. No entanto, para os potenciais intermediários verifica-se que quando houve diferença entre os valores de RP, esses foram geralmente menores no espaçamento de 45 cm. Uma das estratégias para amenizar os efeitos da compactação pode ser o cultivo de espécies com sistema radicular vigoroso, que deixem canais que propiciem condições ao desenvolvimento de raízes da cultura subsequente (WANG et al., 1986). Desta forma, espécies de crescimento inicial rápido e agressivo, que proporciona boa cobertura do solo (NUERNBERG et al., 1986), com raízes capazes de penetrar em camadas com altas resistências à penetração (ALVARENGA et al., 1996), permitiriam melhor desenvolvimento da cultura sucessora. Essa discussão deve ser considerada no presente estudo, no sentido de que o efeito do sistema radicular, no menor espaçamento, promoveu um alívio da estrutura do solo, com conseqüente diminuição nos valores de RP.

Observando o Quadro 3 verifica-se que os valores de RP para o espaçamento de 45 cm somente apresentou diferenças significativas em profundidade quando as amostras de solo foram submetidas ao potencial de água de -1,5 MPa, sendo observada uma tendência de aumento dos valores de RP com a profundidade. No que diz respeito ao espaçamento de 90 cm, as diferenças de RP com mais freqüência ocorreram nos potenciais intermediários (-0,3 e -0,5 MPa) e da mesma forma que no espaçamento de

45 cm a tendência de aumento com a profundidade se repete. Trabalho realizado por Câmara e Klein (2005) também encontraram essa distribuição de valores para a RP em sistema de plantio direto.

A discrepância entre os valores de RP, encontrada para solo úmido e seco, confirma a necessidade de se analisar conjuntamente a umidade do solo no momento da realização do teste de penetrometria (OLIVEIRA et al., 2007)

Analisando os valores da densidade do solo para uma mesma profundidade nos diversos potenciais de água no solo, observa-se que houve diferença significativa entre os potenciais, sendo que os maiores valores de densidade do solo foram encontrados nos maiores potenciais de água no solo. Os valores médios da densidade do solo (Quadro 4), no espaçamento de 45 cm, apresentaram diferença significativa em profundidades, quando as amostras foram submetidas aos potenciais de água no solo de -0,1 e -0,5 MPa, sendo que os valores de densidade do solo foram menores na profundidade de 0-5 cm. Para o espaçamento de 90 cm, não houve diferença significativa nos valores de densidade do solo apenas no potencial de -0,006 MPa sendo que os valores na camada de 0-5 cm foram geralmente menores que os demais camadas. Entretanto, como se observa aumento nos valores de densidade do solo com o aumento do potencial de água aplicado é provável que a pressão de ar utilizada na câmara de Richards exerça efeito na densidade do solo.

Quadro 4. Valores médios da densidade do solo (g cm^{-3}) em função da profundidade e dos potenciais de água no solo, para os respectivos espaçamentos.

Profundidade (cm)	Potencial de água no solo (MPa)				
	-0,066	-0,1	-0,3	-0,5	-1,5
-----Espaçamento de 45 cm-----					
0-5	1,02 Ac	1,07 Bbc	1,14 Aab	1,12 Bb	1,30 Aa
5-10	0,98 Ac	1,10 ABb	1,14 Ab	1,17 Abab	1,23 Aa
10-15	1,02 Ac	1,15 Ab	1,16 Ab	1,20 Abab	1,24 Aa
15-20	1,02 Ac	1,13 Abb	1,12 Ab	1,24 Aa	1,28 Aa
-----Espaçamento de 90 cm-----					
0-5	1,04 Ab	1,09 Bb	1,19 Ba	1,26 Ba	1,26 Ba
5-10	1,06 Ad	1,15 ABC	1,22 Abbc	1,27 Bab	1,31 ABa
10-15	1,04 Ac	1,18 Ab	1,24 Abab	1,30 ABa	1,30 ABa
15-20	1,06 Ac	1,22 Ab	1,27 Aab	1,35 Aa	1,34 Aa

Médias seguidas por letras iguais, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Silva (2007) trabalhando em um Latossolo Vermelho Distroférico sob sistema plantio direto encontrou valores de densidade do solo menores na camada de 0-5 cm, em comparação as demais camadas de 5-10 e 10-20 cm, o que deve estar relacionado com o fato de que o sistema de plantio direto, ao manter elevada quantidade de resíduos na superfície do solo, proporciona diminuição da densidade do solo na camada superficial, além do efeito do sistema radicular. O autor ainda comenta que a densidade do solo é um indicador importante da qualidade física do solo, de fácil e rápida determinação, pode ser usado para comparações entre situações distintas ou entre diferentes camadas. Argenton et al. (2005), trabalhando em Latossolo Vermelho Argiloso, também encontraram aumento da densidade da camada de 0-5 cm para as camadas mais profundas. Por outro lado, é preciso cautela na avaliação da estruturação de um solo sob diferentes manejos, com base apenas na densidade, uma vez que esse atributo do solo pode mostrar uma fraca correlação com o crescimento de plantas (CAMPBELL, 1991).

Com relação aos valores de densidade do solo em função dos espaçamentos, observa-se no Quadro 5 que, embora nem sempre a diferença da densidade do solo entre os dois espaçamentos estudados tenha sido significativa, de maneira geral, os valores foram inferiores no espaçamento de 45 cm. As diferenças da densidade do solo entre os espaçamentos tendem a ocorrer com maior frequência quando as amostras foram submetidas aos potenciais de -0,5 e -1,5 MPa. Condição em que o solo se encontra mais seco é quando possíveis melhorias na agregação do solo se manifestam.

Quadro 5. Médias da densidade do solo (g cm^{-3}) em função do espaçamento, para os diferentes potenciais de água no solo e nas profundidades.

Prof. (cm)	Potencial de água no solo (MPa)									
	-0,006		-0,1		-0,3		-0,5		-1,5	
	-----Espaçamento (cm)-----									
	45	90	45	90	45	90	45	90	45	90
0-5	1,02 Aa	1,04 Aa	1,07 Ba	1,09 Ba	1,14 Aa	1,19 Ba	1,12 Bb	1,26 Ba	1,30 Aa	1,26 Ba
5-10	0,98 Ab	1,06 Aa	1,10 ABa	1,15 ABa	1,14 Aa	1,22 ABa	1,17 ABb	1,27 Ba	1,23 Ab	1,31 ABa
10-15	1,02 Aa	1,04 Aa	1,15 Aa	1,18 Aa	1,16 Ab	1,24 ABa	1,20 ABb	1,30 ABa	1,24 Ab	1,30 ABa
15-20	1,02 Aa	1,06 Aa	1,13 ABb	1,22 Aa	1,12 Ab	1,27 Aa	1,24 Ab	1,35 Aa	1,28 Ab	1,34 Aa

Médias seguidas por letras iguais maiúsculas nas colunas (em cada espaçamento) e minúsculas na linha (dentro do mesmo potencial de água no solo), não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

As variações dos valores da densidade do solo em profundidade e nos espaçamentos, para o potencial de -0,006 MPa não houve diferença para a densidade do solo entre as profundidades. Além disso, verifica-se que para o espaçamento de 45 cm há uma menor variação entre os valores de densidade do solo, uma vez que nos potenciais de -0,006, -0,3 e -1,5 MPa, esses não diferem entre si nas diferentes profundidades. Nos demais potenciais para o espaçamento de 45 cm e onde houve diferença significativa para a densidade do solo no espaçamento de 90 cm houve uma tendência de aumento desses valores com a profundidade.

Na prática, o conhecimento da resistência à penetração, densidade do solo e umidade do solo é de extrema importância, pois permite um correto manejo do solo, visando a uma agricultura sustentável (CUNHA et al., 2002).

Observa-se que não houve diferença significativa para o diâmetro da espiga, nos espaçamentos (Quadro 6). O espaçamento influenciou no tamanho de espiga, onde o menor espaçamento proporcionou o maior comprimento de espiga. Esse resultado corrobora com Dourado Neto et al. (2003) que encontraram aumento do comprimento de espigas pela redução do espaçamento, provavelmente devido aos efeitos da distribuição de plantas e a redução do comprimento da espiga é influenciada pela densidade de plantio.

Quadro 6. Componentes de rendimento do milho safrinha, diâmetro e comprimento de espiga, massa de 1000 grãos e produtividade de grãos para dois espaçamentos de plantio.

Espaçamento (cm)	Diâmetro espiga (cm)	Comprimento espiga (cm)	Massa de 1000 grãos (g)	Produtividade (kg ha ⁻¹)
45	4,1 A	14,0 A	230,16 A	3438,16 A
90	4,3 A	11,2 B	232,76 A	2437,53 B

Médias seguidas por letras diferentes na vertical diferem pelo teste F a 5% de probabilidade.

A massa de 1000 grãos é um importante componente de produção do milho, mas nem sempre cultivares que apresentam grãos mais pesados são mais produtivos, como pode ser observado no Quadro 6, onde não houve diferença significativa entre os espaçamentos.

A produtividade do milho safrinha foi maior no espaçamento de 45 cm (3438,16 kg ha⁻¹) quando comparado ao espaçamento de 90 cm (2437,53 kg ha⁻¹), evidenciando que se pode utilizar a redução do espaçamento para aperfeiçoar o sistema

produtivo. Rendimento semelhante em milho safrinha, com o espaçamento de 45 cm foi de 5127 kg ha⁻¹ e para o espaçamento de 90 cm foi de 4995 kg ha⁻¹, resultados obtidos por Ceccon et al. (2007) em Latossolo Vermelho Distroférico. O uso da redução de espaçamento, além de proporcionar uma readequação da produção, contribuiu para uma melhoria nas condições físico do solo. Esse aumento significativo na produtividade pode estar associado a uma distribuição mais homogênea do sistema radicular, ocupando um maior volume de solo, favorecendo o aproveitamento de água e nutrientes e reduzindo o acamamento. Cada espaçamento apresenta particularidades que permitem interferir no potencial produtivo, sendo que o menor espaçamento apresenta melhor aproveitamento espacial, apesar de que o ganho na produtividade, não deva ser a única vantagem desejada quando se utiliza menores espaçamentos de cultivo.

Segundo Porter et al. (1997), mantendo-se constante a densidade de plantas, a redução do espaçamento entrelinhas tem várias vantagens potenciais. A primeira é a de que aumenta a distância entre as plantas na linha, propiciando um arranjo mais equidistante dos indivíduos na área de cultivo. Esse procedimento reduz a competição entre plantas por água, luz e nutrientes.

O fechamento mais rápido dos espaços disponíveis pela cultura, advindo da presença de linhas mais próximas, reduz a transmissão da radiação através da comunidade. O rápido sombreamento da superfície do solo obtido com espaçamentos menores reduz a quantidade de água perdida por evaporação no início do ciclo do milho, o que, em associação à melhor exploração do solo pelo sistema radicular decorrente da distribuição mais equidistante das plantas, aumenta a eficiência de absorção e uso da água (SANGOI et al., 2004).

Em alguns trabalhos realizados no Cerrado brasileiro, os benefícios reportados pela redução do espaçamento entrelinhas são percentualmente maiores do que no Sul do país (FUNDAÇÃO RIO VERDE, 2002). Na safrinha existem maiores restrições hídricas e edáficas ao desenvolvimento do milho na região, devido à redução na precipitação pluvial registrada a partir de abril e ao menor investimento em fertilizantes. Nessa época de semeadura, a redução do espaçamento entrelinhas pode propiciar aumentos na produtividade principalmente devido à distribuição mais homogênea do sistema radicular, ocupando maior volume de solo, favorecendo o aproveitamento de água e nutrientes e reduzindo o acamamento (FUNDAÇÃO MS, 2007).

Assim, antes da decisão de se reduzir o espaçamento o produtor deve fazer uma análise econômica dos investimentos, levando em consideração a aquisição ou adaptação da plataforma de colheita, tendo em vista o seu custo, tamanho da área, número de linhas e preço estimado da saca de milho para a região. Inclui na tomada de decisão outro custo, um maior consumo de combustível, por estar trabalhando com a máquina mais pesada. Por outro lado, as condições de riscos e incertezas na agricultura são elevadas, devido a isso é necessário tomar decisões baseadas em informações técnicas e também econômicas. O levantamento dos custos de produção auxilia na tomada de decisão, permitindo visualizar os gargalos de determinada atividade.

Tendo sido observada redução dos valores de resistência do solo à penetração (Quadros 2) e de densidade do solo obtidos no menor espaçamento (Quadro 4), é possível inferir que essa prática tende a aliviar as condições de compactação do solo que, em última instância, reflete em aumento da porosidade, redução da densidade e elevação da qualidade estrutural do solo. Em função disso, o menor espaçamento utilizado facilita o desenvolvimento radicular das plantas, que pode resultar em aumento da taxa de infiltração e a capacidade de armazenamento de água do solo, e otimização do volume de solo a ser explorado pelo sistema radicular da cultura.

Os parâmetros para os atributos físicos empregados no ajuste dos modelos de resistência do solo à penetração em função da densidade do solo e da umidade do solo, são apresentados no Quadro 7. O alto coeficiente de variação da umidade do solo pode estar relacionado à variabilidade natural da umidade das amostras, estudadas em diferentes potências de água no solo e profundidades.

Quadro 7. Estimativa dos parâmetros da resistência do solo à penetração (MPa), densidade do solo (g cm^{-3}) e umidade do solo (%).

Parâmetros	Média	Desvio-padrão	CV (%)	Mínimo	Máximo
RP	2,01	0,63	11	1,11	3,37
Ds	1,18	0,11	4	0,94	1,42
UG	17,95	4,70	26	9,09	26,20

RP = resistência à penetração; Ds = densidade do solo e UG = umidade gravimétrica.

A pequena variação dos dados da densidade do solo e da resistência do solo à penetração, em relação à média, expresso pelo coeficiente de variação (CV) de 4% e de 11% respectivamente, indica uma distribuição de dados homogênea em torno da

média, corroborando com valores obtidos por Corrêa (2007). Os parâmetros da estatística descritiva para a resistência do solo à penetração, evidenciam que a média geral de 2,01 MPa é numericamente igual ao valor limite para o crescimento radicular, sugerido por Secco (2003).

Analisando os resultados apresentados no Quadro 8, observa-se que os modelos matemáticos utilizados para descrever a variação da resistência do solo à penetração relacionada com a densidade do solo e a umidade das amostras, apresentaram valores do coeficiente de determinação superior a 75%.

Quadro 8. Parâmetros dos modelos ajustados para calcular a resistência do solo à penetração em função da densidade do solo e da umidade, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e erro relativo médio (e).

Modelo	b_0	b_1	b_2	b_3	R^2	Sig.	Erro Relativo Médio (%)
Linear	2,23560	1,27898	-0,096631		84,6	0,00001	10,6
Quadrático	2,86647	1,32821	-0,181121	0,00240477	85,2	0,00001	9,9
Bussecher	-0,086508	-0,357363	3,159825		75,1	0,001	13,6
Bussecher-Modificado	3,18526	-0,178826	0,00233	1,25679	85,2	0,00001	9,9

Coefficientes significativos pelo teste t a 1 e 5 % de probabilidade.

De acordo com o critério para seleção de modelos proposto por Mohapatra e Rao (2005), o modelo Linear e o de Bussecher não se ajustaram satisfatoriamente aos dados experimentais (erro relativo médio superior a 10%), indicando serem inadequados para a descrição do fenômeno estudado. Verifica-se ainda que, dentre a série testada, os modelos Quadrático e Bussecher-Modificado apresentaram erro relativo médio menor que 10%, indicando ajustes mais adequados aos dados experimentais (Quadro 8).

Levando-se em consideração o coeficiente de determinação (85,2), os modelos Quadrático e Bussecher-Modificado, permitem melhor agregação de todos os atributos e o cálculo de sua influência sobre as características físicas do solo e a comparação entre os diferentes manejos, com boa representatividade. Entre os dois, pode-se sugerir o uso do modelo Quadrático, por ser de mais fácil aplicação.

A modelagem matemática representa uma promissora metodologia de análise de dados, possibilitando uma adequada visualização, quantificação e

interpretação de diferentes estratégias adaptativas da planta, conforme refletidas pelos diferentes valores obtidos nos dois espaçamentos de plantio. À medida em que o modelo permite a identificação de pontos cujo conhecimento e entendimento ainda é falho, ele pode ser utilizado na definição de prioridades de pesquisa e para ressaltar a necessidade de trabalho multidisciplinar em certas áreas. Todos os modelos matemáticos são mais úteis pelo discernimento que eles nos proporcionam do que por sua habilidade de prever fenômenos naturais (WULLSCHLEGER et al., 1994).

CONCLUSÃO

O manejo do espaçamento de plantio do milho safrinha, proporcionou condições físicas do solo mais favoráveis ao desenvolvimento das plantas.

Houve maior influência positiva do espaçamento de 45 cm na resistência do solo à penetração e na densidade do solo, refletindo em maior comprimento de espigas e maior produtividade de grãos.

Os modelos Quadráticos e Bussecher-Modificado são os que melhor representam a resistência do solo à penetração em função da densidade e da umidade do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASAE – American Society of Agricultural Engineers. **Soil Cone Penetrometer Standards**, 40th ed. ASAE, St. Joseph, MI. p.820-821, 1993.

ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F.; FLECK, N.G.; BORTOLINI, C.G.; NEVES, R.; AGOSTINETTO, D. Efeitos do manejo mecânico e químico da aveia-preta no milho em sucessão e no controle do capim-papuã. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.851-860, 2001.

ALVARENGA, R.C.; COSTA, L.M.; MOURA FILHO, W.; REGAZZI, A. J. Crescimento de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, p. 319-326, 1996.

ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; WILDNER, L.P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **R. Bras. Ci. Solo**, 29: 425-435, 2005.

BAVER, L.D.; GARDNER, W.H. e GARDNER, W.R. **Física de suelos**. Barcelona, Union Tipográfica Editorial Hispano-Americana, 1973. 529p.

BENGOUGH, A.G.; CAMPBELL, D.J. e O'SULLIVAN, M.F. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. In: SMITH, K.A. & MULLINS, C.E, eds. **Soil environmental analysis: physical methods**. 2.ed. Marcel Decher, 2001. p.377-403.

BERTOL. I.; BEUTLER, J.F.; LEITE, D. e BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmicos afetado pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agrícola**, v.58, p.555-560, 2001.

BOONE, F.R.; VEEN, B.W. Mechanisms of crop responses to soil compaction. In: SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. VAN. (Ed.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. cap. 11, p.237-264.

BOWEN, J.E. e KRATKY, B.A. Compactation del suelo. **Agric. Americas**, 34:10-14, 1985.

CAMARA, R.K.; KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.4, p.813-819, jul-ago, 2005.

CAMARGO, O.A. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas**. Campinas: Fundação Cargill,1983. 44p.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. Compactação do solo e desenvolvimento de plantas. Piracicaba: ESALQ, 1997. 132p.

CAMPBELL, D.J.; O'SULLIVAN, M.F. The cone penetrometer in relation to trafficability, compaction, and tillage. In: SMITH, K.A.; MULLINS, C.E. **Soil Analysis**. New York: Marcell Dekker, 1991. p.399-423.

CECCON, G. **Estado da arte em produção de palha no Centro-Oeste Brasileiro**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2007. Relatório do projeto de pesquisa Fundação Agrisus 362/07, 2007. Projeto de pesquisa Fundação Agrisus 362/07: relatório.

CECCON, G.; NUNES, D.P.; RAMOS, R.E.; MARIANI, J.A.; COLMAN, O.P. **Crescimento e produtividade de milho safrinha, em dois espaçamentos entrelinhas, em Dourados, MS, em 2006 e 2007**. In: 9º Seminário Nacional de Milho Safrinha. Rumo à estabilidade: anais. Dourados, MS: 2007, p.338-344.

CECCON, G.; XIMENES, A.C. Sistema de produção de milho safrinha em Mato Grosso do Sul. In: 9º Seminário Nacional de Milho Safrinha. Rumo à estabilidade: **Anais**. Dourados, MS: 2007, p.86-92.

CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira: grãos: décimo primeiro levantamento, agosto 2007 / Companhia Nacional de Abastecimento**. –Brasília: Conab, 2007. 27p. Disponível em <http://conab.gov.br>.

CORRÊA, A.N. **Abordagem de espaço de estados no relacionamento entre atributos físicos do solo e produtividade de trigo**. Cascavel, PR: UNIOESTE, 2007. 121p. Dissertação

COSTA, L.M. **Semeadura direta:opinião debate**. Ação Amb., v.1, p.33, 1998.

CUNHA, A.A.; SILVEIRA, P.M.da.; SILVA, J.G.da.; ZIMMERMANN, F.J.P. Variabilidade da produtividade de grãos de milho e de feijão em um Latossolo submetido a diferentes preparos do solo. **Eng. Agric.**, Jaboticabal, v,22, n.1, p. 93-100, 2002.

DEXTER, A.R. **Advances in characterization of soil structure**. Soil Till. Res., 11:199-238, 1998.

DOURADO NETO, D.; PALHARES, M.; VIEIRA, P.A.; MANFRON, P.A.; MEDEIROS, S.L.P.; ROMANO, M.R. Efeito da população de plantas e do espaçamento sobre a produtividade de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 2, n. 3, p. 63-77, set./dez. 2003.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. rev. atual. Rio de Janeiro, 1997. 212p. (EMBRAPACNPS. Documentos, 1).

FAEDO, F. Safrinha de milho uma realidade no sudoeste de Goiás. In: Seminário Nacional de Milho Safrinha, 1999, Barretos, SP. **Anais**. Campinas: IAC, 1999.p. 1-3.

FREITAS, P.L. **Aspectos físicos e biológicos do solo**. In: LANDERS, J.N. **Fascículos sobre experiências em plantio direto nos Cerrados**. Uberlândia: APDC, 1994. p.187-96.

FUNDAÇÃO MS. **Tecnologia e produção: soja e milho 2007/2008**. Maracaju: FUNDAÇÃO MS, 2007. 180p.: il. 28 cm.

FUNDAÇÃO RIO VERDE. **Resultados de Pesquisa Arroz, Milho, Soja safra 2001/02**. Lucas do Rio Verde: Fundação Rio Verde, 2002. 65p. (Boletim Técnico, 5).

GAMERO, C.A. **Efeito dos tipos de preparo sobre características do solo e da cultura do milho (*Zea mays* – L)**. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1983. 102p. (Tese de Doutorado).

GERARD, C.J.; MEHTH, H. C. e HINOJOSA, F. Root growth in a clay soil. **Soil Sci.**, 114:37-49, 1972.

GROHMANN, F. & QUEIROZ NETO, J. P. Efeito da compactação artificial de dois solos limo-argiloso sobre a penetração das raízes de arroz. **Bragantia**, v.25, p.421-431, 1996.

HERRICK, J. E.; JONES, T.L. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. **Soil Science of Am. J.**, v.66, p.1320-1324, 2002.

HOAD, S.P.; SILVA, A.P.; DIAS JUNIOR, M.S.; TORMENA, C.A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.1, p.11-18, 2001.

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia: Relações solo-planta**. São Paulo, Agronômica Ceres, 1979. 263p.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e a sua relação com a densidade do solo ao longo do perfil de um Latossolo Roxo. **Ciência Rural**, v.30, n.6, p.959-964, 2000.

KLUTE, A. **Water retention: laboratory methods**. In: KLUTE, A. ed. **Methods of soil analyses – physical and mineralogical methods**. 2 ed. Madson, ASA – SSSA, 1986. p.635-660.

LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G. & CURNOE, W.E. Least limiting water range indicator of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. **Soil Till. Res.**, 78:151-170, 2004.

LARNEY, F. J. & KLADVIKO, E.J. Soil Strength Properties Under Four Tillage Systems et Three Long-Term Study Sites in Indiana. **Soil Science America Journal**. 53: 1539-1545, 1989.

MOHAPATRA, D.; RAO, P.S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v.66, p.513-518, 2005.

MOLIN, J.P. **Espaçamento entre linhas de semeadura na cultura do milho**. Castro: Fundação ABC, 2000. 72p.

MORAES, W.V. **Comportamento de características e propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro, submetido a diferentes sistemas de cultivo.** Lavras: UFLA, 1984. 107p. Dissertação Mestrado.

NUERNBERG, N.J.; STAMMEL, J.G.; CABEDA, M.S.V. Efeito de sucessão de culturas e tipos de adubação em características físicas de um solo da encosta basáltica sul-rio-grandense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 10, p. 185-190, 1986.

OLIVEIRA, G.C.; SEVERIANO, E.C. e MELLO, C.R. Dinâmica da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho da microrregião de Goiânia, GO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**. V.11, n.3, p.265-270, 2007.

PAULETTO, E.A.; GOMES, A.S. e NACHTIGALL, G.R. Produtividade do arroz irrigado em sistemas de cultivo contínuo e em rotação com soja e milho. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 18., Porto Alegre, 1989. **Anais**. Porto Alegre, IRGA, 1989. p.150-160.

PORTER, P. M.; HICKS, D. R. LUESCHEN, W. E.; FORD, J. H.; WARNES, D. D.; HOVERSTAD, T. R. Corn response to row width and plant population in the Northern Conr Belt. **Journal of production Agriculture**, Madison, v.10, 1997.

RANNO, S.K.; BROCH, D.L. Resposta do milho safrinha a fontes de nitrogênio em cobertura em Mato Grosso do Sul. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE MILHO SAFRINHA.v.9. **Anais**: Embrapa Agropecuária Oeste, Dourados, 2007. p.264-268.

RIBEIRO JR., J.I. **Análises Estatísticas no SAEG**. 1 ed. Viçosa: Editora UFV, 2001. 301p.

SANGOI, L. Understanding plant densits effects on maize growth and development: na important issue to maximize grain yield. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, p. 17-21, 2001.

SANGOI, L.; SILVA, P.R.F.; ARGENTA, G. **Arranjo espacial de plantas de milho como otimizá-lo para maximizar o rendimento de grãos.** In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 25., 2004, Cuiabá, MT. **Anais...** Cuiabá: EMBRAPA-CNPMS, 2004.

SANTOS, M.N. **Influência de diferentes sistemas de manejo nos teores de carbono orgânico e nutrientes e no tamanho e distribuição de poros em um Latossolo Vermelho-Escuro argiloso na Região dos Cerrados.** Brasília, Universidade de Brasília, 1997. 133p. (Tese Mestrado)

SECCO, D. **Estados de compactação de dois Latossolos e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas.** Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2003. 110p. (Tese de Doutorado)

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M & DA ROS, C.O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistema de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28: 797-804, 2004.

SERAFIM, M.E. **Desenvolvimento de um penetrógrafo de bancada visando a determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO) em diferentes sistemas de produção**. Dourados, MS: UFGD, 2007. 75p. Dissertação

SILVA, D.A. **Efeito de sucessões de culturas na qualidade do solo em sistema plantio direto**. Dourados: UFGD, 2007. 71p. Tese de Doutorado.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v.58, p.1775-1781, 1994.

SILVA, M.L.M.; CURI, N. e BLANCANEAUX, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. V.35, p.2485-2492, 2000.

SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. 660p.

SOUZA, P.M.; BRAGA, M.J. Aspectos econômicos da produção e comercialização do milho no Brasil. In: GALVÃO, J.C.C.; MIRANDA, G.V. **Tecnologia de produção de milho**. Viçosa: UFV, 2004. p. 13-53.

STONE, L.F.; GUIMARÃES, C.M.; MOREIRA, J.A.A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro -1: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.2, p.207-12, 2002.

STONE, L.F e SILVEIRA, P.M. Efeito do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. V.34, p.83-91, 1999.

STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; KAISER, D.R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.3, p.755-60, 2004.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G.M.C.; GUIMARÃES, M.F.; FONSECA, I.C.B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*, L.) sob diferentes sistemas de manejo em um latossolo roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.3, p.725 -30, 2001.

TSUNECHIRO, A. e GODOY, R.C.B. Histórico e Perspectivas do Milho Safrinha no Brasil. In: Seminário Nacional de Milho Safrinha, VI Londrina, 2001. **Anais**. Londrina, IAPAR, 2001. p. 1-10.

VIEIRA, L.B.; SIERRA, J.G. Uso do penetrômetro e programa de computador para traçado de perfil penetrométrico do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22, 1993, Ilhéus. **Anais...** Ilhéus: SBEA, 1993. p.1825-1837.

WANG, J.; HESKETH, J. D.; WOOLLEY, J. T. Preexisting channels and soybean rooting patterns. **Soil Science**, Baltimore, v. 141, p. 432-437, 1986.

WULLSCHLEGER, S.D.; LYNCH, J.P.; BERNTSON, G.M. Modeling the belowground response of plants and soil biota to edaphic and climatic change – What can we expect to gain? **Plant and Soil**, v.165, p.149-160, 1994.

YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. Estratégia de manejo para alta produtividade do milho. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n.113, p.1-8, 2006.