

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL**

**EFEITO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO E DO CONTEÚDO DE
ÁGUA NAS CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS
DE SOJA E ARROZ DE SEQUEIRO**

Amauri Nelson Beutler

Orientador: Prof. Dr. José Frederico Centurion

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Produção Vegetal).

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL

Novembro de 2003

Beutler, Amauri Nelson
B569e Efeito da compactação do solo e do conteúdo de água nas
características agrônômicas de soja e arroz de sequeiro/ Amauri
Nelson Beutler. -- Jaboticabal, 2003
vii, 126 f. : il.; 28 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias, 2003
Orientador: José Frederico Centurion
Banca examinadora: Alvaro Pires da Silva, Paulo Leonel Libardi,
José Eduardo Corá, José Carlos Barbosa
Bibliografia

1. Compactação do solo. 2. Conteúdo de água. 3. Produtividade
I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.425

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

AMAURI NELSON BEUTLER, nascido em 10 de maio de 1973, em Porto Xavier - RS, cursou o ensino médio profissionalizante de Técnico em Agropecuária no Colégio Presidente Getúlio Vargas (CPGV), Três de Maio - RS. Em 1991 Ingressou no curso de Agronomia na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria - RS, obtendo o título de Engenheiro Agrônomo em 1996, quando começou a prestar assistência técnica e administrar a Fazenda Indiana Agropecuária LTDA, Barreiras - BA. Em agosto de 1997 ingressou no curso de Mestrado (Ciência do Solo) na Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras - MG e, em agosto de 1999 ingressou no curso de Doutorado na Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (UNESP/FCAV), Jaboticabal - SP, obtendo o título de Doutor em novembro de 2003 (Produção Vegetal).

*“Ninguém pode voltar atrás e fazer um novo começo, mas
qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim”*

Chico Xavier

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (UNESP/FCAV), ao Departamento de Solos e Adubos e à Fazenda de Ensino e Pesquisa, pela oportunidade de realização do curso de Doutorado.

À Fapesp pelo suporte financeiro.

Aos meus pais Herbert H. Beutler e Erena A. Beutler, ao meu irmão Lauri E. Beutler e a minha irmã Liane A. Beutler pelo apoio, incentivo, confiança e solidariedade.

Ao professor José Frederico Centurion pela orientação, incansável dedicação e sugestões imprescindíveis para a realização desse trabalho e para a minha formação profissional, e pela confiança e amizade.

Ao professor Álvaro P. Silva pelo empréstimo do penetrômetro eletrônico e pelas sugestões, e ao professor Ciro A. Rosolem pelo empréstimo do scanner para avaliação de raízes.

Aos professores José F. Centurion, Itamar Andrioli, José E. Corá, José E. Turco, Célia R.P. Bueno, Marcilio V.M. Filho, Edson L.M. Coutinho, José C. Barbosa, Edemo J. Fernandes, pelas disciplinas ministradas no curso e pela amizade.

Aos amigos (as) de Pós-Graduação Cassiano G. Roque, Adriana Ribon, Marcos V. Ferraz, Maristela Chimello, Márcio C.M. Correa, Juliana Barili, Antônio A. Fracaro, Gláucia de Mello, Adilson Pelá, Ana S.G. Lima, Cleber K. Souza, Gisele A. Bonacin, Renato M. Prado, Anamari V. Araújo, Zigomar M. Souza, Maria L.P. Villar, Alysso R. Silva, Carol Fernandez, Marcos A.C Silva, Flávia Consolini, Fábio Camilotti, Eliana G. Bertin e Alexandre Auad, pelo apoio e amizade.

À Tyeko T. Sugahara pela revisão das referências bibliográficas e a todos funcionários (as) da biblioteca pelo presteza na utilização do acervo bibliográfico.

Aos memoráveis e grandiosos amigos Amilcar Nascimento, Cassiano G. Roque, Luis M.P. Souza e amigas Marizete, Cristina Derobio, Nara Rosseti, Gisele A. Bonacin e Maria L.P. Villar pela harmoniosa convivência, amizade, pelos momentos de felicidade e apoio nesses quatro anos de curso.

Aos funcionários do Departamento de Solos e Adubos Dejair L. Silva, Orivaldo G.S. Rosa, Aduino S. Alves, Orivaldo S. Gomes, Luis M.P. Souza, Ademir F. Silva, Hoster A. Pereira, Célia R.F. Muniz, Maria I. Bueno, Martha G. Pato, Cláudia C.D.M. Cirilo, pela paciência e presteza na realização dos trabalhos referentes ao curso e pela amizade.

Aos funcionários da Fazenda de Ensino e Pesquisa pela prestatividade na realização dos trabalhos de campo.

E finalmente a todos professores, funcionários, amigos e colegas que conheci, pelo apoio, sugestões, amizade e agradável convivência.

A Deus pela vida e contínuo amparo.

Muito obrigado...

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	vi
ABSTRACT .	vii
CAPÍTULO 1. Considerações gerais	01
CAPÍTULO 2. Altura e matéria seca de soja e arroz de sequeiro em níveis de compactação e de água de dois Latossolos	12
CAPÍTULO 3. Nutrição de soja e do arroz de sequeiro em níveis de compactação e de água de dois Latossolos	22
CAPÍTULO 4. Efeito da compactação do solo e do conteúdo de água na produção de soja	34
CAPÍTULO 5. Efeito da compactação do solo e do conteúdo de água na produção de arroz de sequeiro	45
CAPÍTULO 6. Qualidade física do solo e a produção de soja e arroz de sequeiro em dois Latossolos	57
CAPÍTULO 7. Relação entre alguns atributos físicos e a produção de grãos de soja e arroz de sequeiro em Latossolos	73
CAPÍTULO 8. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade de soja	84
CAPÍTULO 9. Resistência do solo à penetração, intervalo hídrico ótimo e produtividade de soja	97
REFERÊNCIAS	111

EFEITO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO E DO CONTEÚDO DE ÁGUA NAS CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS DE SOJA E ARROZ DE SEQUEIRO

RESUMO – Este estudo objetivou avaliar o efeito da compactação do solo e do conteúdo de água nas características agronômicas de soja e arroz de sequeiro em um Latossolo Vermelho distrófico, textura média (LVd) e um Latossolo Vermelho eutroférico argiloso (LVef). Para tal, foram coletadas amostras na profundidade de 0,0 - 0,20 m e passadas em peneira de 0,004 m e adubadas conforme a recomendação. O solo foi compactado em vasos de 9,82 L (0,20 m de altura e 0,25 m de diâmetro) em camadas de 0,03 m, estabelecendo-se três níveis de compactação no experimento 1 (Capítulos 2 e 3) e quatro níveis no experimento 2 (Capítulos 4, 5, 6 e 7). Nesses dois experimentos utilizaram-se dois conteúdos de água (retenção de água nas tensões de 0,05 e 0,01 MPa). Após a compactação foram semeadas três sementes por cova (quatro covas vaso⁻¹), e sete dias após foram desbastadas deixando duas plantas de soja e quatro de arroz por vaso. O terceiro experimento (Capítulos 8 e 9) foi conduzido no campo, apenas no LVd e com soja, no qual os cinco níveis de compactação corresponderam ao número de passadas de um trator de 11 Mg, uma ao lado da outra, sobre a superfície do solo, em parcelas de 9 m², com quatro repetições. Em todos os experimentos, após a semeadura, foram determinados atributos físicos e características agronômicas das plantas nos diferentes níveis de compactação. Por meio dos resultados, em casa de vegetação, verificou-se que no LVd as duas culturas toleraram menores níveis de compactação em relação ao LVef e, que uma pequena compactação aumentou a produção das plantas de soja e arroz, no maior conteúdo de água no solo (Tensão de 0,01 MPa). No menor conteúdo de água (Tensão de 0,05 MPa) foram obtidas menores produtividades e, em geral, ocorreu decréscimo em menores níveis de compactação do solo. No experimento de campo, no LVd, a produtividade de soja foi reduzida a partir da resistência à penetração de 0,85 MPa.

Palavras-Chave: resistência à penetração, conteúdo de água, Latossolos, produção

EFFECT OF SOIL COMPACTION AND WATER CONTENT IN AGRONOMICS CHARACTERISTICS OF SOYBEAN AND DRY LAND RICE

ABSTRACT – This study objectived evaluate the effect of soil compaction and water content in agronomics characteristics of soybean and dry land rice in a Oxisol, medium texture (LVd) and a clayey Oxissol (LVef). For such, samples were collected in 0.0 – 0.20 m depth and passed in mash of 0.004 m and fertilized as the recommendation. The soil was compacted in pots of 9.82 L (0.20 m of height and 0.25 m diameter) in 0.03 m layers, establishing itself three levels of compaction in experiment 1 (Chapters 2 and 3) and four levels in experiment 2 (Chapters 4, 5, 6 and 7). In these two experiments it was used two water contents (water retention in the 0.01 and 0.05 MPa tension). After the compaction it was sown three seeds for hollows (four hollows pot⁻¹), and seven days after was roughed-hew leaving two plants of soybean and four of rice for pot. The third experiment (Chapters 8 and 9) was carried out in field, only in the LVd and with soybean, in which the five levels of compaction corresponded to the number of passed of a 11 Mg tractor, one to the side of the other, on the soil surface, in 9 m² plots, with four replications. In all experiments, after the sowing, were determined physical attributes and agronomics characteristic of the plants in the different levels of compaction. By means of the results, in greenhouse, it was conclude that in LVd the two cultures had tolerated smallers levels of compaction in relation to the LVef and, that a small compaction increased the production of the plants, in the greater soil water content (0.01 MPa tension). In the smaller water content (0.05 MPa tension) smaller yields were obtained and, in general, decrease in smaller levels of soil compaction. In the field experiment, in the LVd, the soybean yield was reduced from the resistance to penetration of 0.85 MPa.

Keywords: resistance to penetration, water content, Oxisols, yield

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

O Brasil é o segundo maior produtor e exportador mundial de soja (*Glycine max*), a qual é uma das principais culturas de grãos do país e ocupa uma área de 15,5 milhões de hectares. A produtividade média dessa leguminosa no Brasil é a maior do mundo ($2,7 \text{ Mg ha}^{-1}$) e deverá continuar crescendo de modo acelerado nos próximos anos. Isso graças ao aumento da fertilidade do solo em áreas pouco férteis de cerrado, incluídas a poucos anos no setor produtivo, as quais representam mais de 50% da área agrícola destinada a produção dessa cultura (AGRIANUAL, 2002).

A expansão das fronteiras agrícolas para produção de soja no Brasil ocorreu na década de setenta, quando foram introduzidas tecnologias avançadas em insumos e máquinas agrícolas para o seu cultivo, o que levou ao sucesso da cultura. Na década de setenta, a soja era cultivada, quase que exclusivamente, em sistema de manejo convencional, onde era realizado o revolvimento do solo por meio de arações e gradagens com o objetivo de deixar o solo poroso para melhorar a germinação, o crescimento radicular e o pleno desenvolvimento da cultura. Nesse sistema de manejo, além da compactação subsuperficial do solo, ocorreu uma rápida degradação e grandes perdas por erosão, o que levou pesquisadores a refletirem sobre a sustentabilidade do solo ao longo dos anos. Desta forma, iniciaram-se estudos com preparo do solo por meio de escarificadores e subsoladores denominado de cultivo mínimo, e sem revolvimento e preparo prévio do solo denominado de sistema de plantio direto (SPD).

A implantação e o crescimento do SPD de soja no Brasil foi lento inicialmente, por causa de problemas técnicos como defensivos, acidez do solo e à implantação sem adequação da área, principalmente no que se refere a compactação do solo. Além disso, com o passar dos anos o tráfego de máquinas sobre o solo, principalmente quando este estava muito úmido, causou a compactação e redução da produtividade, com destaque para os solos mais argilosos. Estes fatores dificultaram a adoção e expansão do SPD, mesmo com a redução de 10% dos custos de produção, relativo ao preparo do solo (AGRIANUAL, 2002), e aos benefícios de ordem ambiental. No entanto,

o avanço tecnológico para o SPD possibilitou a expansão desse sistema de manejo, que já ocupa expressivas áreas agrícolas e continua crescendo gradativamente por causa dos benefícios técnicos, econômicos e ambientais. Por outro lado, em relação a compactação do solo, ainda permanece uma grande lacuna, que é a utilização de um atributo físico indicador e preciso para avaliar a compactação e definir valores críticos a partir dos quais ocorre decréscimo da produtividade.

Em relação ao arroz de sequeiro (*Oryza sativa*), destaca-se que esse é cultivado predominantemente nos cerrados e a área destinada ao seu cultivo é incrementada anualmente. Isto ocorre graças a criação de novas cultivares com produtividade mais estável e melhor qualidade dos grãos, e a geração de tecnologia na área de herbicidas e máquinas agrícolas, que tornaram o seu cultivo uma atividade mais rentável. Ainda, deve-se ao aumento das áreas com SPD e ao baixo custo comercial do milho utilizado na rotação com a soja, que tem estimulado o seu cultivo como alternativa para rotação de culturas, situação em que, sob condições de irrigação por aspersão, são obtidas produtividades acima de $4,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ (MOURA NETO, 2001). No SPD o cultivo de arroz de sequeiro é incipiente e promissor, sendo a compactação do solo o principal fator físico limitante ao crescimento radicular e a produtividade (MOURA NETO, 2001; GUIMARÃES & MOREIRA, 2001).

Para a soja e arroz de sequeiro em SPD, a compactação do solo tem efeitos prejudiciais mais expressivos em solos argilosos, principalmente os Latossolos, que são os solos de maior área geográfica no Brasil, e que são os mais utilizados.

Para avaliar a compactação do solo são utilizados vários atributos físicos, entre estes, a densidade do solo (Ds) e a porosidade. No entanto, apesar dos inúmeros esforços, tem sido difícil estabelecer relações funcionais desses atributos com o crescimento e a produção das culturas. Diante desse fato, intensificaram-se estudos com atributos que tem relações diretas com o crescimento das plantas, entre esses, atualmente a resistência do solo à penetração (RP) tem sido amplamente utilizada por causa da sua boa correlação com o crescimento radicular (LETEY, 1985; HOAD et al., 2001). Ainda, objetivando reunir vários atributos físicos diretamente relacionados ao crescimento radicular em um único parâmetro, surge o intervalo hídrico ótimo (IHO) que

é o mais recente conceito utilizado como indicador da qualidade física e estrutural do solo. O IHO é definido como o conteúdo de água no solo em que as limitações ao crescimento das plantas por causa da água disponível às plantas, da aeração e da RP são mínimas.

Compactação do solo

A compactação do solo é a compressão do solo não saturado provocando uma reorganização estrutural das partículas e de seus agregados, resultando em aumento da D_s e redução da porosidade total e dos macroporos (GUPTA & ALLMARAS, 1987; STONE et al., 2002). Esta ocorre principalmente em decorrência do excesso de pressão exercida pelo tráfego de máquinas e equipamentos sobre o solo em condições de excesso de água e do não revolvimento anual do solo, com efeitos mais pronunciados na camada de 0,075 a 0,17 m em SPD (SILVA et al., 2000b).

A compactação causa a redução da penetração e ramificação das raízes por excessiva RP e aeração deficiente, culminando com a redução da produtividade das culturas e da sustentabilidade dos solos agrícolas. Isso em consequência da redução na infiltração e na redistribuição de água no solo, redução nas trocas gasosas, da disponibilidade de oxigênio e da limitação na absorção de água e nutrientes pelas plantas (HAKANSSON & VOORHEES, 1998).

Em solos agrícolas, a compactação ocorre em duas situações: 1) compactação superficial; 2) compactação subsuperficial. Em solo compactado superficialmente, as plantas de soja suportam menores níveis de compactação, segundo JOHNSON et al. (1990). Já em cana-de-açúcar, BACCHI (1976) verificou que quando ocorreu compactação superficial o crescimento de raízes foi menos danificado comparado a compactação subsuperficial (0,10 – 0,20 m). Segundo o autor, quando o perfil é todo compactado as raízes iniciam a penetração logo após a emergência, quando ainda estão finas e com capacidade de penetrar nos microporos. Em camadas subsuperficiais compactadas, as raízes já possuem diâmetro superior aos microporos quando atingem esta camada.

Resposta das plantas à compactação do solo

A compactação do solo é um dos fatores mais importantes que determinam o crescimento radicular que ocorre através dos bioporos que possuem maior reservatório de água e nutrientes, no entanto, o crescimento de raízes é prejudicado, principalmente em dicotyledoneas, em razão do maior diâmetro das raízes (STIRZAKER et al., 1996). A compactação altera o mecanismo de fluxo de massa e difusão responsáveis pelo transporte de nutrientes até as raízes, reduzindo a permeabilidade à água e ar, a absorção de água e nutrientes pelas plantas (WOLFE et al., 1995) e, restringido o crescimento radicular e da parte aérea (GEDIGA, 1991). Ainda, o impedimento mecânico reduz a taxa de divisão e alongação celular e aumenta o diâmetro da raiz em consequência do aumento no diâmetro e número das células por comprimento radicular (BENGOUGH & MULLINS, 1990). Nestas condições, a redução no crescimento radicular implica em não suprir a demanda de água e nutrientes da parte aérea das plantas (ATWEEL, 1990a). Além disso, ATWEEL (1990b) argumenta que o carbono alocado para a parte aérea é reduzido em condições de altas compactações em virtude da maior necessidade de carboidratos pelas raízes.

Esse aumento do diâmetro das raízes e decréscimo do comprimento radicular das plantas em razão da compactação é diferenciado para as culturas. Para soja, ROSOLEM et al. (1994a) verificaram que na camada compactada ocorreu redução do comprimento radicular sem alterar o diâmetro das raízes na camada de solo compactada, sendo a redução do comprimento compensada por maior comprimento radicular nas camadas menos compactadas. Esses pesquisadores verificaram, que em geral, ocorreu apenas mudança na distribuição do sistema radicular de soja.

As raízes das plantas atuam como sensores do ambiente físico do solo e enviam sinais à parte aérea, os quais controlam o crescimento e a expansão foliar (MASLE & PASSIOURA, 1987). Em condições físicas do solo adversas, o funcionamento bioquímico da planta é alterado, gerando sinais que chegam à parte aérea, informando à planta que as condições para o seu funcionamento estão se restringindo e que reduções no crescimento e na taxa de transpiração são necessárias para manter a

hidratação (TURNER, 1997), podendo causar decréscimo da produção de matéria seca e da produtividade das culturas.

Avaliação da compactação do solo

Resistência do solo à penetração (RP)

Dentre os atributos físicos utilizados para avaliar a compactação do solo, a RP tem sido atualmente priorizada para avaliar sistemas de uso e manejo (BENGOUGH & MULLINS, 1990; TORMENA & ROLOFF, 1996; BUSSCHER et al., 2000), por ser um atributo diretamente relacionado ao crescimento das plantas (LETEY, 1985) e de fácil e rápida determinação (STOLF et al., 1983). Ainda, a RP apresenta maiores correlações com o crescimento radicular (TAYLOR & GARDNER, 1963; THOMPSON et al., 1987; HOAD et al., 2001), destacando-se como a melhor estimativa do impedimento mecânico ao crescimento radicular (BENGOUGH & MULLINS, 1990) e como um indicador mais sensível à compactação do solo (TORMENA & ROLOFF, 1996), comparado a Ds.

A RP depende das propriedades do cone (diâmetro, altura e ângulo) e do solo (Ds, resistência ao cisalhamento, conteúdo de água e textura) (FRITON, 1990). Com relação ao solo, a RP tem relação inversa com o conteúdo de água e direta com a Ds e a textura (GOMES & PEÑA, 1996). Com a diminuição do conteúdo de água ocorre um aumento na RP, em consequência da maior coesão entre as partículas (BELTRAME et al., 1981). Em geral, o conteúdo de água na capacidade de campo é considerado ideal quando se determina a RP, situação em que é obtida boa correlação entre a RP e o crescimento radicular (HENDERSON, 1989; ARSHAD et al., 1996).

Por outro lado, KLEIN et al. (1998) afirmam que a determinação da RP apenas quando o conteúdo de água se encontra próximo a capacidade de campo não é recomendável, pois grandes variações na Ds poderão não ser detectadas. Nesse contexto, HAMBLIM (1985) afirma que a RP é acentuadamente influenciada pelo conteúdo de água e pela condição estrutural do solo, fato que dificulta a obtenção de valores críticos de RP para as plantas.

Com relação a interação da RP com outros atributos físicos do solo, STIRZAKER et al. (1996) verificaram que o efeito do conteúdo de água na RP foi maior com o incremento da Ds, sendo que pequenas alterações na Ds proporcionaram acentuado aumento da RP em solos mais compactados e secos. ROSOLEM et al. (1999) verificaram que no mesmo nível de Ds a RP é maior em solos argilosos e, que em solo mais seco ou mais compactado a diferença de crescimento radicular em função da textura diminui. Ainda, verificaram que próximo a Ds máxima, a RP é superior nos solos mais argilosos, e pequenos incrementos na Ds causam acentuados incrementos na RP em solos argilosos compactados.

Para determinar a RP são utilizados penetrômetros, porém, possuem diâmetros das extremidades maiores em relação à extremidade das raízes em crescimento, e determinam valores absolutos 2 a 8 vezes superior a máxima pressão axial que as raízes podem exercer de 0,9 a 1,3 MPa (MISRA et al., 1986). Além disso, as raízes não crescerem em linha reta, produzem mucilagens que reduzem o atrito destas com o solo, e podem crescer através dos poros ou linhas de fraqueza com menor resistência, enquanto os penetrômetros determinam a RP máxima do solo (CAMARGO, 1983). No entanto, esse autor afirma que valores relativos são de grande utilidade quando se pretende verificar a RP que restringe o crescimento das raízes.

Diversos penetrômetros foram desenvolvidos, sendo obtidos vários avanços em relação a geometria do cone, taxa de penetração e fricção solo-metal (VOORHEES et al., 1975). Atualmente, os penetrômetros rotineiramente utilizados são o penetrômetro de "Pocket", de "impacto" e de "anel dinamométrico". Para determinações em laboratório são utilizados penetrômetros eletrônicos equipados com atuador linear (velocidade constante de penetração) e célula de carga acoplada por meio de interface a um microcomputador (TORMENA et al., 1998).

Os penetrômetros são denominados, em função do princípio de penetração, de estáticos, em que o conjunto é pressionado contra o solo e a RP é registrada em um dinamômetro; e, dinâmicos, em que a haste penetra no solo em decorrência do impacto de um peso que cai em queda livre de uma altura constante (STOLF, 1991). Entretanto, quanto maior a velocidade de penetração, maior o valor de RP obtido, sendo mais

evidenciado em solos sujeitos a compressões elásticas, como solos argilosos, onde a resistência dinâmica deve apresentar-se maior que a estática (CAMPBELL, 1977).

Estudos de STOLF (1991) indicam que o penetrômetro de impacto apresentou valores de RP superiores em solo compactado argiloso, sendo essas diferenças menores em solos arenosos, comparado a um penetrômetro estático com mola dinamométrica. Resultados semelhantes foram obtidos por BEUTLER et al. (2002), em Latossolos, em que o penetrômetro de impacto determinou valores superiores de RP comparado ao penetrômetro de anel dinamométrico. Neste contexto, HERRICK & JONES (2002) mencionam que os penetrômetros estáticos apresentam um método mais padronizado para determinação da RP.

Intervalo hídrico ótimo (IHO)

Entre os atributos físicos diretamente relacionados à produtividade das culturas, o conteúdo de água no solo tem sido mais intensivamente estudado. Com relação a esse atributo, a água disponível às plantas (AD), que é o conteúdo de água entre a capacidade de campo (CC) (0,01 MPa) e ponto de murcha permanente (PMP) (1,5 MPa), tem sido utilizada em estudos de crescimento de raízes (JONES et al., 1991), assumindo que não ocorre nenhum outro tipo de limitação entre esse conteúdo de água. Entretanto, nos limites de água disponível podem ocorrer limitações por excessiva RP, ou porosidade de aeração (PA) deficiente (LETEY, 1985). Assim, surgiu o intervalo hídrico ótimo (IHO) que reúne três atributos físicos (AD, RP, PA) diretamente relacionados ao crescimento das raízes (LETEY, 1985) em um único conceito. Este está sendo utilizado no Canadá e mais recentemente foi estudado por TORMENA et al. (1998) em solo tropical no Brasil.

O IHO é o mais recente conceito utilizado como indicador da qualidade física e estrutural do solo e define o conteúdo de água no solo em que as limitações ao crescimento das plantas por causa da água disponível às plantas, da aeração e da RP são mínimas. Esses atributos (AD, PA e RP) têm relações diretas e atuam

simultaneamente no crescimento das plantas; assim, um aumento no conteúdo de água promove redução na aeração e da RP às raízes das plantas (LETEY, 1985).

O IHO tem como limite superior o conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa equivalente a capacidade de campo (REICHARDT, 1988) ou o conteúdo de água no qual a porosidade de aeração é de 10% (GUPTA & ALLMARAS, 1987); o limite inferior é o conteúdo de água retida na tensão de 1,5 MPa equivalente ao ponto de murcha permanente (SAVAGE et al., 1996) ou a RP de 2,0 MPa (SILVA et al., 1994).

Dentro desses limites estabelecidos para o IHO, o crescimento das culturas é menos restritivo (SILVA et al., 1994). SILVA & KAY (1996) verificaram que a ocorrência de conteúdos de água fora dos limites do IHO restringiu o crescimento de plantas de milho.

O aumento da compactação do solo em razão do manejo inadequado impõem reduções no IHO podendo atingir o valor zero quando o limite superior e inferior são iguais, quando é atingida a densidade do solo crítica (Dsc). Segundo o modelo do IHO, quando a Dsc é atingida as raízes das plantas são expostas a condições adversas ao crescimento. Estudos mostram que a RP (2,0 MPa) foi o fator que mais freqüentemente diminuiu o IHO no limite inferior (SILVA et al., 1994; TOPP et al., 1994; TORMENA et al., 1998).

Valores críticos de RP

Os valores de RP críticos ao crescimento radicular variam com o tipo de solo, cultivares, culturas e conteúdo de água no solo (TAYLOR et al., 1966; GOSS, 1977; DEXTER, 1987). Em geral, valores de RP considerados críticos ao crescimento radicular das plantas variam de 1,0 a 4,0 MPa (DEXTER, 1987); 1,5 a 3,0 MPa (GRANT & LAFOND, 1993); 2,0 a 4,0 MPa (ARSHAD et al., 1996); sendo em geral adotado o valor de 2,0 MPa (TAYLOR et al., 1966; Silva et al., 1994; TORMENA et al., 1998). CAMARGO & ALLEONI (1997) consideram baixos os valores de RP de 1,0 a 2,5 MPa, com pouca limitação ao crescimento radicular. Entretanto, é importante mencionar que em geral é adotado o valor de RP de 2,0 MPa como crítico ao desenvolvimento

radicular, sem discriminar cultivares, culturas e tipos de solo, fato que deve ser considerado quando for realizada qualquer inferência em relação a valores críticos.

Vários trabalhos de curta duração, indicam que a alongação radicular é mais lenta e menor com o incremento da RP a partir de níveis relativamente baixos (< 1,0 MPa) de RP (TAYLOR & RATLIFF, 1969; VOORHEES et al., 1975; BAR-YOSEF & LAMBERT, 1981; BENGOUGH & MULLINS, 1990; KIRKEGAARD & TROEDSON, 1992; BENGOUGH & YOUNG, 1993; ROSOLEM et al., 1994a; ROSOLEM et al., 1999). Entretanto, TAYLOR & BRAR (1991) afirmam que mudanças no sistema radicular e redução no comprimento radicular não necessariamente causam alterações no crescimento e produtividade das plantas, pois muitas vezes o sistema radicular é reduzido e mantém satisfatoriamente o suprimento de água e nutrientes para a parte aérea. Segundo PABIN et al. (1998), a redução de 40% no comprimento radicular é crítico à produtividade das plantas.

Redução no conteúdo de nutrientes da parte aérea da soja por causa da compactação foram verificadas por BORGES et al. (1988) para P, K, Mg e Ca; DOLAN et al. (1992) P e K; ROSOLEM et al. (1994a) para N. FERNANDEZ et al. (1995) verificaram que o impedimento mecânico ao crescimento radicular levou a diminuições nas concentrações de N e Mg e, aumentos nas concentrações de P, Ca e K na parte aérea da soja. Já NOGUEIRA & MANFREDINI (1983) não verificaram redução na absorção de N, P, K, Ca, Mg e S, com o aumento da compactação.

Para gramíneas, poucos estudos avaliam a influência da compactação na absorção de nutrientes, especialmente pela cultura do arroz de sequeiro. SILVA et al. (1992) estudando gramíneas forrageiras verificaram que o impedimento mecânico do solo não induziu alterações nos teores de P, K e Ca na parte aérea das plantas. ROSOLEM et al. (1994b) estudando ampla condição de compactação (1,03-1,72 Mg m⁻³) não verificaram diferenças na absorção de N, P, K, Ca e Mg na parte aérea de milho. SHIERLAW & ALSTON (1984), também não verificaram diferenças na absorção de fósforo quando a densidade do solo variou de 1,20 a 1,75 Mg m⁻³, em plantas de milho.

Em condições de campo, ORTOLANI et al. (1982) verificaram decréscimo de até 50% na produtividade de soja (UFV-1) quando a RP aumentou de 0,44 para 1,46 MPa

(16 kg kg⁻¹ de água) em Latossolo Vermelho-Escuro, em condições de campo; PETER (1990) verificou que 2,8 MPa foi crítico ao crescimento radicular da soja, em Latossolo Roxo; SILVA et al. (2000b) verificaram que na RP de 1,5 MPa, em Latossolo Vermelho argiloso, a soja teve uma produtividade adequada; e GOEDERT et al. (2002) verificaram em Latossolo Vermelho Amarelo muito argiloso e Latossolo Vermelho argiloso que a RP de 1,1 MPa não afetou a produtividade de soja.

MEROTTO & MUNDSTOCK (1999) estudaram o efeito da RP, em Podzólico Vermelho-Escuro, na produção de matéria seca das raízes e da parte aérea, diâmetro e comprimento das raízes de trigo em condições controladas, mantendo o conteúdo de água do solo igual em todos os tratamentos (0,26 m³ m⁻³), reduzindo o conteúdo gravimétrico de água com incremento na Ds. Os autores verificaram que em 2,0 MPa a produção de matéria seca da parte aérea de trigo foi ligeiramente afetada e, em 3,5 MPa ocorreu severa limitação ao crescimento das plantas.

Em relação ao tipo de solo, RIBEIRO (1999) estudando compactação do solo verificaram que a compactação em Latossolo Vermelho-Escuro foi mais prejudicial ao crescimento das plantas de soja e eucalipto comparado ao Latossolo Vermelho-Amarelo arenoso.

Por outro lado, KOOISTRA et al. (1992) verificaram que em solos muito porosos (soltos) o crescimento radicular pode não ser afetado, mas o menor contato das raízes com o solo pode restringir a absorção de água e nutrientes. CORNISH & McWILLIAM (1984) e VEEN et al. (1992) verificaram incremento na absorção de fósforo e nitrato, respectivamente, e BORGES et al. (1988) verificaram maior absorção de P, K e Mg com uma pequena compactação do solo.

SHIERLAW & ALSTON (1984) verificaram que a RP de 1,75 MPa (conteúdo de água retida na tensão de 0,002 MPa) incrementou a produção de matéria seca da parte aérea e diminuiu o comprimento de raízes em milho. VEEN & BOONE (1990) verificaram que, 9 dias após a semeadura de milho, o comprimento radicular diminuiu em todos os tratamentos, no entanto, o peso úmido de raízes incrementou quando a RP passou de 0,5 a 1,0 MPa diminuindo posteriormente com o incremento da RP, no conteúdo de água retida na tensão de 0,1 MPa e, quando a tensão foi de 0,63 MPa,

ocorreu decréscimo do peso das raízes a partir da RP de 0,7 MPa. Em solo úmido o crescimento radicular de milho foi completamente inibido na RP de 4,2 MPa.

Na literatura, encontram-se vários trabalhos que avaliaram a compactação do solo em camadas subsuperficiais compactadas, entre estes, BORGES et al. (1988), MORAES et al. (1991), SILVA et al. (1992), ROSOLEM et al. (1994a, b), FERNANDEZ et al. (1995), WOLFE et al. (1995), ALVARENGA et al. (1996) e MORAES et al. (1998). No entanto, apenas ROSOLEM et al. (1994b) e WOLFE et al. (1995) avaliaram a compactação do solo por meio da RP. WOLFE et al. (1995) verificaram que a redução da produtividade seguiu a ordem decrescente repolho, feijão, pepino, milho com o aumento da RP na camada subsuperficial compactada (0,10-0,20 m). No entanto, poucos estudos avaliam a compactação superficial do solo.

Assim, a hipótese desse estudo é de que a compactação superficial do solo e o conteúdo de água alteram a produtividade das culturas.

Este estudo objetivou avaliar o efeito da compactação do solo e do conteúdo de água nas características agrônômicas de soja e arroz de sequeiro em um Latossolo Vermelho distrófico, textura média e um Latossolo Vermelho eutrófico argiloso.

EXPERIMENTOS:

Experimento 1: Os capítulos 2 e 3 são resultados do experimento de casa-de-vegetação, que foi conduzido até a fase de florescimento da soja e arroz de sequeiro objetivando avaliar a resposta aos níveis de RP e de água pré-estabelecidos.

Experimento 2: Os capítulos 4, 5, 6 e 7 são resultados do experimento de casa-de-vegetação, conduzido até a colheita de grãos. Este experimento foi instalado com base nos resultados do experimento 1, objetivando definir valores de RP a partir dos quais ocorre decréscimo da produtividade de soja e arroz de sequeiro.

Experimento 3: Os capítulos 8 e 9 são resultados do experimento de campo, conduzido com o objetivo de avaliar a resposta da soja a compactação em condições de campo.

CAPÍTULO 2 – ALTURA E MATÉRIA SECA DE SOJA E ARROZ DE SEQUEIRO EM NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO E DE ÁGUA DE DOIS LATOSSOLOS

RESUMO – Este trabalho objetivou avaliar a altura de plantas e produção de matéria seca da parte aérea e das raízes de soja e arroz de sequeiro em três níveis de compactação (entre 0,25 e 6,46 MPa) determinados com o penetrômetro de anel dinamométrico, e dois conteúdos de água (conteúdo de água retida a 0,05 e 0,01 MPa). Foram utilizadas amostras de Latossolo Vermelho, distrófico, textura média (LVd) e, Latossolo Vermelho, eutroférico, textura argilosa (LVef), coletadas na profundidade de 0,0-0,20 m e compactadas em camadas de 0,03 m, em vasos de 0,20 m de altura e 0,25 m de diâmetro. A altura das plantas foi reduzida em valores de RP superiores a 3,0 MPa. Menor produção de matéria seca da parte aérea das plantas ocorreu na RP de 3,76 e 3,37 MPa para soja; 3,93 e 3,37 MPa para arroz, no Latossolo Vermelho, textura média e Latossolo Vermelho argiloso, respectivamente, no conteúdo de água retida na tensão de 0,05 MPa e no maior conteúdo de água (0,01 MPa) somente ocorreu redução da produção de matéria seca das raízes.

Palavras-Chave: resistência à penetração, conteúdo de água, *Glycine max*, *Oryza sativa*

INTRODUÇÃO

A compactação do solo, originada da pressão exercida pelos pneus das máquinas e por implementos agrícolas sobre o solo, principalmente em condições de solo muito úmido, é um dos principais fatores físicos que limitam a produtividade de soja e arroz de sequeiro.

A compactação do solo, genericamente caracterizada pela diminuição do volume de vazios ocupados pela água ou pelo ar, limita a infiltração e redistribuição de água no solo; reduz as trocas gasosas e a disponibilidade de oxigênio, que impede a absorção ativa de água pelas raízes e seu crescimento em busca de água e nutrientes; limita o crescimento radicular por impedimento mecânico, culminando com a redução do crescimento da parte aérea e da produtividade das culturas (BELTRAME & TAYLOR, 1980).

Em solos compactados ocorrem mudanças e redução no comprimento do sistema radicular, restringindo a absorção de água e nutrientes. No entanto, não necessariamente ocorre redução do crescimento da parte aérea, pois muitas vezes o sistema radicular é reduzido e mantém satisfatoriamente o suprimento de água e nutrientes a parte aérea (TAYLOR & BRAR, 1991). Por outro lado, solos muito porosos podem não afetar o crescimento radicular, porém o menor contato das raízes com o solo pode diminuir a absorção de água e nutrientes. Neste sentido, estudos mostram que muitas vezes uma pequena compactação é benéfica por aumentar a área de contato das raízes com o solo (SIDIRAS & VIEIRA, 1984; KOOISTRA et al., 1992). Estes autores afirmaram que uma pequena compactação pode proporcionar melhor retenção de água e melhores condições de absorção de nutrientes por unidade de raiz. CINTRA & MIELNICZUK (1983) observaram que a cultura de soja e trigo responderam positivamente ao incremento da compactação até a densidade de $1,04 \text{ Mg m}^{-3}$.

KOPI & DOUGLAS (1991) argumentam que uma grande área de contato das raízes com o solo, espaço poroso suficiente para o movimento de água e gases e baixa resistência do solo a penetração (RP) das raízes seria a estrutura do solo ideal ao crescimento das plantas.

A RP é o atributo físico priorizado atualmente em estudos de compactação do solo, por estar diretamente relacionada com o crescimento das plantas, e por ser de fácil e rápida determinação (WEAICH et al., 1992). Valores de RP críticos ao crescimento radicular variam de 1,0 a 4,0 MPa (NESMITH, 1987; GRANT & LAFOND, 1993; TOPP et al., 1994; ARSHAD et al., 1996), sendo, em geral, o valor de 2,0 MPa aceito como impeditivo ao crescimento radicular (TORMENA et al., 1998), apesar das diferentes espécies apresentarem competências diferenciadas para penetrar o solo.

MIELNICZUK et al. (1985), verificaram em Latossolo Roxo compactado artificialmente (conteúdo de água de $0,28 \text{ kg kg}^{-1}$), que a produção de matéria seca de soja, trigo e aveia foram menores na RP de 3,13 MPa. Em condições de campo, SECCO et al. (2000), em Latossolo Vermelho, verificaram redução de 8,3% na produção de trigo na RP de 2,0 a 2,4 MPa. PETTER (1990) verificou menor crescimento radicular de soja a partir de 2,8 MPa, em condições de campo.

Em relação ao conteúdo de água no solo, maiores conteúdos aumentam a tolerância das plantas a compactação (DEXTER, 1987; STIRZAKER et al., 1996; RIBEIRO, 1999). STIRZAKER et al. (1996) verificaram que, no maior conteúdo de água, o crescimento de cevada foi maior na densidade intermediária e, no menor conteúdo de água o crescimento foi superior no menor nível de compactação.

Na literatura encontram-se alguns estudos avaliando a influência de camadas subsuperficiais de solo compactadas na produção de matéria seca pelas culturas. Entretanto, há necessidade de estudos em sistemas com revolvimento mínimo do solo, como o sistema de plantio direto, priorizado por vantagens técnicas e econômicas, que levam a formação de camadas superficiais compactadas.

Este estudo teve por objetivo avaliar a altura de plantas e matéria seca da parte aérea e das raízes de soja e arroz de sequeiro em diferentes níveis de RP e de água de Latossolo Vermelho, distrófico, textura média e Latossolo Vermelho, eutroférico, textura argilosa.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em casa de vegetação da Universidade Estadual Paulista (UNESP/FCAV), Jaboticabal, SP. Utilizaram-se um Latossolo Vermelho, distrófico, típico, textura média, A moderado, caulinitico, hipoférrico (LVd), e Latossolo Vermelho, eutroférico, típico, textura argilosa, A moderado, caulinitico-oxídico (LVef) (ANDRIOLI & CENTURION, 1999), cuja composição granulométrica foi determinada em amostras deformadas por meio da dispersão com NaOH ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$) e agitação lenta durante 16 horas, sendo o conteúdo de argila obtido pelo método da pipeta (GEE & BAUDER, 1986). A densidade de partículas (D_p) determinada pelo método do picnômetro (EMBRAPA, 1997) (Tabela 1).

Tabela 1. Características do LVd e LVef na profundidade de 0,0-0,20 m.

Solo	Matéria orgânica	Argila	Silte	Areia	Fe_2O_3	Al_2O_3	D_p
		----- g kg^{-1} -----					Mg m^{-3}
LVd	14	271	42	687	54	135	2,82
LVef	37	517	256	227	205	235	2,98

As amostras dos solos foram coletadas na camada de 0,0-0,20 m e passadas em peneira de 0,004 m. O solo utilizado para cada cultura foi adubado segundo RAIJ et al. (1996); em um m^3 de solo foi utilizada a adubação referente a 5 m^2 no campo, cuja análise química seguiu a metodologia de RAIJ et al. (1987). Foi realizado a calagem do solo com calcário com poder relativo de neutralização total de 135%, sendo o solo mantido com conteúdo de água próximo a capacidade de campo durante 30 dias. Após esse período foi realizada a adubação com macronutrientes (N, P e K), para as culturas.

Após a realização da adubação, foram determinados os conteúdos de água equivalentes a retenção de água nas tensões de 0,05 e 0,01 MPa, em amostras deformadas, determinada segundo KLUTE (1986). Na sequência, foi ajustado o conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa, e o solo foi colocado em vaso cilíndrico de PVC com capacidade de 9,82 L (altura de 0,20 m e diâmetro de 0,25 m),

em camadas de 0,03 m. Cada camada foi compactada em decorrência da queda livre de um êmbolo de 7 kg, da altura de 0,60 m, no centro geométrico de um suporte de madeira com diâmetro ligeiramente inferior ao vaso (Figura 1a). Os níveis de compactação corresponderam a 0, 5, 11 e 0, 7, 13 impactos por camada de solo, para o LVd e LVeF, respectivamente.

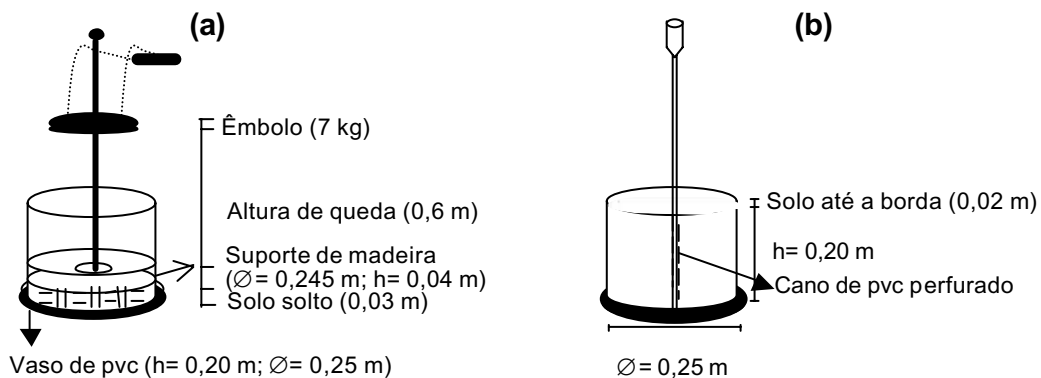


Figura 1. Esquema da compactação do solo no vaso (a) e do vaso utilizado para o cultivo da soja e do arroz (b).

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial com três níveis de compactação e dois conteúdos de água, com três repetições.

A resistência do solo à penetração (RP) foi determinada com o penetrômetro de anel dinamométrico (Solotest 1.210.001), com ângulo de cone de 30° recomendado pela ASAE (1976). As leituras foram realizadas, nos conteúdos de água retida nas tensões de 0,05 e 0,01 MPa, quando a base do cone atingiu a profundidade de 0,03 m e, o valor de cada repetição foi obtida da média de quatro subdeterminações. Utilizou-se cone com diâmetro de 0,0284; 0,022 e 0,012 m, respectivamente, diminuindo o diâmetro do cone com o incremento da compactação do solo. O valor obtido no relógio de leitura foi transformado em kgf pela equação linear de calibração do aparelho, a seguir:

$$R(\text{kgf}) = 1,0444 + 0,2998x$$

em que $R(kgf)$ é a resistência à penetração (($kgf/área\ cone$) * 0,098 = MPa) e x é a leitura no relógio.

Após a compactação, foram semeadas três sementes por cova (4 covas vaso⁻¹) de soja (*Glycine max* cv. Embrapa 48) e arroz (*Oryza sativa* cv. IAC 165), no ano de 2000. Após sete dias, realizou-se o desbaste, deixando duas plantas de soja e quatro plantas de arroz por vaso, respectivamente. Nesta data foram aplicados os conteúdos de água retida nas tensões de 0,05 e 0,01 MPa, visto que foi necessário aumentar o conteúdo de água no solo para possibilitar a germinação nos vasos mais secos e compactados. O conteúdo de água foi mantido constante, mediante duas pesagens diárias dos vasos referentes a uma repetição e reposição de água através de tubo de PVC perfurado (Figura 1b), instalado no centro geométrico do vaso, sendo feita a pesagem e rodízio de todos vasos a cada cinco dias.

No início do florescimento, aos 54 dias após a semeadura, foi avaliada a altura das plantas e a matéria seca da parte aérea e das raízes das plantas de soja e arroz.

A análise estatística dos resultados consistiu da análise da variância e utilização do teste de Tukey a 5% de probabilidade para comparação das médias.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Altura e matéria seca das plantas de soja

A altura das plantas de soja foi superior no maior conteúdo de água, no LVd e LVef, condizente com a maior disponibilidade de água (Tabela 2). Entre os níveis de RP, não houve diferença, no LVd. Já no LVef, no menor conteúdo de água, ocorreu redução da altura de plantas a partir da RP de 3,37 MPa, fato não verificado na RP de 3,76 MPa no maior conteúdo de água, corroborando com STIRZAKER et al. (1996) e RIBEIRO (1999). Isto deve-se ao menor conteúdo de água no solo que possivelmente levou a deficiência de água e nutrientes, resultando em menor crescimento da parte aérea das plantas. Neste contexto, TARDIEU (1994) verificou que em solos

compactados ocorre rápida depleção de água nos poros ocupados pelas raízes, que aumenta a resistência lateral à penetração das raízes e aumenta a resistência ao fluxo de água em direção as raízes.

Tabela 2. Altura, matéria seca da parte aérea e das raízes das plantas de soja, no LVd e LVef, em três níveis de resistência à penetração (RP) e dois conteúdos de água.

LVd							
----- Conteúdo de água (kg kg ⁻¹) -----							
0,12	0,17	0,12	0,17	0,12	0,17	0,12	0,17
RP (MPa)	Altura da planta (cm)	Matéria seca (g planta ⁻¹)					
		Parte aérea			Raízes		
0,38	0,27	74,4 Ab	96,8 Aa	8,1 Ab	12,1 Ba	2,6 Ab	3,9 Ba
1,95	1,79	72,2 Ab	96,2 Aa	8,7 Ab	17,9 Aa	2,1 Ab	4,4 Aa
3,76	2,69	62,1 Ab	95,8 Aa	4,6 Bb	15,0 ABa	0,9 Bb	4,0 Ba
LVef							
0,20	0,26	0,20	0,26	0,20	0,26	0,20	0,26
0,64	0,36	53,8 Ab	73,0 Aa	4,9 Ab	10,6 Ba	2,0 Ab	4,8 Aa
3,37	2,03	31,9 Bb	79,4 Aa	1,9 Bb	17,1 Aa	0,4 Bb	3,5 Ba
5,84	3,76	27,7 Bb	75,0 Aa	1,9 Bb	17,5 Aa	0,5 Bb	3,6 Ba

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, para a mesma característica agronômica, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

No menor conteúdo de água no LVd, a RP de 3,76 MPa não afetou a altura das plantas, enquanto que a RP de 3,37 MPa no LVef, restringiu a altura das plantas. Esse resultado deve-se provavelmente a utilização do conteúdo de água retida a maior tensão no LVef em relação ao LVd. O conteúdo de água foi determinado em amostras deformadas nas tensões de 0,05 e 0,01 MPa, o qual foi utilizado no experimento. Isso conduziu a valores aproximados do conteúdo de água, visto que o mesmo foi determinado, posteriormente, em amostras indeformadas, obtendo-se 0,11 e 0,14 e, 0,24 e 0,27 kg kg⁻¹, para o LVd e LVef, nas tensões de 0,05 e 0,01 MPa, respectivamente. Neste sentido, SIDIRAS et al. (1984) afirmam que amostras indeformadas estimam melhor a realidade e as condições de campo.

Ainda, RIBEIRO (1999) verificaram que a compactação do solo é mais prejudicial ao crescimento das plantas de soja em solo argiloso e com menor conteúdo de água, em relação à solo arenoso.

A produção de matéria seca da parte aérea e das raízes de soja apresentou comportamento diferenciado em relação a altura de plantas (Tabela 2). No maior conteúdo de água a matéria seca da parte aérea aumentou na RP de 1,79 e não diferiu de 2,69 MPa e, a matéria seca das raízes foi superior na RP de 1,79 MPa, no LVd. Isso possivelmente está relacionado a maior contato das raízes com o solo, que proporciona maior absorção de água e nutrientes por unidade de raiz, segundo SIDIRAS & VIEIRA (1984). Maior produção de matéria seca com uma pequena compactação também foram verificados por CINTRA & MIELNICZUCK (1983) em soja e trigo e, STIRZAKER et al. (1996) em cevada.

No maior conteúdo de água, no LVef, a matéria seca da parte aérea aumentou e das raízes diminuiu na RP de 2,03 MPa e não diferiu de 3,76 MPa, corroborando com MIELNICZUK et al. (1985) e TAYLOR & BRAR (1991). Estes autores afirmam que muitas vezes o sistema radicular é reduzido, porém, mantém satisfatoriamente o suprimento de água e nutrientes à parte aérea. MIELNICZUK et al. (1985) em experimento semelhante, em Latossolo Roxo, verificou menor produção de matéria seca da parte aérea de soja aos 54 dias, na RP de 3,13 MPa, em relação a RP de 0,19 e 2,35 MPa, no conteúdo de água de $0,28 \text{ kg kg}^{-1}$.

No menor conteúdo de água ocorreu redução da matéria seca da parte aérea e das raízes de soja na RP de 3,76 e 3,37 MPa no LVd e no LVef, respectivamente. Esses resultados corroboram com STIRZAKER et al. (1996), que verificaram que em menores conteúdos de água, menores níveis de compactação proporcionam melhores respostas. Ainda, no menor conteúdo de água, o valor de RP crítico à produção de matéria seca da parte aérea de soja no LVef foi menor em relação ao LVd. Isso é atribuído a utilização do conteúdo de água retida em maior tensão no LVef, resultando em menor conteúdo de água disponível às plantas.

Altura e matéria seca das plantas de arroz

A altura das plantas de arroz, no maior conteúdo de água, foi superior na RP de 1,79 e 2,83 MPa, no LVd (Tabela 3). No LVef, na RP de 1,91 e 3,53 MPa ocorreu maior altura de plantas em relação a menor compactação, corroborando os estudos de CINTRA & MIELNICZUCK (1983) e STIRZAKER et al. (1996). Nesse contexto, SIDIRAS & VIEIRA (1984) afirmam que pequena compactação melhora a retenção de água e proporciona maior absorção de água e nutrientes por unidade de raiz.

No menor conteúdo de água, a altura das plantas de arroz foi superior na RP de 1,99 MPa, apresentando valores inferiores na RP de 3,93 MPa, no LVd. Já no LVef ocorreu redução da altura de plantas a partir de 3,37 MPa.

A altura de plantas no menor nível de RP não foi influenciada pelo conteúdo de água, no LVd. Isto deve-se possivelmente ao menor contato das raízes com o solo, reduzindo a absorção de nutrientes, conforme mencionado por KOOISTRA et al. (1992).

Tabela 3. Altura e matéria seca da parte aérea e das raízes das plantas de arroz, no LVd e LVef, em três resistências à penetração (RP) e dois conteúdos de água.

LVd							
----- Conteúdo de água (kg kg ⁻¹) -----							
0,12	0,17	0,12	0,17	0,12	0,17	0,12	0,17
RP (MPa)	Altura da planta (cm)	Matéria seca (g planta ⁻¹)					
		Parte aérea			Raízes		
0,42	0,25	19,5 Ba	19,7 Ba	3,8 Ba	4,2 Ba	2,2 Ab	3,5 Ba
1,99	1,79	26,1 Ab	28,3 Aa	7,6 Ab	12,7 Aa	2,1 Ab	4,6 Aa
3,93	2,83	21,3 Bb	27,3 Aa	4,0 Bb	12,2 Aa	1,3 Bb	4,0 ABa
LVef							
0,20	0,28	0,20	0,28	0,20	0,28	0,20	0,28
0,57	0,40	14,8 Ab	18,4 Ba	2,1 Ab	5,6 Ca	0,4 Ab	0,8 Ba
3,37	1,91	7,0 Bb	27,5 Aa	0,2 Bb	10,2 Ba	0,1 Bb	2,9 Aa
6,46	3,53	6,0 Bb	29,4 Aa	0,1 Bb	12,5 Aa	0,1 Bb	3,2 Aa

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, para a mesma característica agrônômica, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A produção de matéria seca da parte aérea e das raízes de arroz foi superior no segundo e terceiro nível de compactação, nos dois solos, no maior conteúdo de água (Tabela 3), corroborando KOOISTRA et al. (1992).

No menor conteúdo de água, no LVd, a matéria seca da parte aérea e das raízes aumentou até a RP de 1,99 MPa, apresentando valores inferiores na RP de 3,93 MPa. Já no LVef ocorreu a senescência das plantas na RP de 3,37 MPa, quando foram aplicados os conteúdos de água correspondentes.

A menor tolerância das plantas de arroz, assim como de soja, no menor conteúdo de água, no LVef em relação ao LVd, deve-se principalmente ao conteúdo de água utilizado no experimento ser o conteúdo retido em maiores tensões em relação ao LVd, resultando em menor conteúdo de água disponível as plantas.

A RP de 2,0 MPa considerada crítica ao crescimento radicular não restringiu a produção de matéria seca das raízes e da parte aérea das plantas de soja e arroz no conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa, sendo que no menor conteúdo de água as plantas foram mais sensíveis a compactação do solo.

CONCLUSÕES

A altura das plantas foi reduzida em valores de resistência à penetração superiores a 3,00 MPa. A produção de matéria seca da parte aérea das plantas foi menor na resistência à penetração de 3,76 e 3,37 MPa para soja; 3,93 e 3,37 MPa para arroz, no Latossolo Vermelho, textura média e Latossolo Vermelho argiloso, respectivamente, no conteúdo de água retida na tensão de 0,05 MPa e no maior conteúdo de água ocorreu apenas decréscimo da produção de matéria seca das raízes.

CAPÍTULO 3 - NUTRIÇÃO DA SOJA E DO ARROZ DE SEQUEIRO EM NÍVEIS DE COMPACTAÇÃO E DE ÁGUA DE DOIS LATOSSOLOS

RESUMO - Este trabalho objetivou avaliar o acúmulo de nutrientes na parte aérea de soja (*Glycine max*) e arroz de sequeiro (*Oryza sativa*) em três níveis de resistência do solo à penetração (RP) (entre 0,25 e 6,46 MPa) determinados com o penetrômetro de anel dinamométrico, e dois conteúdos de água (conteúdo de água retida a 0,05 e 0,01 MPa). Foram utilizadas amostras de Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e, Latossolo Vermelho eutrófico (LVef), coletadas na profundidade de 0,0-0,20 m, as quais foram compactadas em camadas de 0,03 m, em vasos de 0,20 m de altura e 0,25 m de diâmetro. No início do florescimento, aos 54 dias, determinou-se o conteúdo total de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn acumulados na parte aérea das plantas. As culturas de soja e arroz toleraram maiores níveis de RP, relativo ao conteúdo de nutrientes na parte aérea, no maior conteúdo de água, no LVef em relação ao LVd. O nível de RP a partir do qual ocorreu menor conteúdo de nutrientes na parte aérea da soja foi 2,69 MPa no LVd e, no LVef a RP de 3,76 MPa foi benéfica ao acúmulo de nutrientes, no maior conteúdo de água. Para o arroz, as maiores RP de 2,83 e 3,53 MPa, para o LVd e LVef, foram benéficas ao acúmulo de nutrientes na parte aérea, no maior conteúdo de água.

Palavras-chave: resistência à penetração, água do solo, nutrientes, *Glycine max*, *Oryza sativa*

INTRODUÇÃO

A cultura da soja e arroz ocupam extensas áreas agrícolas no país, sendo que no ano de 1999 aproximadamente 21% do incremento da produção da soja foi em razão do aumento da produtividade (EMBRAPA, 1999). Desta forma, torna-se cada vez mais importante o estudo dos atributos físicos do solo, especialmente a compactação que tem sido freqüentemente apontada como fator físico limitante ao crescimento das plantas, principalmente em solos mais argilosos (ROSOLEM et al., 1999).

A compactação do solo reduz a porosidade total e a macroporosidade e, aumenta a microporosidade (MEROTTO & MUNDSTOCK, 1999), reduzindo a permeabilidade à água e ao ar, a absorção de água e nutrientes pelas plantas (WOLFE et al., 1995) e, restringido o crescimento radicular, da parte aérea e a produção (GEDIGA, 1991). A compactação reduz a taxa de alongação celular, levando ao aumento no diâmetro da raiz em conseqüência do aumento no diâmetro e número das células em função do comprimento da raiz, assim, reduzindo o volume de solo explorado e absorção de água e nutrientes (BENGOUGH & MULLINS, 1990).

Neste contexto, o valor de resistência do solo à penetração (RP) de 2,0 MPa, considerado como crítico ao crescimento das plantas (NESMITH, 1987), tem sido adotado em trabalhos que avaliam os efeitos prejudiciais da compactação do solo para as culturas.

Redução no conteúdo de nutrientes da parte aérea da soja em decorrência da compactação foram verificadas por BORGES et al. (1988) para P, K, Mg e Ca; DOLAN et al. (1992) para P e K; ROSOLEM et al. (1994a) para N. FERNANDEZ et al. (1995) verificaram que o impedimento mecânico ao crescimento radicular levou a diminuições nas concentrações de N e Mg e, aumentos nas concentrações de P, Ca e K na parte aérea da soja. NOGUEIRA & MANFREDINI (1983) estudando compactação em soja, não verificaram redução na absorção de N, P, K, Ca, Mg e S, em vasos com conteúdo de água não controlado.

Para gramíneas, são escassos os trabalhos que avaliam a influência da compactação na absorção de nutrientes, especialmente para a cultura do arroz de

sequeiro. SILVA et al. (1992) estudando gramíneas forrageiras verificaram que a compactação do solo não induziu alterações nos teores de P, K e Ca na parte aérea das plantas. ROSOLEM et al. (1994b) estudando ampla condição de densidade do solo (1,03-1,72 Mg m⁻³), em Latossolo Vermelho de textura média, não verificaram diferenças na absorção de N, P, K, Ca e Mg na parte aérea de milho. SHIERLAW & ALSTON (1984) também não verificaram diferenças na absorção de fósforo quando a densidade do solo variou de 1,20 a 1,75 Mg m⁻³, em plantas de milho.

Por outro lado, vários pesquisadores afirmam que uma pequena compactação do solo é benéfica por aumentar a área de contato das raízes com o solo (DOLAN et al., 1992; KOPI & DOUGLAS, 1991; SHIERLAW & ALSTON, 1984; STIRZAKER et al., 1996). CORNISH et al. (1984) e VEEN et al. (1992) verificaram incremento na absorção de P e N, respectivamente, e BORGES et al. (1988) verificaram maior absorção de P, K e Mg com uma pequena compactação do solo.

Na literatura encontram-se alguns estudos avaliando a influência de camadas subsuperficiais de solo compactadas na absorção de macronutrientes pelas plantas, no entanto, poucos estudos avaliam a absorção de macro e micronutrientes, por culturas anuais, em solo compactado superficialmente, no qual as plantas de soja suportam menores níveis de compactação do solo (JOHNSON et al., 1990). Com a acentuada expansão do sistema de plantio direto, no qual ocorre a compactação superficial (VOORHEES & LINDSTORM, 1983; SILVA et al., 2000b), torna-se indispensável o conhecimento dos efeitos da compactação no crescimento das culturas. Além disso, a maioria dos trabalhos utilizam a densidade do solo como indicativo do nível de compactação, a qual é um atributo indiretamente relacionado ao crescimento das plantas. Assim, há necessidade de estudos utilizando a RP, que é um atributo diretamente relacionado ao crescimento das plantas (LETEY, 1985) e, que está sendo priorizada em estudos de compactação do solo.

Este estudo teve por objetivo avaliar a influência da compactação e do conteúdo de água de Latossolo Vermelho distrófico e Latossolo Vermelho eutroférico no acúmulo de macro e micronutrientes na parte aérea da soja e arroz.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Universidade Estadual Paulista (UNESP/FCAV), Jaboticabal, SP, utilizando-se Latossolo Vermelho distrófico, típico, textura média, A moderado, caulínítico hipoférrico (LVd), e Latossolo Vermelho eutroférico, típico, textura argilosa, A moderado, caulínítico-oxídico (LVef). Os solos LVd e LVef apresentaram, respectivamente, 271 e 517 g kg⁻¹ de argila, 42 e 256 g kg⁻¹ de silte e 687 e 227 g kg⁻¹ de areia. As amostras dos solos foram coletadas na profundidade de 0,0-0,20 m e passadas em peneira de 0,004 m, e adubadas segundo RAIJ et al. (1996), cuja análise química que seguiu a metodologia de RAIJ et al. (1987). A caracterização química após a adubação é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4. Caracterização química do Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e do Latossolo Vermelho eutroférico (LVef), após a adubação.

	pH (CaCl ₂) 1 : 2,5	Matéria orgânica (g dm ⁻³)	P _{resina} (mg dm ⁻³)	K ----- (mmol _c dm ⁻³)	Ca -----	Mg -----	V (%)
Soja							
LVd	5,7	10	28	2,1	19	13	68
LVef	5,5	37	45	4,1	46	19	67
Arroz							
LVd	5,4	12	26	2,1	16	12	63
LVef	5,3	36	41	4,4	39	18	64

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial com três níveis de compactação e dois conteúdos de água, com três repetições, para cada solo e cultura.

Após a realização da adubação, o solo foi colocado em vaso cilíndrico de PVC com capacidade de 9,82 L (0,20 m de altura e 0,25 m de diâmetro), em camadas de 0,03 m. Cada camada foi compactada em decorrência da queda livre de um êmbolo de 7 kg, da altura de 0,60 m, no centro geométrico de um suporte de madeira com diâmetro ligeiramente inferior ao vaso. Os níveis de compactação foram obtidos por

meio de 0, 5, 11 e 0, 7, 13 impactos por camada de solo, correspondendo aos níveis 1, 2 e 3 de compactação, para o LVd e LVef, respectivamente (Tabela 5).

Tabela 5. Resistência do solo à penetração (RP), nos três níveis de compactação e nas duas tensões de água (MPa), no LVd e LVef, antes do plantio da soja e arroz.

Atributo	LVd		LVef	
	0,05	0,01	0,05	0,01
Soja				
Conteúdo de água (kg kg ⁻¹)	0,12	0,17	0,20	0,27 ⁽¹⁾
RP (MPa)				
Nível de compactação				
1	0,38	0,27	0,64	0,36
2	1,95	1,79	3,37	2,03
3	3,76	2,69	5,84	3,76
Arroz				
Conteúdo de água (kg kg ⁻¹)	0,12	0,17	0,20	0,27 ⁽²⁾
RP (MPa)				
Nível de compactação				
1	0,42	0,25	0,57	0,40
2	1,99	1,79	3,37	1,91
3	3,93	2,83	6,46	3,53

⁽¹⁾ Valor utilizado 0,26 kg kg⁻¹. ⁽²⁾ Valor utilizado 0,28 kg kg⁻¹

Os solos foram compactados no conteúdo de água próximo ao conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa, apresentado na Tabela 5, conteúdo de água em que foi determinada RP na condição de retenção de água na tensão de 0,01 MPa. Para a tensão de 0,05 MPa os vasos foram expostos ao sol até atingir este conteúdo de água que foi utilizada nos tratamentos (Tabela 5) e para determinação da RP nesta condição. A RP foi determinada, antes da semeadura, com o penetrômetro de anel dinamométrico (Solotest 1.210.001), com ângulo de cone de 30°. A leitura foi feita quando a base do cone atingiu a profundidade de 0,03 m, sendo o valor de cada repetição obtido da média de quatro subdeterminações. Utilizou-se cone com diâmetro de 0,0284; 0,022 e 0,012 m, respectivamente, diminuindo o diâmetro do cone com o incremento da compactação do solo. O valor obtido no instrumento de leitura foi transformado em kgf pela equação linear de calibração do aparelho, a seguir:

$$R(kgf) = 1,0444 + 0,2998x$$

em que $R(kgf)$ é a resistência à penetração ((kgf/área cone) * 0,098= MPa) e x é a leitura no instrumento.

Após a compactação, em agosto de 2000 foram semeadas 3 sementes por cova (4 covas vaso⁻¹) de soja (*Glycine max* cv. Embrapa 48) e arroz de sequeiro (*Oryza sativa* cv. IAC 165). Após sete dias realizou-se o desbaste, deixando duas plantas de soja e quatro plantas de arroz por vaso, respectivamente. Nesta data foram aplicados os conteúdos de água, visto que foi necessário aumentar o conteúdo de água no solo para possibilitar a germinação nos vasos mais secos e compactados. O conteúdo de água foi mantido constante, mediante de duas pesagens diárias dos vasos referentes a uma repetição e reposição de água através de tubo de PVC perfurado, instalado no centro geométrico do vaso, sendo feita a pesagem e rodízio de todos vasos a cada cinco dias.

No início do florescimento, aos 54 dias após a semeadura, a parte aérea das plantas foi seccionada próximo a superfície do solo e seca em estufa de circulação forçada de ar a ± 65 °C para determinação da matéria seca. Posteriormente a parte aérea foi moída em moinho Willey para determinação do conteúdo de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn, segundo metodologia citada por BATAGLIA et al. (1983).

A análise estatística dos resultados consistiu da análise da variância e utilização do teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro para comparação das médias.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As produções de matéria seca da parte aérea das culturas de soja e arroz de sequeiro são apresentadas na Tabela 6. No LVd ocorreu a maior produção de matéria seca no segundo nível de RP, nos dois conteúdos de água e nas duas culturas. No LVef ocorreu maior produção de matéria seca no menor nível de compactação, no menor conteúdo de água, e no maior nível de compactação no maior conteúdo de água, para soja e arroz.

Tabela 6. Matéria seca da parte aérea das plantas de soja e arroz em três níveis de resistência do solo à penetração (RP) e duas tensões de água (MPa), no LVd e LVef.

LVd				LVef			
RP (MPa)		Matéria seca (g planta ⁻¹)		RP (MPa)		Matéria seca (g planta ⁻¹)	
0,05	0,01	0,05	0,01	0,05	0,01	0,05	0,01
Soja							
0,38	0,27	8,1 Ab	12,1 Ba	0,64	0,36	4,9 Ab	10,6 Ba
1,95	1,79	8,7 Ab	17,9 Aa	3,37	2,03	1,9 Bb	17,1 Aa
3,76	2,69	4,6 Bb	15,0 ABa	5,84	3,76	1,9 Bb	17,5 Aa
Arroz							
0,42	0,25	3,8 Ba	4,2 Ba	0,57	0,40	2,1Ab	5,6 Ca
1,99	1,79	7,6 Ab	12,7 Aa	3,37	1,91	0,2 Bb	10,2 Ba
3,93	2,83	4,0 Bb	12,2 Aa	6,46	3,53	0,1 Bb	12,5 Aa

Médias não seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, para o mesmo parâmetro da planta, diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Conteúdo total de nutrientes na parte aérea da soja

A conteúdo total de macro e micronutrientes acumulada na parte aérea da soja está apresentada na Tabela 7. No menor conteúdo de água ocorreu menor conteúdo de nutrientes na parte aérea da soja, nos dois solos, condizente com o maior nível de RP e o menor conteúdo de água, fatores que afetam o crescimento radicular e absorção de nutrientes. Neste sentido, JOHNSON et al. (1990) verificaram que a resposta da soja à compactação depende da precipitação pluvial no período de crescimento da planta.

No menor conteúdo de água (conteúdo de água retida na tensão de 0,05 MPa) ocorreu menor conteúdo de P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn, no LVef, a partir do segundo nível de RP de 3,37 MPa e, no LVd ocorreu redução de todos nutrientes a partir do terceiro nível de RP de 3,76 MPa. Apesar do maior conteúdo volumétrico de água, possivelmente o impedimento mecânico restringiu o crescimento radicular e, assim, o suprimento de nutrientes para a parte aérea.

Além do menor crescimento radicular, nesta condição, TARDIEU (1994) argumentou que ocorre uma rápida depleção da água e nutrientes nos poros ocupados pelas raízes, aumentando a RP nas paredes dos poros e a resistência ao fluxo de água e nutrientes em direção as raízes.

Tabela 7. Conteúdo total de nutrientes acumulados na parte aérea da soja, aos 54 dias, em três níveis de compactação e dois conteúdos de água, no LVd e LVef.

Nutriente	Solo	Conteúdo de água (kg kg ⁻¹)	Nível de compactação			CV (%)
			1	2	3	
N (g)	LVd	0,12	0,183 Ba	0,222 Ba	0,142 Bb	15,1
		0,17	0,325 Aa	0,350 Aa	0,249 Ab	
		0,26	0,152 Ab	0,431 Aa	0,389 Aa	
	LVef	0,20	0,104 Aa	0,049 Ba	0,041 Ba	14,9
		0,26	0,152 Ab	0,431 Aa	0,389 Aa	
		0,26	0,152 Ab	0,431 Aa	0,389 Aa	
P (g)	LVd	0,12	0,021 Ba	0,022 Ba	0,013 Bb	12,0
		0,17	0,037 Aa	0,040 Aa	0,027 Ab	
		0,26	0,028 Ab	0,040 Aa	0,040 Aa	
	LVef	0,20	0,010 Ba	0,003 Bb	0,003 Bb	8,6
		0,26	0,028 Ab	0,040 Aa	0,040 Aa	
		0,26	0,028 Ab	0,040 Aa	0,040 Aa	
K (g)	LVd	0,12	0,159 Ba	0,177 Ba	0,107 Bb	12,0
		0,17	0,264 Aa	0,323 Aa	0,227 Ab	
		0,26	0,210 Ab	0,389 Aa	0,373 Aa	
	LVef	0,20	0,122 Ba	0,047 Bb	0,041 Bb	8,6
		0,26	0,210 Ab	0,389 Aa	0,373 Aa	
		0,26	0,210 Ab	0,389 Aa	0,373 Aa	
Ca (g)	LVd	0,12	0,095 Bab	0,102 Ba	0,057 Bb	15,7
		0,17	0,169 Ab	0,225 Aa	0,188 Ab	
		0,26	0,137 Ab	0,206 Aa	0,231 Aa	
	LVef	0,20	0,061 Ba	0,023 Bb	0,022 Bb	12,5
		0,26	0,137 Ab	0,206 Aa	0,231 Aa	
		0,26	0,137 Ab	0,206 Aa	0,231 Aa	
Mg (g)	LVd	0,12	0,040 Bab	0,052 Ba	0,031 Bb	13,3
		0,17	0,067 Ab	0,103 Aa	0,087 Aa	
		0,26	0,049 Ab	0,083 Aa	0,088 Aa	
	LVef	0,20	0,024 Ba	0,009 Bb	0,009 Bb	8,4
		0,26	0,049 Ab	0,083 Aa	0,088 Aa	
		0,26	0,049 Ab	0,083 Aa	0,088 Aa	
S (g)	LVd	0,12	0,017 Bab	0,020 Ba	0,011 Bb	17,8
		0,17	0,031 Aab	0,038 Aa	0,030 Ab	
		0,26	0,025 Ab	0,036 Aa	0,036 Aa	
	LVef	0,20	0,010 Ba	0,004 Bb	0,004 Bb	14,4
		0,26	0,025 Ab	0,036 Aa	0,036 Aa	
		0,26	0,025 Ab	0,036 Aa	0,036 Aa	
B (mg)	LVd	0,12	0,417 Bab	0,429 Ba	0,198 Bb	18,7
		0,17	0,614 Aab	0,762 Aa	0,610 Ab	
		0,26	0,586 Ab	0,785 Aa	0,849 Aa	
	LVef	0,20	0,312 Ba	0,107 Bb	0,108 Bb	16,5
		0,26	0,586 Ab	0,785 Aa	0,849 Aa	
		0,26	0,586 Ab	0,785 Aa	0,849 Aa	
Cu (mg)	LVd	0,12	0,059 Bab	0,066 Ba	0,045 Bb	13,7
		0,17	0,101 Ab	0,143 Aa	0,110 Ab	
		0,26	0,084 Ab	0,193 Aa	0,192 Aa	
	LVef	0,20	0,046 Ba	0,016 Bb	0,014 Bb	8,5
		0,26	0,084 Ab	0,193 Aa	0,192 Aa	
		0,26	0,084 Ab	0,193 Aa	0,192 Aa	
Fe (mg)	LVd	0,12	2,626 Ba	2,288 Bab	1,191 Bb	16,5
		0,17	3,939 Aab	4,848 Aa	3,887 Ab	
		0,26	3,177 Ac	4,908 Ab	6,001 Aa	
	LVef	0,20	1,687 Ba	0,480 Bb	0,586 Bb	17,3
		0,26	3,177 Ac	4,908 Ab	6,001 Aa	
		0,26	3,177 Ac	4,908 Ab	6,001 Aa	
Mn (mg)	LVd	0,12	0,804 Ba	0,703 Ba	0,385 Ba	45,6
		0,17	1,200 Aa	1,170 Aa	1,701 Aa	
		0,26	0,708 Ab	0,966 Aa	0,957 Aa	
	LVef	0,20	0,437 Ba	0,134 Bb	0,133 Bb	11,3
		0,26	0,708 Ab	0,966 Aa	0,957 Aa	
		0,26	0,708 Ab	0,966 Aa	0,957 Aa	
Zn (mg)	LVd	0,12	0,280 Ba	0,337 Ba	0,194 Bb	7,7
		0,17	0,412 Ab	0,555 Aa	0,445 Ab	
		0,26	0,791 Ab	1,086 Aa	1,126 Aa	
	LVef	0,20	0,431 Ba	0,124 Bb	0,120 Bb	6,5
		0,26	0,791 Ab	1,086 Aa	1,126 Aa	
		0,26	0,791 Ab	1,086 Aa	1,126 Aa	

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, para o mesmo solo, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

No conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa houve maior conteúdo de todos os nutrientes no nível de RP de 2,03 e 3,76 MPa, comparado a RP de 0,36 MPa, no LVef. No LVd, ocorreu redução de N, P, K, S, B e Fe, no terceiro nível de RP de 2,69 MPa e para o Ca, Cu e Zn houve maior conteúdo no segundo nível de 1,79 MPa.

BORGES et al. (1988) verificaram maior conteúdo de P, K e Mg na parte aérea da soja quando foi realizada uma pequena compactação em Latossolo Vermelho e, em maiores compactações, redução do conteúdo de P, K, Mg e Ca na parte aérea da soja. DOLAN et al. (1992) verificaram que a compactação subsuperficial do solo reduziu a absorção de P e K e ROSOLEM et al. (1994a), estudando nutrição da soja, verificaram redução apenas na absorção de N na parte aérea da soja, na resistência à penetração de 2,0 MPa, mantendo o conteúdo de água em 80% da porosidade total. FERNANDEZ et al. (1995) verificaram que o impedimento ao crescimento radicular levou a diminuições nas concentrações de N e Mg na planta, e aumentos nas concentrações de P, Ca e K na parte aérea da soja.

No LVef, verificou-se que em solo não compactado o conteúdo de nutrientes foi menor, tendo a compactação efeito benéfico, fato não verificado para a maioria dos nutrientes no LVd. Ainda, o LVef suportou valores muito superiores de RP à penetração sem diminuir o conteúdo de nutrientes na parte aérea, comparado ao LVd. Isto possivelmente deve-se ao maior contato das raízes com o solo com a compactação, no LVef, visto que a porosidade total é superior no LVef ($0,64 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), comparado ao LVd ($0,51 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). O maior teor de óxidos de ferro presentes no LVef conferem uma estrutura granular e mais porosa, apesar do maior conteúdo de argila. Neste sentido, KOPI & DOUGLAS (1991) afirmaram que uma grande área de contato das raízes com o solo, espaço poroso suficiente para o movimento de água e gases e baixa RP para as raízes é a estrutura ideal para o crescimento das plantas.

HIRA & SINGH (1977) verificaram que, além de aumentar o conteúdo de água, ocorreu redução da tortuosidade dos poros, facilitando o processo de difusão e fluxo de nutrientes em direção as raízes, atingindo mais rapidamente os pontos de absorção. SILBERBUSH et al. (1983), verificaram que o aumento da densidade do solo levou a aumento no poder tampão do solo para os nutrientes.

No maior conteúdo de água, além das plantas acumularem maior conteúdo de nutrientes na parte aérea, verificou-se no LVef que a RP de 3,76 MPa foi benéfica e, no menor conteúdo de água, na RP de 3,37 MPa diminuiu o conteúdo de nutrientes, concordando com os estudos de DEXTER (1987), que verificou que em solos mais úmidos, as plantas suportam maior RP.

Conteúdo de nutrientes na parte aérea do arroz

No menor conteúdo de água, ocorreu menor acúmulo de macro e micronutrientes na parte aérea do arroz (Tabela 8), relacionado a maior RP, nos dois solos.

No LVd, no menor conteúdo de água, ocorreu redução no conteúdo de nutrientes no terceiro nível de RP de 3,93 MPa. No LVef, ocorreu a senescência das plantas no solo compactado, quando foram aplicados os conteúdos de água, no menor conteúdo de água.

No maior conteúdo de água, no LVd, com exceção do fósforo que diminui no terceiro nível de compactação de 2,83 MPa, as plantas apresentaram conteúdos superiores de nutrientes no nível de RP de 1,79 e 2,83 MPa, comparado a 0,25 MPa. A redução apenas no conteúdo de fósforo na RP de 2,83 MPa, no LVd, possivelmente deve-se ao dominante mecanismo de difusão responsável pelo transporte do nutriente até as raízes, que é menos eficiente em relação ao mecanismo de fluxo de massa dominante nos demais nutrientes.

No LVef, no maior conteúdo de água, ocorreu incremento na conteúdo de nutrientes acumulados na parte aérea do arroz até o terceiro nível de compactação de 3,53 MPa.

Tabela 8. Conteúdo total de nutrientes acumulados na parte aérea do arroz de sequeiro, aos 54 dias, em três níveis de compactação e dois conteúdos de água.

Nutriente	Solo	Conteúdo de água		Nível de compactação			CV (%)
		(kg kg ⁻¹)		1	2	3	
N (g)	LVd	0,12	0,063 Ac	0,219 Ba	0,128 Bb	15,0	
		0,17	0,062 Ab	0,270 Aa	0,244 Aa		
	LVef	0,20	0,049	--	--	5,4	
		0,28	0,106 c	0,277 b	0,294 a		
P (g)	LVd	0,12	0,013 Bb	0,018 Ba	0,009 Bb	11,6	
		0,17	0,018 Ac	0,028 Aa	0,023 Ab		
	LVef	0,20	0,003	--	--	6,9	
		0,28	0,013 c	0,019 b	0,023 a		
K (g)	LVd	0,12	0,112 Ab	0,261 Ba	0,147 Bb	11,6	
		0,17	0,129 Ab	0,427 Aa	0,410 Aa		
	LVef	0,20	0,065	--	--	8,9	
		0,28	0,167 c	0,386 b	0,461 a		
Ca (g)	LVd	0,12	0,014 Bb	0,024 Ba	0,012 Bb	27,0	
		0,17	0,020 Ab	0,043 Aa	0,038 Aab		
	LVef	0,20	0,006	--	--	26,5	
		0,28	0,015 b	0,032 a	0,032 a		
Mg (g)	LVd	0,12	0,019 Bab	0,031 Ba	0,016 Bb	17,6	
		0,17	0,025 Ab	0,057 Aa	0,053 Aa		
	LVef	0,20	0,005	--	--	7,0	
		0,28	0,018 c	0,026 b	0,030 a		
S (g)	LVd	0,12	0,010 Ab	0,024 Ba	0,014 Bb	15,8	
		0,17	0,012 Ab	0,035 Aa	0,032 Aa		
	LVef	0,20	0,007	--	--	12,9	
		0,28	0,016 c	0,032 b	0,038 a		
B (mg)	LVd	0,12	0,088 Bb	0,154 Ba	0,121 Ba	35,6	
		0,17	0,087 Ab	0,278 Aa	0,290 Aa		
	LVef	0,20	0,069	--	--	28,7	
		0,28	0,146 b	0,208 ab	0,256 a		
Cu (mg)	LVd	0,12	0,044 Bb	0,116 Ba	0,068 Bb	16,1	
		0,17	0,050 Ab	0,165 Aa	0,152 Aa		
	LVef	0,20	0,052	--	--	8,4	
		0,28	0,120 c	0,308 b	0,342 a		
Fe (mg)	LVd	0,12	0,555 Bb	1,327 Ba	0,687 Bb	9,9	
		0,17	0,750 Ab	2,620 Aa	2,467 Aa		
	LVef	0,20	0,427	--	--	26,4	
		0,28	1,062 b	2,628 a	2,475 a		
Mn (mg)	LVd	0,12	0,611 Ba	0,961 Ba	0,463 Ba	71,2	
		0,17	0,671 Aa	2,033 Aa	3,343 Aa		
	LVef	0,20	0,353	--	--	4,6	
		0,28	0,594 c	1,170 b	1,416 a		
Zn (mg)	LVd	0,12	0,227 Bab	0,333 Ba	0,172 Bb	20,4	
		0,17	0,279 Ab	0,588 Aa	0,560 Aa		
	LVef	0,20	0,332	--	--	15,0	
		0,28	0,522 c	0,764 b	0,977 a		

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, para o mesmo solo, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. -- Senescência das plantas quando aplicou-se os conteúdos de água.

SILVA et al. (1992), estudando gramíneas forrageiras verificaram que o impedimento mecânico do solo não induziu alterações nos teores de P, K e Ca na parte aérea das plantas. ROSOLEM et al. (1994b), estudando ampla condição de compactação ($1,03-1,72 \text{ Mg m}^{-3}$), não verificaram diferenças na absorção de N, P, K, Ca e Mg na parte aérea de milho e, SHIERLAW & ALSTON (1984), também não verificaram diferenças na absorção de fósforo quando a densidade do solo variou de $1,20$ a $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$, em plantas de milho.

Para a cultura do arroz verificou-se o efeito benéfico da compactação, no LVd e LVef, no maior conteúdo de água, atribuído ao maior contato das raízes com o solo, segundo HIRA & SINGH (1977) e, possivelmente ao sistema radicular fasciculado da cultura que tem maior facilidade em penetrar em solo compactado e, assim, o maior contato das raízes com o solo facilita a absorção de água e nutrientes, comparado a soja.

CONCLUSÕES

O conteúdo total de macro e micronutrientes acumulados na parte aérea da cultura de soja e arroz foi mais afetada no Latossolo Vermelho distrófico em relação ao Latossolo Vermelho eutrófico, no maior conteúdo de água e no mesmo valor de resistência à penetração.

O valor de resistência à penetração a partir do qual ocorreu redução no conteúdo total de nutrientes na parte aérea da soja e arroz foi superior a $2,0 \text{ MPa}$ e, na condição de solo mais úmido as plantas toleraram maiores níveis de resistência à penetração.

O conteúdo de macro e micronutrientes na parte aérea das culturas foi função da compactação e do conteúdo de água.

CAPÍTULO 4 - EFEITO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO E DO CONTEÚDO DE ÁGUA NA PRODUÇÃO DE SOJA

RESUMO - A compactação do solo tem sido fator físico limitante ao crescimento das plantas. Este trabalho objetivou avaliar a produção de soja (*Glycine max* cv. Embrapa 48) em razão da compactação do solo e do conteúdo de água. Usou-se o delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4 x 2, ou seja, quatro níveis de resistência à penetração (entre 0,27 e 4,32 MPa) e dois níveis de retenção de água pelo solo (0,05 e 0,01 MPa). Foram utilizadas amostras de Latossolo Vermelho, textura média (LVd) e, Latossolo Vermelho, textura argilosa (LVef), coletadas na profundidade de 0,0-0,20 m, passadas em peneira de 0,004 m e compactados em camadas de 0,03 m, em vasos de 0,20 m de altura e 0,25 m de diâmetro (9,82 L). Os níveis de resistência à penetração foram determinados com o penetrômetro de anel dinamométrico. O valor de resistência do solo à penetração a partir do qual ocorreu decréscimo da produção de grãos, foi de 1,66 e 2,22 MPa, no LVd, e 3,05 e 2,81 MPa, no LVef para o conteúdo de água retida nas tensões de 0,05 e 0,01 MPa, respectivamente. A maior produção de grãos foi obtida na tensão de 0,01 MPa. A produção de soja é função da compactação do solo e do conteúdo de água.

Palavras-Chave: resistência à penetração, água do solo, Latossolos, *Glycine max*

INTRODUÇÃO

A soja é uma das principais culturas de grãos do país, ocupando uma área de 15,5 milhões de hectares (AGRIANUAL, 2002). O incremento da produção da cultura está ocorrendo graças ao aumento da produtividade proporcionado pelo manejo racional dos solos e insumos agrícolas e, em menor proporção pelo desmatamento de extensas áreas para fins agrícolas, resultando em menores prejuízos ao meio ambiente (AGRIANUAL, 2002). Neste contexto, a compactação do solo assume destacada importância nas relações físicas, químicas e biológicas do solo, que atuam no crescimento das plantas.

Por estar diretamente relacionado ao crescimento das plantas, a resistência do solo à penetração tem sido o atributo físico priorizado em trabalhos que estudam a compactação (WEAICH et al., 1992; IMHOFF et al., 2000). A resistência à penetração apresenta forte relação com o crescimento radicular das plantas (BENGOUGH & MULLINS, 1990; SMITH et al., 1997; HOAD et al., 2001), no entanto, é acentuadamente influenciada pelo conteúdo de água e pela condição estrutural do solo, o que dificulta a obtenção de valores críticos em relação à produção das culturas (HAMBLIM, 1985; TARDIEU, 1994; UNGER & KASPAR, 1994).

Valores críticos de resistência à penetração variam de 1,5 a 4,0 MPa (NESMITH, 1987; TOPP et al., 1994; ARSHAD et al., 1996; TORMENA et al., 1998; IMHOFF et al., 2000), sendo, em geral, o valor de 2,0 MPa aceito como impeditivo ao crescimento radicular (TORMENA et al., 1998). Em Latossolo Roxo, MIELNICZUK et al. (1985) verificaram, em vasos, menor crescimento da parte aérea de soja em resposta à resistência de 3,03 MPa; e PETER (1990), no campo, verificou em Latossolo menor crescimento radicular de soja a partir de 2,8 MPa.

As plantas apresentam diferentes respostas à resistência do solo à penetração, variando entre culturas e cultivares (MIELNICZUK et al., 1985). As raízes das plantas que crescem em solos com alta resistência à penetração apresentam modificações morfológicas, provocando indução ao decréscimo na divisão celular no meristema e aumento no diâmetro da raiz, resultante do aumento na espessura do córtex, reduzindo

assim a área de solo explorado pelas raízes e a absorção de água e nutrientes (TAYLOR & BRAR, 1991; BENGOUGH et al., 1997). Segundo estes pesquisadores, em condições adversas ao crescimento as raízes enviam sinais a parte aérea informando à planta que as condições para seu funcionamento estão se restringindo e que é necessário reduzir a taxa de crescimento, refletindo em menor produção.

Por outro lado, foi verificado que solos excessivamente porosos são prejudiciais a absorção de água e nutrientes pelas raízes, por causa do menor contato das raízes com o solo, resultando em menor desenvolvimento das plantas (KOOISTRA et al., 1992; HAKANSSON et al., 1998).

A maioria dos estudos com níveis críticos de resistência à penetração avaliam camadas subsuperficiais de solo compactado. Entretanto, segundo JOHNSON et al. (1990) em camadas superficiais compactadas a produção de soja foi menor em 15% em relação a solos compactados subsuperficialmente, na qual apenas ocorreu redução na altura de plantas. Com o aumento gradativo das áreas cultivadas em sistemas com menor revolvimento, denominado de sistema de plantio direto, ocorre a compactação superficial do solo, condição em que existem poucos estudos com níveis críticos de resistência à penetração para produção de grãos de soja. Sabendo-se que a resistência do solo à penetração tem relação inversa com o conteúdo de água e com a produção das culturas, é imprescindível o conhecimento desses níveis críticos, para o manejo adequado e controle da qualidade física do solo, com vistas a maximização da produção da cultura, conforme demonstrado por IMHOFF et al. (2000), por meio da curva de resistência do solo em função do conteúdo de água e da densidade do solo, considerando o nível crítico de resistência à penetração de 2,5 MPa para pastagens.

Este trabalho objetivou avaliar a produção de soja em razão da compactação do solo e do conteúdo de água.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em casa de vegetação da Universidade Estadual Paulista (UNESP/FCAV), Jaboticabal, SP, em Latossolo Vermelho distrófico típico textura média A moderado caulínítico hipoférrico (LVd) e Latossolo Vermelho eutroférrico típico textura argilosa A moderado caulínítico-oxídico (LVef). A composição granulométrica foi determinada em amostras deformadas por meio da dispersão com NaOH ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$) e agitação lenta durante 16 horas e o conteúdo de argila obtido pelo método da pipeta (GEE & BAUDER, 1986). Os solos LVd e LVef apresentaram, respectivamente: 271 e 517 g kg^{-1} de argila, 42 e 256 g kg^{-1} de silte e 687 e 227 g kg^{-1} de areia, e densidade de partículas de 2,82 e 2,98 Mg m^{-3} .

As amostras dos solos foram coletadas na camada de 0,0-0,20 m e passadas em peneira de 0,004 m. Os solos foram adubados segundo RAIJ et al. (1996), cuja análise química foi realizada conforme RAIJ et al. (1987). A caracterização química do solo antes e após a adubação e no momento da colheita é apresentada na Tabela 9.

Tabela 9. Caracterização química do Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e do Latossolo Vermelho eutroférrico (LVef) utilizado para o cultivo de soja, antes e após a realização da adubação, e na colheita.

Solo	pH CaCl ₂	MO (g dm ⁻³)	P _{resina} (mg dm ⁻³)	K ----- (mmol _c dm ⁻³)	Ca ----- (mmol _c dm ⁻³)	Mg -----	V (%)
Antes da adubação							
LVd	5,2	14	18	1,2	14	10	52
LVef	4,8	37	16	1,2	21	10	41
Após a adubação							
LVd	5,5	11	27	2,5	16	13	64
LVef	5,5	42	80	4,8	55	25	71
Após a colheita ⁽¹⁾							
LVd	6,0	10	22	2,1	20	11	67
LVef	5,7	37	56	2,5	55	17	71

⁽¹⁾ Os teores de nutrientes no solo após a colheita estavam no nível médio a alto de acordo com RAIJ et al. (1996).

Após a realização da adubação, foram ajustados os conteúdos de água de 0,11 e 0,14 kg kg⁻¹ no LVd e 0,24 e 0,27 kg kg⁻¹ no LVeF, correspondentes aos conteúdos de água retida nas tensões de 0,05 e 0,01 MPa, respectivamente, os quais foram determinados previamente em câmaras de Richards, em amostras indeformadas (KLUTE, 1986). Em seguida, o solo foi colocado em vaso cilíndrico de PVC com capacidade de 9,82 L (0,20 m de altura e 0,25 m de diâmetro), em camadas de 0,03 m. Cada camada foi compactada em decorrência da queda livre de um êmbolo de 7 kg, da altura de 0,60 m, no centro geométrico de um suporte de madeira com diâmetro ligeiramente inferior ao vaso, semelhante ao descrito por MORAES et al. (1991). Foram estabelecidos quatro níveis de resistência do solo à penetração.

A resistência à penetração foi determinada com o penetrômetro de anel dinamométrico (Solotest 1.210.001), com ângulo de cone de 30°. As leituras foram realizadas quando a base do cone atingiu a profundidade de 0,03 m a partir da superfície do solo, e o valor de cada repetição foi obtido da média de quatro subdeterminações. Foram utilizados cones com diâmetro de 0,0284; 0,022; 0,0120 e 0,006 m, respectivamente, diminuindo a área do cone com o incremento da compactação do solo.

Em novembro de 2001, foram semeadas três sementes inoculadas por cova (4 covas vaso⁻¹) de soja (*Glycine max* cv. Embrapa 48), em 2001. Após sete dias, realizou-se o desbaste, deixando duas plantas de soja por vaso, respectivamente. Nesta data foram aplicados os respectivos conteúdos de água, visto que foi necessário aumentar o conteúdo de água no solo para possibilitar a germinação nos vasos mais secos e compactados. O conteúdo de água foi mantido constante, mediante duas pesagens diárias dos vasos referentes a uma repetição e reposição de água através de tubo de PVC perfurado, instalado no centro geométrico do vaso; a pesagem e rodízio dos vasos foi feita a cada cinco dias.

Foram avaliados a altura das plantas, altura da inserção da primeira vagem, vagens planta⁻¹, grãos vagem⁻¹, grãos planta⁻¹, peso de 100 sementes, produção de grãos planta⁻¹, de matéria seca da parte aérea e das raízes. O conteúdo de água dos grãos foi ajustado a 0,12 kg kg⁻¹ pela fórmula:

$$P = P_i * ((100 - U_i)/(100 - U_f))$$

em que P é a produção final com 0,12 kg kg⁻¹ de água, P_i é a produção inicial, U_i é o conteúdo de água inicial e U_f é o conteúdo de água final de 0,12 kg kg⁻¹.

Os tratamentos consistiram de quatro níveis de resistência à penetração e dois conteúdos de água, constituindo um experimento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4 x 2, com três repetições, para cada solo. Foram realizadas análises de variância, comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e, regressão entre a resistência à penetração e produção de matéria seca da parte aérea, das raízes e de grãos. A análise estatística do número de vagens planta⁻¹, grãos vagem⁻¹ e grãos planta⁻¹ foi realizada com os dados transformados em \sqrt{x} .

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A altura das plantas, o número de vagens e grãos por planta foram, em geral, superiores nos dois solos, na tensão de 0,01 MPa (Tabela 10). A altura das plantas e a distância do solo até a inserção da primeira vagem, características importantes quando a colheita é realizada mecanicamente, foram pouco alterados entre os níveis de resistência do solo à penetração. Já, o número de vagens por planta foi menor, no LVd, na resistência à penetração de 4,18 e 3,58 MPa, nas tensões de 0,05 e 0,01 MPa, respectivamente, e no LVef foi menor a partir de 2,54 MPa, na tensão de 0,01 MPa.

A produção de matéria seca da parte aérea, das raízes e de grãos foi maior na tensão de 0,01 MPa, comparado a 0,05 MPa (Figura 2). TARDIEU (1994) e UNGER & KASPAR (1994) também verificaram que num mesmo nível de resistência à penetração os efeitos da resistência são menos pronunciados em condições de maior conteúdo de água. Isto deve-se a maior disponibilidade de água e nutrientes às plantas nestas condições.

Tabela 10. Componentes de desenvolvimento de soja em razão de níveis de resistência do solo à penetração e de conteúdos de água retida nas tensões de 0,05 MPa (0,11 kg kg⁻¹) e 0,01 MPa (0,14 kg kg⁻¹) no Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e de 0,05 MPa (0,24 kg kg⁻¹) e 0,01 MPa (0,27 kg kg⁻¹) no Latossolo Vermelho eutroférico (LVef).

Resistência à penetração (MPa)	Altura da planta ----- (cm)	Altura da vagem ⁽¹⁾ -----	Vagens planta ⁻¹ -----	Grãos vagem ⁻¹ ----- (nº)	Grãos planta ⁻¹ -----	Peso de 100 sementes (g)
LVd						
Tensão de 0,05 MPa						
0,27	50,83 Aa	9,92 Aa	19,50 Ab	2,07 Aa	40,33 Ab	13,38 Bb
2,04	37,00 ABb	8,08 Aa	23,17 Ab	1,86 Aa	43,00 Ab	13,36 Ba
2,75	35,33 ABb	7,57 Aa	23,17 Ab	1,84 Aa	42,67 Ab	13,46 Bb
4,18	31,00 Bb	10,83 Aa	10,83 Bb	1,80 Aa	19,33 Bb	16,70 Aa
Tensão de 0,01 MPa						
0,31	56,33 Aa	9,50 Aa	31,50 Ca	1,89 Aa	59,67 Ca	14,79 Aa
1,79	55,17 Aa	8,83 Aa	51,33 Aa	1,91 Aa	98,33 Aa	13,87 Aa
2,32	52,83 Aa	9,58 Aa	46,83 Aa	1,93 Aa	90,50 Aa	14,89 Aa
3,58	52,50 Aa	8,33 Aa	38,00 Ba	1,98 Aa	75,17 Ba	15,01 Ab
CV (%)	18,12	19,27	3,36	2,76	3,53	7,32
LVef						
Tensão de 0,05 MPa						
0,43	42,33 Ab	10,17 Aa	12,83 Bb	1,95 Aa	24,83 Cb	14,51 Aa
2,52	55,50 Aa	9,63 Aa	37,83 Ab	1,94 Aa	73,67 Ab	16,32 Aa
3,83	52,33 Aa	8,33 Aa	37,00 Ab	1,89 Aa	70,00 ABb	16,05 Aa
4,32	51,42 Aa	8,83 Aa	32,33 Ab	1,90 Aa	61,33 Bb	17,01 Aa
Tensão de 0,01 MPa						
0,27	61,17 Aa	9,58 Aa	32,50 Ca	1,89 Aa	61,50 Ba	15,05 Aa
1,78	64,83 Aa	9,08 Aa	64,33 Aa	1,88 Aa	120,67 Aa	15,51 Aa
2,54	59,17 Aa	8,17 Aa	60,67 Ba	1,91 Aa	115,67 Aa	15,20 Aa
4,03	56,83 Aa	8,08 Aa	59,83 Ba	1,92 Aa	114,83 Aa	14,69 Ab
CV (%)	12,2	11,95	3,79	4,02	4,61	5,3

Médias, na coluna, seguidas pela mesma letra maiúscula na mesma tensão e minúscula entre tensões, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ⁽¹⁾ Distância do solo até a inserção da primeira vagem.

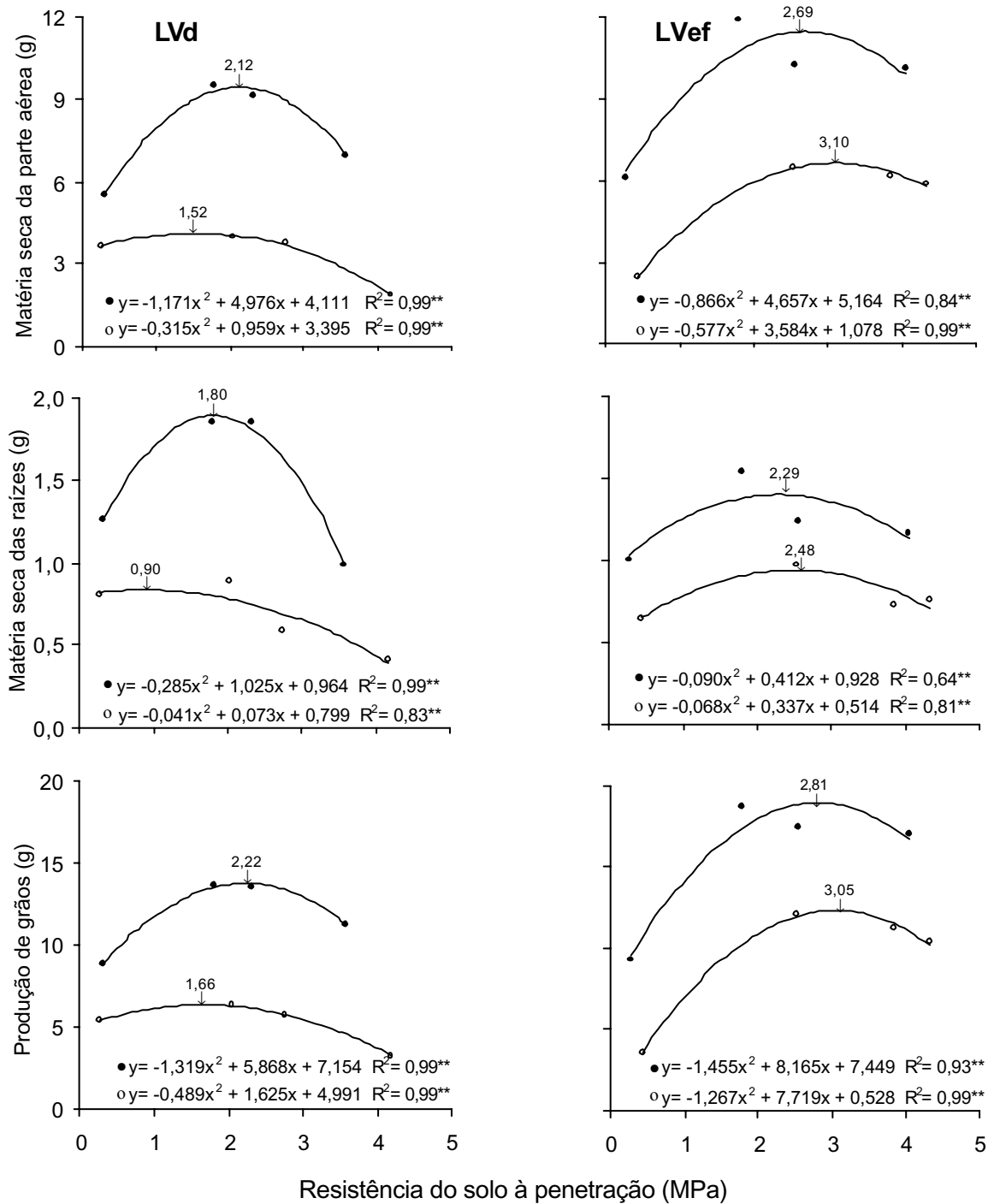


Figura 2. Produção de matéria seca da parte aérea e das raízes e produção de grãos de soja por planta, em diferentes níveis de resistência do solo à penetração, no conteúdo de água ($0,11 \text{ kg kg}^{-1}$; $0,24 \text{ kg kg}^{-1}$) retida na tensão de $0,05 \text{ MPa}$ (o) e conteúdo de água ($0,14 \text{ kg kg}^{-1}$; $0,27 \text{ kg kg}^{-1}$) retida na tensão de $0,01 \text{ MPa}$ (●), no Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e no Latossolo Vermelho eutrófico (LVef), respectivamente.

Segundo NOVAIS & SMYTH (1999), em condição de maior conteúdo de água, além da maior disponibilidade de água no solo, o filme de água das partículas sólidas fica mais espesso, diminuindo a interação íon-colóide, aumentando a quantidade de nutrientes na solução do solo e, ocorre maior difusão dos nutrientes no solo, como o fósforo que, segundo FERNANDEZ et al. (1995), é o nutriente mais limitante em oxissolos.

A menor produção no menor nível de resistência à penetração ocorreu na condição de solo solto, apesar de “in situ” o sistema radicular estar distribuído em todo o solo do vaso (Figura 2). HAKANSSON et al. (1998) verificaram que solos excessivamente soltos apresentam menores produções por causa do menor contato das raízes com o solo que diminuí a habilidade do sistema radicular em absorver quantidades adequadas de água e nutrientes.

As menores produções foram obtidas na condição de solo extremamente solto, que foi mantida durante o ciclo da cultura por causa da adição de água no centro do vaso através de tubo de PVC perfurado. Esta condição física a nível de campo se desfaz após as primeiras chuvas depois do preparo do solo, quando ocorre o rearranjo das partículas de solo e aumento da densidade. Assim, foi enfatizado o nível a partir do qual ocorre redução da produção de grãos de soja, denominado nível crítico.

Houve redução da produção de matéria seca das raízes nos menores níveis de resistência à penetração em relação a produção de matéria seca da parte aérea que foram próximos a da produção de grãos (Figura 2). Assim, fica demonstrado que inicialmente ocorre redução da produção da matéria seca das raízes que não necessariamente causa redução na produção da matéria seca e de grãos. TAYLOR & BRAR (1991) também constataram que muitas vezes ocorrem mudanças e redução no comprimento radicular, porém este mantém satisfatoriamente o suprimento de água e nutrientes para a parte aérea, não refletindo em menor produção.

Entretanto, a excessiva redução da matéria seca do sistema radicular em consequência da alta resistência do solo à penetração resultou em menor produção de matéria seca da parte aérea e de grãos (Figura 2). “In situ” ocorreu decréscimo gradual

do sistema radicular das plantas com o incremento da resistência à penetração, partindo do vaso totalmente utilizado pelas raízes na condição de solo solto até a concentração de raízes na camada superficial de 0,05 m na condição de maior compactação.

Isto ocorreu, segundo HOAD et al. (2001) por causa do menor comprimento e maior espessura radicular que diminui a área de contato das raízes com o solo e, ainda, por estas possuírem menor resistência de transporte no xilema em relação as raízes mais finas. Assim, diminui a absorção de nutrientes por causa da baixa taxa de difusão de alguns nutrientes como o P que é crucial ao desenvolvimento radicular e que é aproveitado apenas quando se encontra até 0,001 m da raiz (HOAD et al., 2001). De fato, BORGES et al. (1988) verificaram sintomas de deficiência de P e K nas folhas de soja a medida que aumentou a compactação.

Outro aspecto, são os valores próximos de resistência à penetração em que ocorreu redução da produção da matéria seca da parte aérea em relação a produção de grãos, nos dois solos, indicando que a redução da matéria seca da parte aérea se refletiu diretamente na produção de grãos de soja.

Houve redução na produção de grãos a partir do segundo e terceiro nível de resistência à penetração e, o teor de nutrientes no solo, após a colheita, foi semelhante entre os níveis de resistência à penetração (Figura 2). Possivelmente a quantidade diferenciada de nutrientes absorvidos pelas plantas não foi verificado por meio da análise química por causa do considerável volume de solo de 9,82 L.

No LVd o limite crítico de resistência à penetração em relação a produção de grãos de soja foi de 1,66 MPa e 2,22 MPa, e da matéria seca das raízes foi de 0,90 e 1,80 MPa, nas tensões de 0,05 e 0,01 MPa, respectivamente (Figura 2). Esses níveis são inferiores aos aceitos como impeditivos ao crescimento radicular de 2,0 MPa (TORMENA et al., 1998). Entretanto, a redução da produção é muito pequena quando é considerado o nível de 2,22 MPa ao invés de 1,66 MPa na tensão de 0,05 MPa, sendo o conteúdo de água do solo mais importante na produção. Desta forma pode ser adotado o valor de 2,22 MPa como crítico para a produção da soja neste solo.

No LVef, foram obtidas maiores produções em relação ao LVd (Figura 2), condizente com os maiores teores de P, K, Ca e Mg no solo (Tabela 9), corroborando os estudos de TU & TAN (1991) que atribuíram a maior produção das plantas em solo argiloso, no mesmo nível de compactação, ao maior teor de nutrientes e matéria orgânica em relação ao solo arenoso.

Os níveis de resistência à penetração críticos, no LVef, em relação a produção de grãos foi de 3,05 e 2,81 MPa, e da matéria seca da parte aérea foi 3,10 e 2,69 MPa, nas tensões de 0,05 e 0,01 MPa, respectivamente (Figura 2). MIELNICZUK et al. (1985) também verificaram que a produção de matéria seca da parte aérea de soja foi menor em 3,03 MPa, em Latossolo Roxo, no conteúdo de água de 0,28 kg kg⁻¹.

No LVef as plantas de soja suportaram maiores níveis de resistência à penetração em relação ao LVd indicando a importância da estrutura do solo, conforme mencionado por HAMBLIM (1985). Os maiores valores críticos de resistência à penetração em relação a produção de grãos, no LVef, devem-se a maior porosidade deste solo, conforme verificado por BEUTLER et al. (2002). Por sua vez a maior porosidade deve-se à mineralogia oxidica deste solo que condiciona uma estrutura maciça porosa "in situ" (FERREIRA et al., 1999). Assim, quando há maior resistência à penetração, ocorre maior contato das raízes com o solo, o que favorece a absorção de água e nutrientes por unidade de raiz (HAKANSSON et al., 1998), do LVef em relação ao LVd que possui mineralogia caulinitica com aspecto maciço coeso e menos poroso.

CONCLUSÕES

A excessiva compactação do solo reduz o crescimento radicular, seguido da parte aérea e da produção de grãos.

O nível de resistência do solo à penetração a partir da qual a produção de grãos de soja decresce é de 2,22 e 2,81 MPa, para o Latossolo Vermelho caulínico e oxidico, respectivamente, no conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa.

CAPÍTULO 5 – EFEITO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO E DO CONTEÚDO DE ÁGUA NA PRODUÇÃO DE ARROZ DE SEQUEIRO

RESUMO - Este trabalho objetivou avaliar o efeito da compactação e do conteúdo de água na produção de arroz de sequeiro (*Oryza sativa* cv. IAC 165). Foram utilizadas amostras de Latossolo Vermelho, textura média (LVd) e, Latossolo Vermelho, textura argilosa (LVef), coletadas na profundidade de 0,00-0,20 m, passadas em peneira de 0,004 m e compactados em camadas de 0,03 m, em vasos de 0,20 m de altura e 0,25 m de diâmetro (9,82 L). Estabeleceram-se quatro níveis de compactação e dois conteúdos de água (conteúdo de água retida nas tensões de 0,05 e 0,01 MPa). A compactação foi avaliada por meio da resistência do solo à penetração determinada com o penetrômetro de anel dinamométrico. Utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4 x 2, com três repetições. No conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa, o valor de resistência do solo à penetração a partir do qual a produtividade de grãos de arroz de sequeiro decresceu foi de 2,38 e 2,07 MPa, respectivamente, para o LVd e LVef. No conteúdo de água retida na tensão de 0,05 MPa foram obtidas maiores produções no menor nível de resistência à penetração. O arroz de sequeiro foi menos produtivo no conteúdo de água retida na tensão de 0,05 MPa.

Palavras-Chave: resistência à penetração, água do solo, Latossolos, *Oryza sativa*

INTRODUÇÃO

O arroz de sequeiro é cultivado predominantemente nos cerrados, sendo a área de cultivo incrementada anualmente. Isto ocorre graças a criação de novas cultivares com produtividade mais estável e melhor qualidade dos grãos, e a geração de tecnologias na área de herbicidas e máquinas agrícolas, que tornaram o cultivo de arroz de sequeiro uma atividade mais rentável. Ainda, o aumento das áreas com sistema de plantio direto (SPD) e o baixo custo comercial do milho utilizado na rotação com a soja em plantio direto, tem estimulado o seu cultivo como alternativa para rotação de culturas, situação em que, sob condições de irrigação por aspersão, são obtidas produtividades acima de $4,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ (MOURA NETO, 2001).

O cultivo de arroz de sequeiro em SPD é incipiente e promissor, sendo a compactação do solo o principal fator físico limitante ao crescimento radicular e a produtividade (MOURA NETO, 2001). GUIMARÃES & MOREIRA (2001) verificaram menores produções de matéria seca de arroz da cultivar Caiapó e Corad L-141, em casa-de-vegetação, a partir da densidade do solo de $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$, em Latossolo Vermelho de textura média mantido no conteúdo de água retida em tensão inferior $0,035 \text{ MPa}$.

A compactação do solo provoca modificações na estrutura, caracterizadas pela redução da porosidade total e da macroporosidade, e aumento da microporosidade. Esta é comumente avaliada por meio da resistência do solo à penetração (RP) por causa da sua boa correlação com o crescimento radicular e a produtividade das plantas (HOAD et al., 2001), no entanto, é influenciada pelo conteúdo de água e pela condição estrutural do solo (HAMBLIM, 1985; TARDIEU, 1994).

O impedimento mecânico do solo provoca redução do comprimento e maior espessura das raízes, refletindo em menor produção de matéria seca da parte aérea e de grãos, em consequência ao inadequado suprimento de água e nutrientes à parte aérea (ATWELL, 1990a). A redução no comprimento radicular diminui o volume de solo explorado pelas raízes, podendo reduzir a absorção de P que é pouco móvel no solo e transportado tipicamente por difusão e de potássio com predomínio da difusão sobre o

fluxo de massa (DOLAN et al., 1992; NOVAIS & SMYTH, 1999). Além disso, ATWEEL (1990b) argumenta que o carbono alocado para a parte aérea é reduzido em condições de altas compactações por causa da maior necessidade de carboidratos às raízes.

Da mesma forma que solos excessivamente compactados são prejudiciais ao desenvolvimento das plantas, em solos muito porosos o crescimento radicular pode não ser afetado, mas o menor contato das raízes com o solo impossibilita o adequado suprimento de água e nutrientes à parte aérea, resultando em menor desenvolvimento e produtividade das plantas (DEXTER, 1987; KOPI & DOUGLAS, 1991; HAKANSSON et al., 1998). Neste sentido, STIRZAKER et al. (1996) verificaram, em casa-de-vegetação, que a densidade do solo intermediária proporcionou maior crescimento de cevada e que em condições de menor conteúdo de água do solo menores valores de densidade foram mais propícios ao crescimento da cultura.

Valores críticos de RP variam de 1,5 a 4,0 MPa (TOPP et al., 1994; ARSHAD et al., 1996; ROSOLEM et al., 1999), sendo o valor de 2,0 MPa aceito como crítico ao crescimento radicular (TORMENA et al., 1998). Valores entre 2,0 e 3,0 MPa são considerados críticos ao desenvolvimento radicular de trigo, milho e pastagem (IMHOFF et al., 2000). MIELNICZUK et al. (1985) verificaram, em Latossolo Roxo em casa-de-vegetação, menor produção de matéria seca da parte aérea de aveia e trigo na RP de 3,03 MPa e milheto em 2,35 MPa, no conteúdo de água de 0,28 kg kg⁻¹.

Estudos como os de ROSOLEM et al. (1999), demonstram que a compactação é mais freqüente e prejudicial em Latossolos, que são os principais solos do Brasil utilizadas para culturas anuais.

Este estudo objetivou determinar o efeito da compactação e do conteúdo de água na produtividade de grãos de arroz de sequeiro em um Latossolo Vermelho de textura média e um Latossolo Vermelho argiloso.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Universidade Estadual Paulista (UNESP/FCAV), Jaboticabal, SP, em Latossolo Vermelho distrófico típico textura média A moderado caulínítico hipoférrico (LVd), e Latossolo Vermelho eutroférico típico textura argilosa A moderado caulínítico-oxídico (LVef). A composição granulométrica foi determinada em amostras deformadas por meio da dispersão com NaOH ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$) e agitação lenta durante 16 horas, sendo o conteúdo de argila obtido pelo método da pipeta (GEE & BAUDER, 1986). Os solos LVd e LVef apresentaram, respectivamente: 271 e 517 g kg^{-1} de argila, 42 e 256 g kg^{-1} de silte e 687 e 227 g kg^{-1} de areia, e densidade de partículas de 2,82 e 2,98 Mg m^{-3} .

As amostras dos solos foram coletadas na camada de 0,0-0,20 m e passadas em peneira de 0,004 m. O solo utilizado para cada cultura foi adubado segundo RAIJ et al. (1996), sendo utilizado em um m^3 de solo a adubação referente a 5 m^2 no campo, cuja análise química seguiu a metodologia de RAIJ et al. (1987).

Após a adubação, foram ajustados os conteúdos de água de 0,11 e 0,14 kg kg^{-1} no LVd e 0,24 e 0,27 kg kg^{-1} no LVef, correspondentes aos conteúdos de água retida nas tensões de 0,05 e 0,01 MPa, respectivamente. Estes conteúdos de água foram determinados previamente em câmaras de Richards (KLUTE, 1986), usando amostras indeformadas coletadas em vasos referentes a uma repetição dos tratamentos utilizado apenas para análises físicas. Em seguida, o solo foi colocado em vaso cilíndrico de PVC com capacidade de 9,82 L (0,20 m de altura e 0,25 m de diâmetro), em camadas de 0,03 m. Cada camada foi compactada em decorrência da queda livre de um êmbolo de 7 kg, da altura de 0,60 m, no centro geométrico de um suporte de madeira com diâmetro ligeiramente inferior ao vaso, semelhante ao descrito por MORAES et al. (1991). Foram estabelecidos quatro níveis de resistência do solo à penetração (RP).

A RP foi determinada com o penetrômetro de anel dinamométrico (Solotest 1.210.001), com ângulo de cone de 30° recomendado pela ASAE (1976). As leituras foram realizadas quando a base do cone atingiu a profundidade de 0,03 m, e o valor de cada repetição foi obtido da média de quatro subdeterminações. Foram utilizados cones

cones com diâmetro de 0,0284; 0,022; 0,0120 e 0,006 m, respectivamente, diminuindo a área do cone com o incremento da compactação do solo.

Após a compactação, foram semeadas três sementes por cova (4 covas vaso⁻¹) de arroz (*Oryza sativa* cv. IAC 165), em 2001. Após sete dias, realizou-se o desbaste, deixando quatro plantas de arroz por vaso, respectivamente. Nesta data foram aplicados os respectivos conteúdos de água, visto que foi necessário aumentar o conteúdo de água no solo para possibilitar a germinação nos vasos mais secos e compactados. Aos 30 dias foi realizada adubação de cobertura com uréia. O conteúdo de água no solo foi mantido constante, mediante duas pesagens diárias dos vasos referentes a uma repetição e reposição de água através de tubo de PVC perfurado, instalado no centro geométrico do vaso, sendo feita a pesagem e rodízio de todos vasos a cada cinco dias.

Foram avaliadas a altura, perfilhos planta⁻¹, cachos planta⁻¹, grãos cacho⁻¹, grãos cheios e grãos vazios, massa de 100 sementes, produtividade de grãos, produção de matéria seca da parte aérea e das raízes. O conteúdo de água dos grãos foi ajustado a 0,12 kg kg⁻¹ pela fórmula a seguir:

$$P = P_i * ((100 - U_i)/(100 - U_f))$$

em que P é a produtividade final com 0,12 kg kg⁻¹ de água, P_i é a produtividade inicial, U_i é o conteúdo de água inicial e U_f é o conteúdo de água final de 0,12 kg kg⁻¹.

Os tratamentos consistiram de quatro níveis de RP e dois conteúdos de água, constituindo um experimento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4 x 2, com três repetições, para cada solo. Foram realizadas análises de variância, comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro e, regressão entre a RP e produção matéria seca da parte aérea, das raízes e de grãos. A análise estatística do número de perfilhos planta⁻¹, cachos planta⁻¹, grãos cacho⁻¹, grãos cheios e vazios por planta foi realizada com dados transformados por \sqrt{x} .

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A altura de plantas, o número de perfilhos, cachos, grãos por cacho e o peso de 100 sementes de arroz, no maior conteúdo de água (Tabela 11), demonstram efeito benéfico de uma pequena compactação do solo, nos dois solos. Entretanto, no menor conteúdo de água, os componentes de produção demonstram que a compactação foi prejudicial ao desenvolvimento da cultura, nos dois solos. STIRZAKER et al. (1996) obtiveram resultados semelhantes em cevada cultivada em casa-de-vegetação. Estes autores verificaram que em maiores conteúdos de água a densidade do solo intermediária proporcionou maior desenvolvimento de cevada e que, em solos mais secos, a menor densidade do solo foi mais favorável ao desenvolvimento da cultura.

A análise estatística revelou interação significativa entre a RP e o conteúdo de água gravimétrico, demonstrando valores superiores dos componentes de desenvolvimento do arroz, principalmente o número de cachos e de grãos cheios, responsáveis por maior produtividade (MOURA NETO, 2001), no maior conteúdo de água. Estudos com milho demonstraram que o conteúdo de água no solo é o principal fator que afeta a taxa de crescimento das raízes (MACKAY & BARBER, 1985). Estes autores obtiveram maior comprimento radicular quando o conteúdo de água aumentou de 0,22 a 0,27 m³ m⁻³.

Na Figura 3, para o LVd e LVef, observa-se menores produções de matéria seca das raízes e da parte aérea, no menor nível de RP, nos dois conteúdos de água, exceto para a matéria seca das raízes no maior conteúdo de água no LVd. Entretanto, no menor conteúdo de água, a produtividade de grãos foi superior no menor nível de RP, mesmo com o solo extremamente poroso, ao passo que as raízes não conseguiram ancorar-se no solo (Figura 3). Isto possivelmente está relacionado ao maior comprimento e melhor distribuição espacial das raízes no solo que favorece maior absorção de água e nutrientes, conforme mencionado por TARDIEU (1988). Este autor afirma que a absorção de água pelas raízes ocorre em um raio médio de 0,02 m.

Tabela 11. Componentes de desenvolvimento de arroz de sequeiro em razão de níveis de resistência à penetração e de conteúdos de água retida nas tensões de 0,05 MPa (0,11 kg kg⁻¹) e 0,01 MPa (0,14 kg kg⁻¹) no Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e de 0,05 MPa (0,24 kg kg⁻¹) e 0,01 MPa (0,27 kg kg⁻¹) no Latossolo Vermelho eutrófico (LVef).

Resistência à penetração (MPa)	Altura planta ⁻¹ (cm)	Perfilhos planta ⁻¹	Cachos planta ⁻¹	Grãos cacho ⁻¹	Grãos cheios planta ⁻¹	Grãos planta ⁻¹	Peso de 100 sementes (g)
----- (nº) -----							
LVd							
Tensão de 0,05 MPa							
0,27	18,42 Cb	0,58 Bb	1,04 Bb	72,78 Aa	48,25 Ab	27,08 Bb	2,94 Aa
2,04	27,50 Ab	1,50 Ab	2,50 Ab	63,22 Aba	29,92 ABb	127,33 Aa	1,08 Bb
2,75	26,58 Ab	1,50 Ab	2,42 Ab	55,35 Aba	15,08 BCb	118,75 Aa	0,80 Bb
4,18	23,58 Bb	1,25 Ab	2,17 Ab	46,17 Bb	8,17 Cb	91,83 Aa	0,78 Bb
Tensão de 0,01 MPa							
0,31	28,33 Ba	2,25 Ba	3,17 Ba	54,79 Bb	81,25 Ba	91,25 Aa	1,89 Bb
1,79	31,67 Aa	2,25 Ba	3,17 ABa	73,29 Aa	155,42 Aa	75,92 Ab	2,67 Aa
2,32	32,50 Aa	3,50 Aa	3,92 Aa	53,72 Ba	131,42 Aa	78,92 Ab	2,51 Aa
3,58	32,42 Aa	2,92 Aba	3,58 Ba	58,93 Ba	130,25 Aa	79,50 Aa	2,43 Aa
CV (%)	3,62	8,18	4,02	3,41	7,97	8,99	11,57
LVef							
Tensão de 0,05 MPa							
0,43	26,17 Bb	2,17 Aa	2,50 Bb	56,78 Aa	37,00 Ab	104,00 Bb	1,27 Aa
2,52	32,50 Ab	2,08 Ab	3,08 Ab	60,41 Ab	4,17 Bb	181,75 Ab	0,56 Bb
3,83	31,75 Ab	2,33 Ab	3,33 Ab	56,77 Aa	3,42 Bb	185,58 Ab	0,53 Bb
4,32	30,50 Ab	2,00 Ab	3,00 Ab	63,97 Ab	2,25 Bb	189,67 Ab	0,46 Bb
Tensão de 0,01 MPa							
0,27	30,25 Ba	2,58 Ca	3,17 Ba	69,01 Aa	64,33 Aa	154,08 Ba	1,40 Aa
1,78	35,58 Aa	4,83 Aa	5,50 Aa	65,15 Aa	80,33 Aa	274,42 Aa	1,25 Aa
2,54	35,00 Aa	3,92 ABa	4,75 Aa	77,45 Aa	50,67 Aa	315,67 Aa	1,08 Aa
4,03	34,58 Aa	3,75 Ba	4,67 Aa	70,32 Aa	35,92 Aa	291,33 Aa	0,89 Aa
CV (%)	2,78	6,41	3,60	5,22	22,89	3,43	18,83

Médias, na coluna, seguidas pela mesma letra maiúscula na mesma tensão e minúscula entre tensões, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

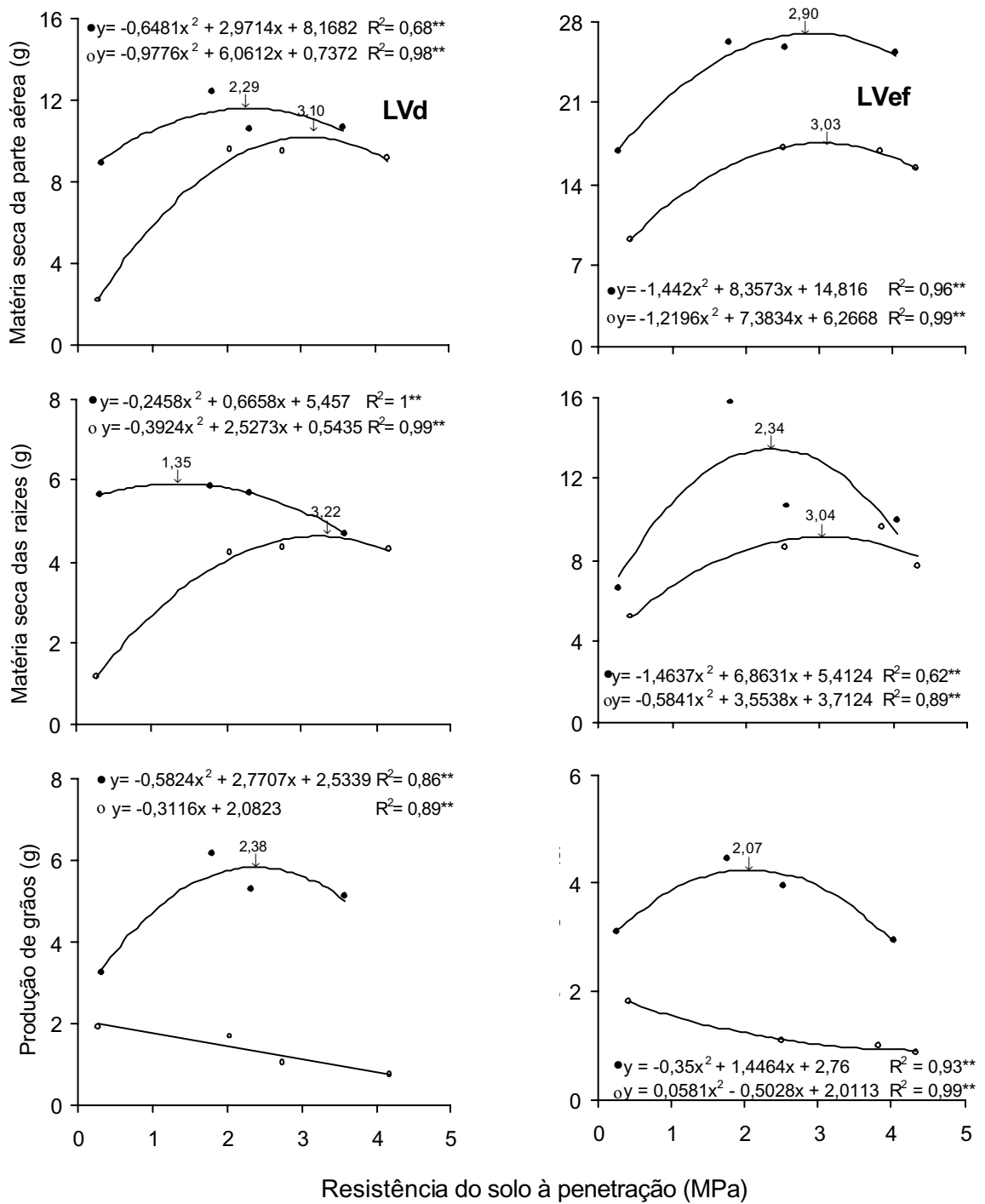


Figura 3. Produção de matéria seca da parte aérea e das raízes e produção de grãos de arroz de sequeiro por planta, em diferentes níveis de resistência do solo à penetração, no conteúdo de água ($0,11 \text{ kg kg}^{-1}$; $0,24 \text{ kg kg}^{-1}$) retida na tensão de $0,05 \text{ MPa}$ (○) e conteúdo de água ($0,14 \text{ kg kg}^{-1}$; $0,27 \text{ kg kg}^{-1}$) retida na tensão de $0,01 \text{ MPa}$ (●), no Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e no Latossolo Vermelho eutrófico (LVef), respectivamente.

STIRZAKER et al. (1996) verificaram, em casa-de-vegetação, maior desenvolvimento de cevada no menor nível de densidade do solo, em condição de menor conteúdo de água. Neste sentido, DEXTER (1987) afirma que o crescimento pode ser inibido na RP de 1,0 MPa em solo seco, no entanto, em solo úmido pode haver crescimento em valores de RP superiores a 4,0 MPa.

Maiores produções de matéria seca das raízes, da parte aérea e de grãos de arroz foram observadas no maior conteúdo de água no solo (Figura 3). MACKAY & BARBER (1985) e TARDIEU (1994) verificaram que o conteúdo de água no solo é o principal determinante do crescimento de plantas; NOVAIS & SMYTH (1999) afirmaram que aumentando o conteúdo de água no solo diminui a interação íon-colóide, aumentando a disponibilidade e a difusão de nutrientes na solução do solo, especialmente o fósforo que é fortemente fixado em oxissolos.

Ainda, no maior conteúdo de água, verificou-se que uma pequena compactação de 1,79 MPa foi benéfica a produtividade, corroborando os estudos de STIRZAKER et al. (1996), em casa-de-vegetação. Isto ocorre graças ao aumento da quantidade de partículas de solo explorado pelas raízes, e um contato mais íntimo entre o solo, a solução e as raízes, fazendo com que os nutrientes atinjam mais rapidamente os pontos de absorção. Neste contexto, KOPI & DOUGLAS (1991) afirmaram que uma grande área de contato das raízes com o solo, espaço poroso suficiente para o movimento de água e gases e baixa RP às raízes seria a estrutura do solo ideal ao crescimento das plantas.

Visto que a condição de solo solto se desfaz, no campo, logo após as primeiras chuvas, será enfatizado o nível de RP a partir do qual ocorre redução da produtividade de arroz de sequeiro.

Na Figura 3, para LVd e LVef, observa-se redução da produtividade de grãos de arroz, no menor conteúdo de água, a partir da condição de solo solto. No maior conteúdo de água ocorreu redução da produtividade a partir da RP de 2,38 e 2,07 MPa, respectivamente, no LVd e LVef. Entretanto, a produção de matéria seca da parte aérea foi restringida a partir de 2,30 e 2,90 MPa, respectivamente, no LVd e LVef.

MIELNICZUK et al. (1985) verificaram em Latossolo Roxo, em casa-de-vegetação, menor produção de matéria seca da parte aérea de aveia e trigo em 3,03 MPa.

A redução na produtividade, no maior conteúdo de água, a partir da excessiva RP ocorreu principalmente em decorrência do impedimento mecânico ao crescimento radicular, já que a porosidade de aeração mínima de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ não foi fator limitante, conforme verificado por BEUTLER et al. (2002), no mesmo solo. Segundo ATWELL (1990a), a restrição no crescimento radicular ocorre por causa a incapacidade das raízes manter pressão de turgor suficiente para mover as partículas de solo. Assim, nas condições adversas ao crescimento, as raízes enviam sinais a parte aérea informando à planta que as condições para seu funcionamento estão se restringindo e que é necessário reduzir a taxa de crescimento, refletindo em menor produtividade (BENGOUGH et al., 1997).

Com um pequeno aumento da compactação ocorreu maior produção de matéria seca de raízes, confirmando os resultados de ATWELL (1990a). No entanto, este pesquisador afirma que essas são mais espessas e curtas, diminuindo a absorção de água e nutrientes e, ainda nesta condição, ATWELL (1990b) afirma que ocorre menor alocação de carbono na parte aérea em razão do maior consumo de carboidratos pelas raízes. Menor comprimento radicular e concentração de raízes de arroz de sequeiro cultivar Caiapó e Cirad L-141 na camada superficial com o aumento da compactação do solo também foram verificados nos estudos de GUIMARÃES & MOREIRA (2001), em casa-de-vegetação, em Latossolo Vermelho textura média. Ainda, estes autores verificaram que as cultivares apresentaram comportamento semelhante em relação a compactação e menor produção de matéria seca da parte aérea a partir da densidade do solo de 1,2 até $1,7 \text{ Mg m}^{-3}$, mostrando-se extremamente sensíveis a compactação.

O menor crescimento radicular pode resultar em menor absorção de fósforo que é transportado no solo por difusão e absorvido a distâncias não superiores a 1 mm da raiz (NOVAIS & SMYTH, 1999) e, de potássio que segundo DOLAN et al. (1992) é transportado com predomínio da difusão sobre o fluxo de massa, resultando em menor desenvolvimento das plantas com o aumento da compactação. Em solos compactados

o transporte de nutrientes é facilitado porque diminui a tortuosidade dos poros, por outro lado, ocorre uma maior interação dos íons com o solo (HIRA & SINGH, 1977)

Segundo HAMBLIM (1985) em solos mais porosos, as plantas suportam maiores níveis de RP pois aumenta o contato das raízes com o solo e assim a quantidade de água e nutrientes absorvidos por unidade de raiz. Isto não foi observado neste estudo, no conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa, em que o nível de RP a partir do qual ocorreu redução da produtividade de grãos de arroz foi de 2,38 e 2,07 MPa, respectivamente, no LVd e LVef (Figura 3). BEUTLER et al. (2002) relatou maior porosidade total no LVef. O incremento na compactação induziu as raízes a se concentrarem na camada superficial, sendo que no LVef a produção de matéria seca das raízes e da parte aérea foi duas vezes superior, comparado ao LVd.

Assim, as plantas demonstraram potencial para alta produtividade de grãos no LVef, confirmado pelo maior número de grãos por planta, no entanto, não ocorreu enchimento da maioria destes grãos. Visto que o teor de nutrientes na parte aérea das plantas foi semelhante no LVd e LVef, a menor produtividade de arroz no LVef em relação ao LVd, no conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa possivelmente ocorreu em decorrência a períodos com menor conteúdo de água no solo entre as irrigações, ocorrido neste solo em decorrência do maior consumo de água pela parte aérea, duas vezes superior no LVef. Neste contexto, MOURA NETO (2001) afirma que a cultura de arroz de sequeiro é muito sensível a déficit hídrico na fase reprodutiva.

Em milho, TAVARES FILHO et al. (2001) verificaram que a RP de 3,5 MPa, em Latossolo Roxo muito argiloso, no campo, não restringiu o desenvolvimento radicular, valor muito superior aos encontrados como críticos para o arroz de sequeiro. Essas diferenças podem ser explicadas, em parte, pelo penetrômetro de impacto utilizado na determinação da RP. Segundo BEUTLER et al. (2002) o penetrômetro de impacto determina valores superiores e essas diferenças aumentam com a compactação e o teor de argila, comparado ao penetrômetro de anel dinamométrico, mostrando a necessidade de cautela na interpretação de valores obtidos como críticos ao desenvolvimento das culturas.

CONCLUSÕES

O valor de resistência do solo à penetração a partir da qual a produtividade de grãos de arroz de sequeiro decresceu foi de 2,38 e 2,07 MPa, respectivamente, no Latossolo Vermelho textura média e Latossolo Vermelho textura argilosa, no conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa.

No conteúdo de água retida na tensão de 0,05 MPa foram obtidas menores produções e, o menor nível de resistência à penetração proporcionou maiores produções de arroz de sequeiro.

CAPÍTULO 6 – QUALIDADE FÍSICA DO SOLO E A PRODUÇÃO DE SOJA E ARROZ DE SEQUEIRO EM DOIS LATOSSOLOS

RESUMO – O intervalo hídrico ótimo (IHO) definido como o conteúdo de água no solo em que as limitações ao crescimento das plantas por causa da água disponível, aeração e resistência do solo à penetração (RP) são mínimas, é o mais recente conceito utilizado como indicador da qualidade física e estrutural do solo. Os objetivos deste estudo foram determinar o IHO em um Latossolo Vermelho textura média (LVd) e argiloso (LVef) e estabelecer sua relação funcional com a produção de grãos de soja e arroz de sequeiro. Foram coletadas amostras deformadas de solo na camada de 0,20 m e passadas em peneira de 0,004 m de abertura de malha. Para a determinação do IHO, estabeleceu-se, em vasos (0,20 m de altura e 0,25 m de diâmetro), três níveis de compactação do solo para obter uma ampla variação de condições físicas e estruturais dos solos. Foram coletadas 45 amostras indeformadas para determinação da curva de RP, da curva de retenção de água, da densidade do solo e do IHO. Os limites superiores do IHO foram: o conteúdo de água do solo na tensão de 0,01 MPa (θ_{cc}) ou a porosidade de aeração de 10% (θ_{PA}); e inferiores o conteúdo de água do solo na qual a RP é limitante (θ_{RP}) ou o conteúdo de água no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), equivalente à tensão de 1,5 MPa. Para o estudo de crescimento das plantas, estabeleceu-se um experimento com quatro níveis de compactação do solo em vasos de 0,20 m de altura e 0,25 m de diâmetro, nos quais foram determinados os valores de RP e de densidade do solo críticos à produção de soja e arroz. Os resultados indicaram que a amplitude do IHO foi maior no LVef comparado ao LVd, e em ambos os solos o limite superior do IHO foi θ_{cc} e no limite inferior foi reduzido pela θ_{RP} , com o aumento da D_s . A densidade do solo crítica foi alterada com o valor de RP inserido no modelo do IHO, sendo, em geral, superior a densidade limitante à produção de soja e arroz, no LVd, e inferior no LVef.

Palavras-Chave: conteúdo de água, compactação do solo, cultura anual

INTRODUÇÃO

A exploração de grande diversidade de áreas para fins agrícolas implica na utilização de solos com comportamentos físicos distintos, que devem ser considerados quando da tomada de decisões sobre o manejo. É consenso que a compactação do solo, principalmente em sistemas de plantio direto (SPD), é fator limitante a continuidade de uso do sistema. No entanto, o SPD cresce desde a década de setenta, principalmente na região sul e no cerrado brasileiro. A compactação do solo altera a infiltração e redistribuição de água, a difusão de gases, a disponibilidade de oxigênio no solo, reduz o crescimento das raízes podendo diminuir a eficiência de utilização da água e dos nutrientes pelas plantas (HAKANSSON & VOORHEES, 1998).

Vários atributos físicos do solo são utilizados para avaliar o estado de compactação do solo, entre estes, a densidade e a porosidade do solo. Entretanto, na maioria dos estudos, não tem sido possível estabelecer relações funcionais destes atributos com o crescimento e a produção das culturas. O Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), termo introduzido no Brasil por TORMENA et al. (1998), foi originalmente proposto por LETEY (1985) e quantificado pela primeira vez por SILVA et al. (1994). O IHO, um indicador da qualidade física e estrutural do solo para o crescimento das plantas, é definido por um conteúdo de água no solo no qual as limitações ao crescimento das plantas em função da água disponível, da aeração e da resistência do solo à penetração (RP) são mínimas. O limite superior do IHO é o conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa equivalente a capacidade de campo (REICHARDT, 1988) ou o conteúdo de água no qual a porosidade de aeração é de 10% (GUPTA & ALLMARAS, 1987); o limite inferior o conteúdo de água retida na tensão de 1,5 MPa equivalente ao ponto de murcha permanente (SAVAGE et al., 1996) ou a RP limitante ao crescimento radicular de 2,0 MPa (SILVA et al., 1994).

Dentro destes limites estabelecidos para o IHO, o crescimento das plantas é menos restritivo e o grau dessas limitações aumenta de dentro para fora desses limites (SILVA et al., 1994). SILVA & KAY (1996) verificaram que a ocorrência de conteúdo de água fora dos limites do IHO restringiu o crescimento das plantas de milho e que o

crescimento das plantas foi positivamente correlacionado com o IHO. Dos atributos que integram o IHO, a RP é o fator que mais freqüentemente reduz o IHO (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998; IMHOFF et al., 2001), e seus valores oscilam com cultivares, culturas e com a condição estrutural do solo (HAMBLIM, 1985). Além disso, o valor de RP de 2,0 MPa aceito como limitante ao crescimento das raízes e da parte aérea (TORMENA et al., 1998) tem sido questionado para as diferentes culturas, sistemas de manejo e solos tropicais, necessitando de mais estudos específicos. Neste sentido, são escassos os estudos que relacionam o IHO com a produção das culturas, em especial nos solos tropicais do Brasil.

A compactação do solo modifica o comportamento físico do solo em consequência da mudança na distribuição dos poros do solo. Resultados de pesquisas indicam que o IHO diminui com o aumento da densidade do solo (D_s) (SILVA et al., 1994; IMHOFF et al., 2000, 2001; SILVA et al., 2002) podendo atingir o valor zero quando os limites superior e inferior são numericamente iguais. Nesta condição, a D_s é denominada de densidade do solo crítica (D_{sc}) ao desenvolvimento das plantas (SILVA et al., 1994; IMHOFF et al., 2001). Tanto o IHO como a D_{sc} variam com a textura e com a condição estrutural do solo (SILVA et al., 1994) e, tem sido constatado que em solos argilosos é grande a freqüência de valores do IHO muito baixos e/ou até nulos (TOPP et al., 1994). Os resultados obtidos por SILVA et al. (2002), estudando o IHO em três solos, indicam que a D_{sc} diminui do solo mais arenoso para o mais argiloso. Sugere-se que, quando a D_{sc} é atingida, são necessárias medidas biológicas ou mecânicas para recuperação da estrutura do solo, ou seja, para realizar a descompactação do solo.

O objetivo deste estudo foi de determinar o IHO e a D_{sc} de um Latossolo Vermelho de textura média e de um Latossolo Vermelho argiloso e estabelecer as relações destes com a produção de grãos de soja e arroz de sequeiro em dois conteúdos de água.

MATERIAL E MÉTODOS

Os solos são classificados como Latossolo Vermelho distrófico típico textura média A moderado caulínítico hipoférrico (LVd), e Latossolo Vermelho eutroférrico típico textura argilosa A moderado caulínítico-oxídico (LVef), localizados na Universidade Estadual Paulista (UNESP/FCAV), Jaboticabal, SP. A composição granulométrica dos mesmos foi determinada em amostras deformadas por meio da dispersão com NaOH ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$) e agitação lenta durante 16 horas, sendo o conteúdo de argila obtido pelo método da pipeta (GEE & BAUDER, 1986). Os solos LVd e LVef apresentaram, respectivamente: 271 e 517 g kg^{-1} de argila, 42 e 256 g kg^{-1} de silte e 687 e 227 g kg^{-1} de areia. A densidade de partículas determinada pelo método do picnômetro (EMBRAPA, 1997) foi de 2,82 e 2,98 Mg m^{-3} , para o LVd e LVef, respectivamente.

Foram coletadas amostras deformadas dos solos na camada de 0,0 - 0,20 m, destorroadas e passadas em peneira com abertura de malha de 0,004 m, sendo analisadas para fins de fertilidade segundo RAIJ et al. (1987) e corrigidas e fertilizadas segundo RAIJ et al. (1996), para soja e arroz de sequeiro.

A primeira etapa do trabalho consistiu na determinação do IHO. Para a determinação do IHO foram estabelecidos três níveis de compactação no solo com o objetivo de ampliar as condições estruturais do solo para a modelagem das curvas de retenção e de resistência do solo à penetração (RP) do solo necessárias para a quantificação do IHO. O solo foi compactado em vaso cilíndrico de PVC com capacidade de 9,82 L (0,20 m de altura e 0,25 m de diâmetro), em camadas de 0,03 m, sendo cada camada compactada, por meio da queda livre de um êmbolo de 7 kg de uma altura de 0,6 m, no centro geométrico de um suporte de madeira com diâmetro ligeiramente inferior ao vaso. Para cada nível de compactação (mesmo número de impactos/ volume de solo) foram coletadas cinco amostras indeformadas, na profundidade de 0,02 a 0,05 m, utilizando anéis volumétricos (0,03 m de altura e 0,048 m de diâmetro), com três repetições, formando três grupos de cinco amostras. Cada grupo de amostras foi saturado e submetido a uma das seguintes tensões: 0,006; 0,01; 0,033; 0,06 e 0,3 MPa em câmaras de Richards (KLUTE, 1986). Após o equilíbrio, as

amostras foram pesadas e tiveram determinadas a RP utilizando um penetrômetro eletrônico com velocidade constante de penetração de $0,01 \text{ m min}^{-1}$ e, cone com área de $3,69 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, conforme descrito por TORMENA et al. (1998). A RP foi determinada no centro geométrico de cada amostra na profundidade de 0,01 a 0,02 m, obtendo-se uma leitura a cada 0,001 m, perfazendo 100 leituras por amostra, e o valor médio destas foi utilizado. Os valores obtidos (kgf cm^{-2}) foram multiplicados pelo fator de 0,098 para transformação em MPa.

Após a determinação da RP as amostras foram secas em estufa a $\pm 105 \text{ }^\circ\text{C}$ por 24 horas. Nestas amostras foram determinados o conteúdo de água retida em cada tensão (KLUTE, 1986) e a densidade do solo (D_s) (BLAKE & HARTGE, 1986b). A função entre conteúdo de água do solo e tensão, i.e. as curvas de retenção de água, foram ajustadas pelo modelo proposto por GENUCHTEN (1980). A partir do modelo ajustado aos dados foi estimado o conteúdo de água na capacidade de campo (tensão de 0,01 MPa) e no ponto de murcha permanente (tensão de 1,5 MPa).

Os valores de RP foram ajustados em função do conteúdo de água volumétrico e a D_s utilizando o modelo não-linear proposto por BUSSCHER (1990), na sua forma log-transformada, descrito a seguir:

$$\ln RP = \ln a + b \ln \theta + c \ln D_s \quad (1)$$

em que RP é a resistência do solo à penetração (MPa), θ o conteúdo de água volumétrico ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), D_s a densidade do solo (Mg m^{-3}) e a , b , c são os coeficientes do modelo obtidos por meio do ajuste do modelo aos dados. O conteúdo de água em que a RP foi limitante foi calculado pela equação (2) obtida de (1), a seguir:

$$\theta_{(RP_{\text{crit}})} = RP_{(\text{crit})} / (e^{a*} (D_s^c))^{1/b} \quad (2)$$

O conteúdo de água em que a porosidade de aeração é de 10% foi obtido pela equação a seguir:

$$\theta_{PA} = (1 - D_s/D_p) - 0,1 \quad (3)$$

em que θ_{PA} é o conteúdo de água em que a porosidade de aeração de 10% é limitante ($m^3 m^{-3}$) e D_p a densidade de partículas do solo ($Mg m^{-3}$).

O IHO foi determinado para cada amostra conforme metodologia descrita por SILVA et al. (1994). O conteúdo de água volumétrico do solo nos valores limitantes de RP foi obtida utilizando os níveis de RP limitantes estabelecidos no experimento de produção de grãos de soja e arroz descrito adiante.

Na segunda etapa do trabalho, o experimento foi conduzido em casa de vegetação da Universidade Estadual Paulista (UNESP/FCAV), Jaboticabal, SP. Antes da instalação do experimento, foram previamente estabelecidos quatro níveis de RP e coletadas amostras indeformadas para determinação dos conteúdos gravimétricos de água em câmaras de Richards (KLUTE, 1986) nas tensões de 0,05 e 0,01 MPa. Em seguida foram ajustados os conteúdos de água de 0,11 e 0,14 $kg kg^{-1}$ no LVd e 0,24 e 0,27 $kg kg^{-1}$ no LVef, correspondentes as tensões de 0,05 e 0,01 MPa, respectivamente. Na seqüência foi realizada uma calibração do número de impactos por camada de solo necessários para atingir os valores de RP desejados. Nessa etapa foram determinados os quatro níveis de RP com o penetrômetro de anel dinamométrico (Solotest 1.210.001), com ângulo de cone de 30°, sendo as leituras realizadas quando a base do cone atingiu a profundidade de 0,03 m, e o valor de cada repetição foi obtido da média de quatro determinações. Foram utilizados cones com diâmetros da base de 0,028; 0,022; 0,012 e 0,006 m, respectivamente, diminuindo o diâmetro da base do cone com o incremento dos valores de compactação do solo. A utilização de cones com menores diâmetros foi necessário para possibilitar as determinações nos maiores níveis de RP. Após essa calibração, mantendo o solo sempre coberto para evitar perda de água, foi realizada a compactação do solo utilizando o número de impactos/ camada estabelecidos anteriormente, seguindo a metodologia descrita na primeira fase. Imediatamente após a compactação do solo, cada vaso foi pesado para utilização desse valor na condução do experimento, e manter o solo nos conteúdos de água pré-determinados.

Foram semeadas três sementes por cova (4 covas vaso⁻¹) de soja (*Glycine max* cv. Embrapa 48) e arroz (*Oryza sativa* cv. IAC 165), em 2001. Após sete dias, realizou-

se o desbaste, deixando duas plantas de soja e quatro de arroz por vaso, respectivamente. Nesta data foram aplicados os conteúdos de água pré-determinados, visto que foi necessário aumentar o conteúdo de água do solo para possibilitar a germinação nos vasos mais secos e compactados. O conteúdo de água foi mantido constante, mediante duas pesagens diárias dos vasos referentes a uma repetição e reposição de água através de tubo de PVC perfurado, instalado no centro geométrico do vaso, sendo feita a pesagem e rodízio de todos vasos a cada cinco dias. Na colheita, foi avaliada a produção de grãos por planta e ajustada a 12% de conteúdo de água.

Os tratamentos consistiram de quatro níveis de RP e dois conteúdos de água, para cada solo e cultura, constituindo quatro experimentos inteiramente casualizados, com três repetições. A análise estatística consistiu da análise de variância, e de regressão entre a RP e a Ds com a produção de grãos de soja e arroz, em cada conteúdo de água e solo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de produção de grãos indicam, de modo geral, que para soja os valores limitantes de RP foram superiores ao arroz, e que na tensão de 0,01 MPa foram obtidas maiores produções e as plantas suportaram valores superiores de RP (Tabela 12), confirmando os estudos de TARDIEU (1994). Por meio das regressões da RP com a produção, verifica-se que no conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa, a RP limitante à produção de grãos de soja no LVd e arroz no LVd e LVef, é próxima do valor amplamente adotado como crítico ao crescimento radicular de 2,0 MPa (TORMENA et al., 1998). Ainda, verifica-se que com o aumento do conteúdo de água pode-se tolerar um maior valor de RP e que o menor valor crítico de RP com a redução do conteúdo de água pode ser indicativo de uma interação com efeito do potencial da água no solo restringindo a atividade fisiológica da planta. Neste sentido, vários trabalhos abordam esta interação com a RP (TARDIEU, 1994; STIRZAKER et al., 1996).

Tabela 12. Equações de regressão entre a resistência do solo à penetração (RP) e a produção de grãos de soja e arroz de sequeiro (g planta^{-1}), no LVd e LVef, nos conteúdos de água retida nas tensões de 0,05 e 0,01 MPa.

Conteúdo de água (kg kg^{-1})	Equação $Y = \text{produção}; x = \text{RP}$	R^2	Produção máxima	RP Crítica ¹
Soja				
LVd				
0,11	$Y = -0,4897x^2 + 1,6246x + 4,9907$	0,99**	6,34	1,66
0,14	$Y = -1,3189x^2 + 5,8676x + 7,1537$	0,99**	13,68	2,22
LVef				
0,24	$Y = -1,267x^2 + 7,7189x + 0,5277$	0,99**	12,28	3,05
0,27	$Y = -1,455x^2 + 8,1652x + 7,4492$	0,93**	18,90	2,81
Arroz				
LVd				
0,11	$Y = -0,3116x + 2,0823$	0,89**	1,92	0,27
0,14	$Y = -0,5824x^2 + 2,7707x + 2,5339$	0,86**	5,83	2,38
LVef				
0,24	$Y = 0,0581x^2 - 0,5028x + 2,0113$	0,99**	1,81	0,43
0,27	$Y = -0,35x^2 + 1,4464x + 2,76$	0,93**	4,25	2,06

¹ Valor de RP (MPa) a partir do qual ocorreu decréscimo da produção de grãos por planta. ** Significativo a 1% de probabilidade. Os valores médios de RP em cada nível de compactação foram: 0,27; 2,04; 2,75; 4,18 e 0,31; 1,79; 2,32; 3,58 para o LVd e 0,43; 2,52; 3,83; 4,32 e 0,27; 1,78; 2,54; 4,03 para o LVef, no conteúdo de água de 0,11; 0,14 e 0,24; 0,27 kg kg^{-1} , respectivamente.

A partir desses valores limitantes de RP, para soja e arroz (Tabela 12), foi determinado o conteúdo de água em que a RP é limitante, para confecção do IHO. Para tal, foram ajustados modelos aos dados de RP em função da Ds e do conteúdo de água volumétrico (θ) (Tabela 13). Verifica-se que as variáveis utilizadas no modelo foram significativas a 1% de probabilidade no LVef, e no LVd a Ds apresentou probabilidade de erro acima de 4%, demonstrando menor interação deste atributo no modelo, confirmando os estudos de TORMENA et al. (1998), em que as variáveis foram significativas a 1% de probabilidade em Latossolo Roxo, no campo. Por meio dos coeficientes do modelo ajustado da RP verifica-se que a Ds teve relação direta e a θ inversa com a RP, conforme também verificado por SMITH et al. (1997) e TORMENA et al. (1998).

Tabela 13. Valores dos parâmetros estimados da regressão linearizada e probabilidade dos coeficientes ajustados do modelo da RP em função do conteúdo de água e da Ds, no LVd e LVef, nos três níveis de compactação ($\ln RP = \ln a + b \ln \theta + c \ln D_s$).

Parâmetro	LVd		LVef	
	Valor estimado	Probabilidade	Valor estimado	Probabilidade
Nível de compactação 1				
<i>a</i>	-9,248	0,0001	-4,929	0,0001
<i>b</i>	-3,860	0,0001	-3,188	0,0001
<i>c</i>	5,932	0,1498	5,893	0,0018
Nível de compactação 2				
<i>a</i>	-7,205	0,0012	-4,947	0,0001
<i>b</i>	-2,756	0,0012	-3,754	0,0001
<i>c</i>	8,115	0,0461	7,792	0,0071
Nível de compactação 3				
<i>a</i>	-6,131	0,1128	-5,749	0,0001
<i>b</i>	-2,710	0,0251	-4,360	0,0001
<i>c</i>	6,062	0,3152	9,457	0,0001

As amostras de solo utilizadas no modelo apresentaram valores de RP de 0,16 - 9,00 e 0,33 - 6,63 MPa; Ds de 1,13 - 1,76 e 0,91 - 1,30 Mg m⁻³; e conteúdo de água volumétrico de 0,09 - 0,24 e 0,20 - 0,40 m³ m⁻³, no LVd e LVef, respectivamente. Em cada nível de compactação, o modelo foi estimado com 15 amostras, sendo a curva de RP utilizada no IHO final, obtida da junção das três curvas.

Utilizando os dados do modelo apresentado na Tabela 13 foi calculada o θ em que a RP é limitante para cada cultura e condição, formando em conjunto os conteúdos de água a partir da qual a RP torna-se limitante para cada solo, cultura e conteúdo de água utilizado no cultivo. Essas curvas são apresentadas na Figuras 4 e 5 e por meio dessas verifica-se que a inserção de diferentes valores de RP limitante altera a amplitude do IHO e a Dsc, i.e. o solo LVd em que a Dsc aumenta de 1,55 para 1,63 Mg m³ quando a RP limitante inserida no modelo aumenta de 1,66 para 2,22 MPa. Esses resultados corroboram SILVA et al. (1994) que afirmam que a determinação da RP limitante para cada cultura e sua inserção no IHO aumentam a sua precisão para o monitoramento da qualidade física do solo. TORMENA et al. (1998) verificaram em Latossolo Roxo muito argiloso que a RP foi o fator que assumiu maior importância relativa em termos de limitação ao crescimento radicular.

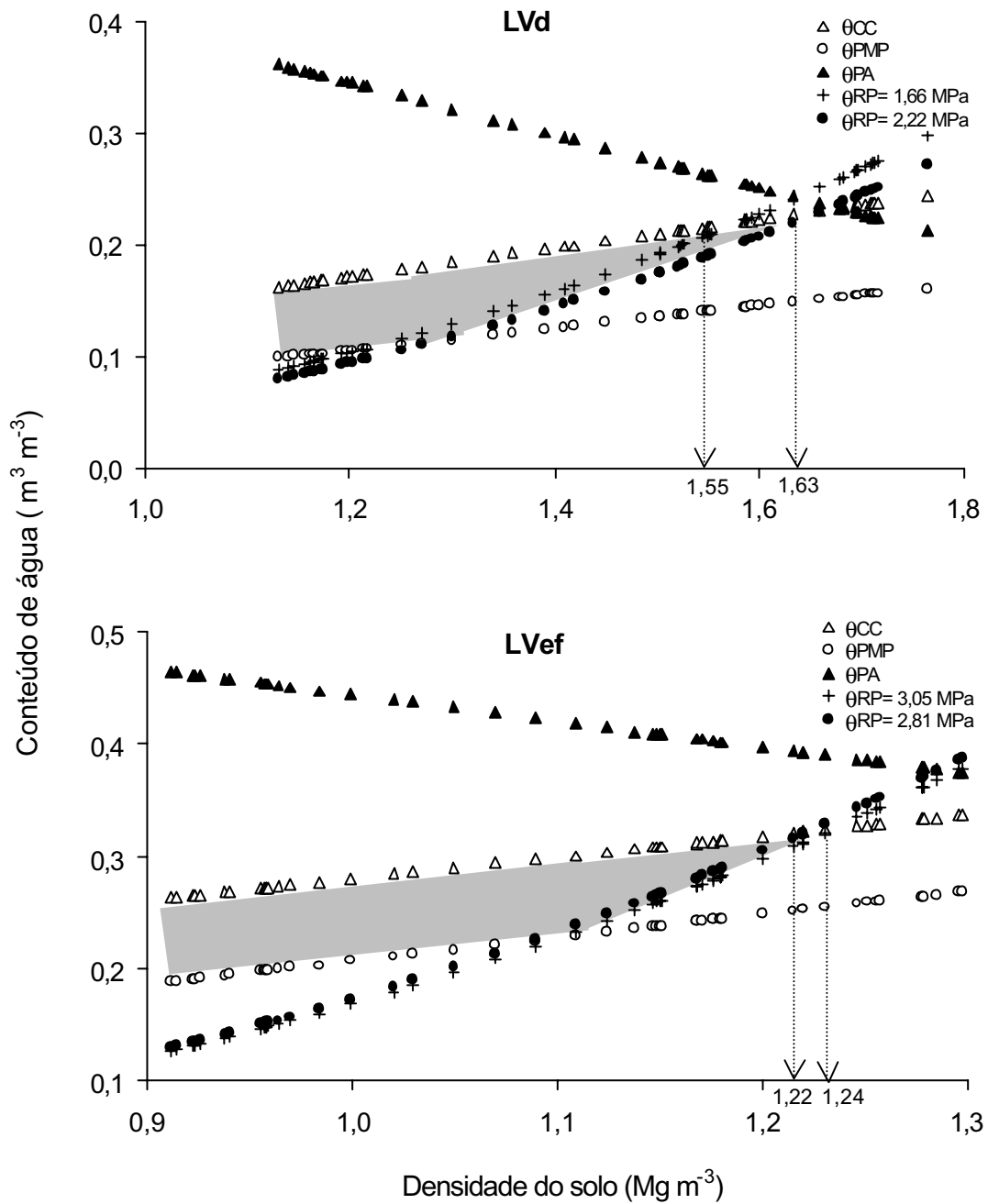


Figura 4. Variação do conteúdo de água volumétrico (θ) com a densidade do solo, para os limites críticos da capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), porosidade de aeração (θ_{PA}) e resistência à penetração limitante para a cultura de soja no conteúdo de água retida nas tensões de 0,05 (+) e 0,01 MPa (•) (θ_{RP}), no LVd e LVef, respectivamente. IHO= intervalo hídrico ótimo.

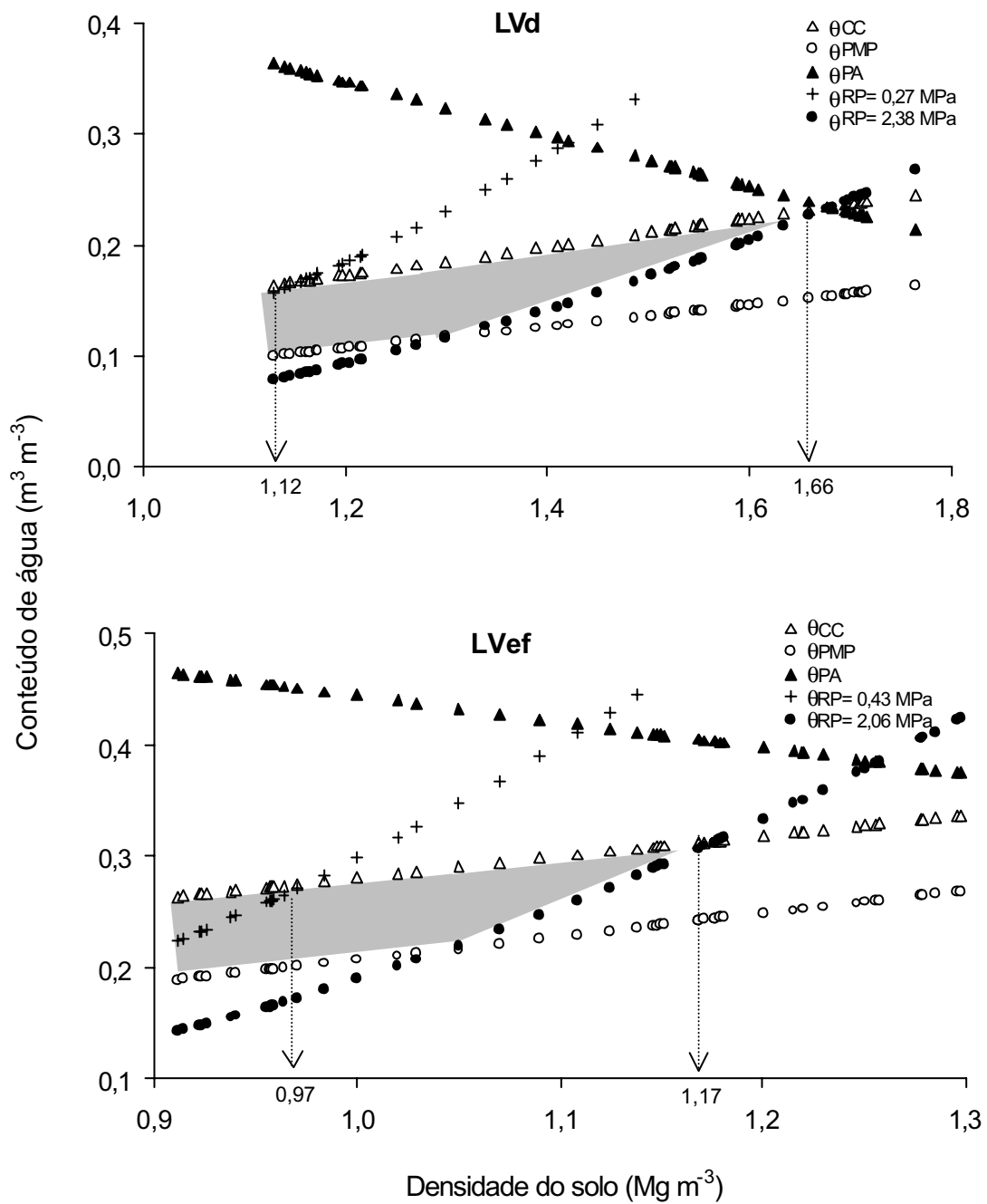


Figura 5. Variação do conteúdo de água volumétrico (θ) com a densidade do solo, para os limites críticos da capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), porosidade de aeração (θ_{PA}) e resistência à penetração limitante para a cultura de arroz no conteúdo de água retida nas tensões de 0,05 (+) e 0,01 MPa (\bullet) (θ_{RP}), no LVd e LVef, respectivamente. IHO= intervalo hídrico ótimo.

A curva de θ em que a RP é limitante (θ_{RP}) ou a curva da θ no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) constitui o limite inferior e a θ na capacidade de campo (θ_{CC}) ou a θ em que a porosidade de aeração é de 10% (θ_{PA}) o limite superior do IHO. Assim, verificou-se que o limite inferior do IHO foi a θ_{PMP} na condição de solo solto e a θ_{RP} com o aumento da D_s (Figuras 4 e 5), confirmando os estudos de SILVA et al. (1994), TORMENA et al. (1998) e IMHOFF et al. (2001). Visto que o conteúdo de água do solo se encontra muitas vezes abaixo da capacidade de campo durante o ciclo das culturas, a θ_{RP} , em solos compactados, torna-se o fator limitante ao crescimento das plantas até a D_{sc} , destacando a importância da utilização de valores de RP limitante para cada cultura, no IHO.

O limite superior do IHO foi a θ_{CC} no solo de textura média (LVd) e argilosa (LVef) (Figura 4 e 5), corroborando TORMENA et al. (1998) que verificaram que em 97% das amostras a θ_{CC} foi o limite superior do IHO, em Latossolo Roxo muito argiloso, e IMHOFF et al. (2001) em Podzólico Vermelho Amarelo de textura média. A θ_{PA} não foi fator limitante do IHO até a D_{sc} , e foi superior no LVef argiloso em relação ao LVd de textura média (Figura 4 e 5). Neste sentido, BEUTLER et al. (2002) que verificaram maior porosidade total no LVef graças a mineralogia oxidica do LVef, que segundo FERREIRA et al. (1999), proporciona a formação de microagregados arredondados < 1 mm, formando uma estrutura com aspecto maciça porosa "in situ", resultando em maior proporção e poros grandes e menor D_s , comparado ao LVd caulinitico, em que ocorre a formação de estrutura maciça coesa.

Segundo IMHOFF et al. (2001), quando ocorre valor numérico igual para o limite superior e inferior do IHO é atingida a D_{sc} . Desta forma, quando a D_s é superior a D_{sc} ocorrem condições altamente restritivas ao crescimento radicular. Baseado neste conceito, foram realizadas regressões entre a D_s e a produção de grãos de soja e arroz (Figura 6) para verificar a relação funcional do IHO com a produção de grãos de soja e arroz.

A D_s a partir da qual ocorreu redução da produção de soja e arroz foi inferior a D_{sc} para o LVd e ligeiramente superior a D_{sc} para o LVef (Figuras 4 e 5), no conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa. Isto possivelmente está relacionado a mineralogia do solo, que segundo BEUTLER et al. (2002), condicionou maior porosidade total no LVef, comparado ao LVd. Visto que o experimento foi conduzido em casa de vegetação, a maior porosidade no LVef possivelmente aumentou a condutividade hidráulica não saturada desse solo. Desta forma, a água atingiu mais rapidamente os pontos de absorção das raízes, após as duas irrigações diárias, diminuindo o tempo em que estas permaneceram em condições de déficit hídrico, em relação aos potenciais de água utilizados, no LVef. Associado a porosidade, outro aspecto que contribuiu para esse resultado, no LVef, foi o valor do IHO superior em $0,006 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e a menor redução do IHO pela θ_{RP} limitante próxima a D_{sc} , comparado ao LVd. Ainda, a amplitude de D_s do solo em que θ_{RP} é limitante foi de 0,14 no LVef, enquanto que no LVd foi de 0,30. SILVA et al. (1994) afirmaram que quanto menor o IHO maior a probabilidade de ocorrência de limitações físicas ao crescimento das raízes e desenvolvimento das plantas. Neste contexto, a relação funcional diferenciada do IHO com a produção das culturas, para cada solo, indica que a resposta das culturas à compactação está relacionada a estrutura do solo, corroborando com HAMBLIM (1985).

A produção de soja, no LVd, foi reduzida a partir da D_s de 1,27 e 1,40 Mg m^{-3} (Figura 6) e a D_{sc} foi de 1,55 e 1,63 Mg m^{-3} (Figura 4), resultando em produção de grãos 15 e 16% menor na D_{sc} determinada no IHO, no conteúdo de água retida nas tensões de 0,05 e 0,01 MPa, respectivamente. Desta forma, a D_s a partir da qual ocorreu limitação à produção de grãos de soja ocorreu quando o IHO começou a ser reduzido pela θ_{RP} , no entanto, o modelo do IHO mostra que não ocorreram restrições de água, aeração e RP nos valores de D_s em que houve redução da produção e grãos. Este comportamento também foi observado para o arroz no LVd, em que a produção foi reduzida na D_s de 1,39 Mg m^{-3} (Figura 6) e a D_{sc} foi de 1,66 Mg m^{-3} (Figura 5) no conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa.

Já o arroz de sequeiro foi mais sensível ao conteúdo de água no solo, confirmando estudos de MOURA NETO (2001), ao passo que, no LVd, no conteúdo de

água retida na tensão de 0,01 MPa ocorreu redução de 33% da produção de grãos na Dsc comparada a Ds limitante (Figuras 5 e 6). No conteúdo de água retida na tensão de 0,05 MPa ocorreu menor produção e, maior decréscimo da produção de grãos com o incremento da Ds (Figura 6), nos dois solos.

No LVef a Ds limitante a produção de grãos de soja e arroz (Figura 6) foi ligeiramente superior a Dsc obtida no IHO. Neste caso, ao considerar-se a Dsc como limite crítico para a descompactação do LVef com vistas a melhoria de sua estrutura, seria obtida uma menor produção de grãos de soja de 1,7 e 2,5% no conteúdo de água retida nas tensões de 0,05 e 0,01 MPa, e de arroz de sequeiro de 0,5% no conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa. Para esse solo, os resultados permitem inferir que a Dsc foi um atributo adequado no monitoramento da compactação do solo para a soja e arroz, com vistas a qualidade estrutural do solo.

Na determinação do IHO, a curva de RP em função da θ e Ds, foi obtida com valores de RP obtidos com o penetrômetro eletrônico e o valor de RP limitante a produção das culturas foi obtido com o penetrômetro de anel dinamométrico, fato que possivelmente foi pouco expressivo no valor de Dsc obtida no IHO. Isso porque os dois penetrômetros são estáticos e foram utilizados com velocidade de penetração do cone no solo inferior a $1,8 \text{ m min}^{-1}$, condição em que a velocidade tem menor influência sobre o valor obtido de RP (ASAE, 1976). Ainda, mediante as curvas de θ_{RP} verifica-se que, geralmente, são necessárias grandes variações da RP para que a Ds limitante seja igual a Dsc, no LVd.

Os resultados obtidos neste estudo mostram que a utilização do IHO e da Dsc no monitoramento da qualidade estrutural do solo com vistas a maximização da produção das culturas é um índice promissor, no entanto, há necessidade de estudos a nível de campo onde ocorrem períodos com diferentes conteúdos de água no solo durante o ciclo das culturas. A utilização da Dsc como a Ds a partir da qual devem ser tomadas medidas mecânicas ou biológicas para descompactar o solo demonstra ser um atributo altamente dependente do conteúdo de água no solo durante o ciclo das culturas.

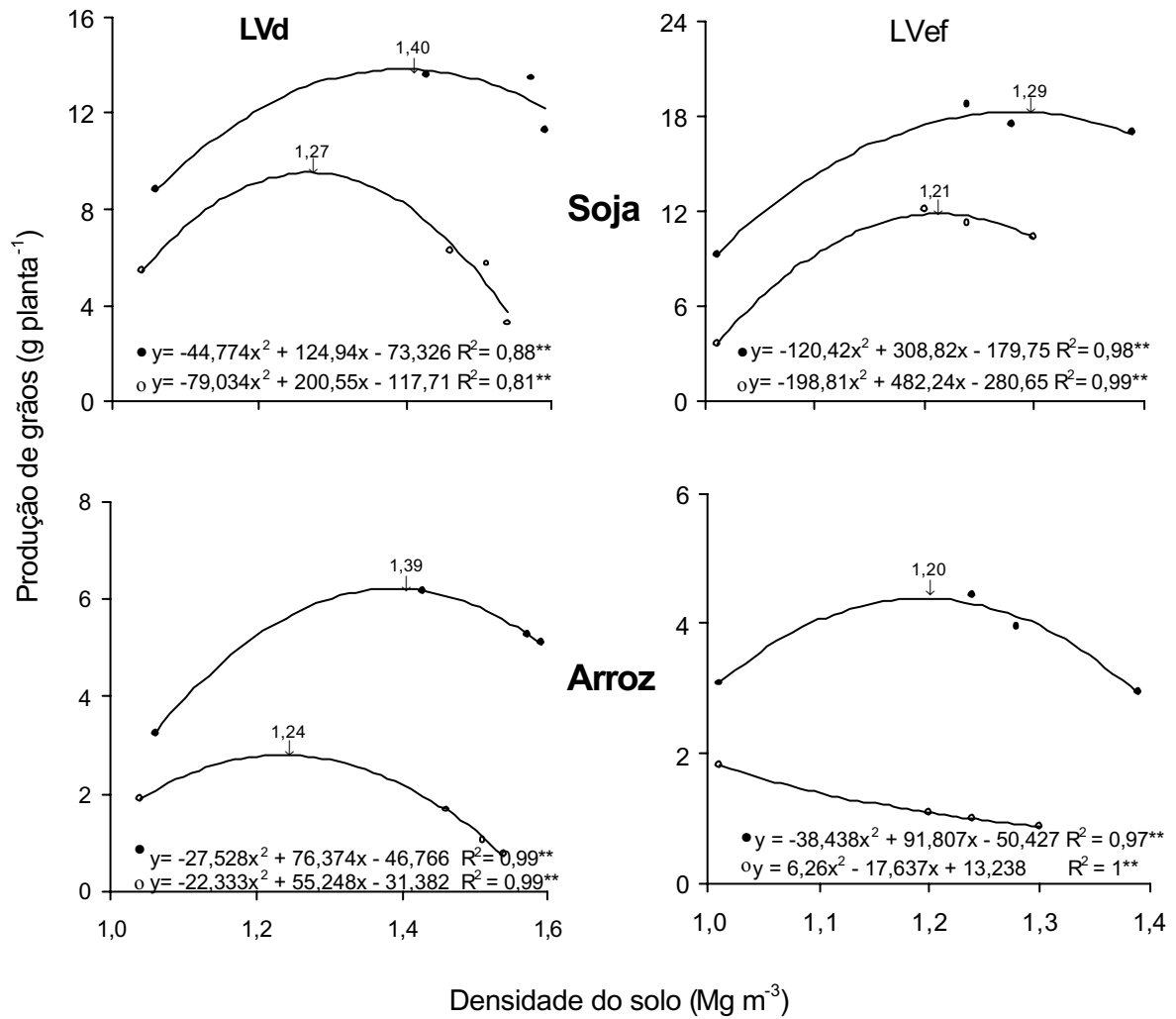


Figura 6. Produção de grãos de soja e arroz (g planta⁻¹), no LVd e LVef, em níveis de densidade do solo e de água. (●) Conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa; (○) Conteúdo de água retida na tensão de 0,05 MPa.

CONCLUSÕES

A amplitude do IHO foi superior no LVef comparado ao LVd sendo o limite superior a capacidade de campo e na parte inferior foi reduzido pela resistência à penetração, com o aumento da densidade do solo.

A densidade do solo crítica foi alterada com o valor de RP limitante inserido no modelo do IHO, sendo, em geral, superior a densidade limitante a produção de soja e arroz, no LVd, e inferior no LVef.

O conteúdo de água utilizado durante cultivo das culturas alterou a produção e os níveis de resistência à penetração e de densidade do solo limitantes, e o IHO e a densidade do solo crítica.

CAPÍTULO 7 – RELAÇÃO ENTRE ALGUNS ATRIBUTOS FÍSICOS E A PRODUÇÃO DE GRÃOS DE SOJA E ARROZ DE SEQUEIRO EM LATOSSOLOS

RESUMO – Este trabalho objetivou avaliar atributos físicos e a correlação com a produção de grãos de soja e arroz de sequeiro em três níveis de compactação e dois conteúdos de água no solo (água retida nas tensões de 0,05 e 0,01 MPa), com três repetições. Foram utilizadas amostras de Latossolo Vermelho, textura média (LVd) e, Latossolo Vermelho, textura argilosa (LVef), coletadas na profundidade de 0,0-0,20 m e compactadas em camadas de 0,03 m, em vasos de 9,82 L. Foram avaliados a porosidade total, macro e microporosidade, densidade do solo, resistência do solo à penetração e a produção de grãos de soja e arroz de sequeiro. Os atributos físicos apresentaram correlações altas e significativas entre si, nos dois solos e conteúdos de água. As maiores correlações dos atributos físicos com a produção de grãos de soja e arroz foram obtidas no LVd e no conteúdo de água retida na tensão de 0,05 MPa, condição em que ocorreu maior redução da produção de grãos com o aumento da compactação. As correlações foram positivas da macroporosidade e porosidade total e negativas da microporosidade, densidade do solo e resistência à penetração com a produção de grãos de soja e arroz.

Palavras-Chave: compactação do solo, conteúdo de água, *Glycine max*, *Oryza sativa*

INTRODUÇÃO

As culturas de soja e arroz de sequeiro são cultivadas em extensas áreas agrícolas e em grande diversidade de solos, sendo que a partir de 1980 ocorreu um aumento gradativo na utilização de sistemas de manejo com revolvimento mínimo do solo, denominado de sistema de plantio direto (SPD). Esse sistema ocupa atualmente ocupa áreas no sul e no cerrado brasileiro, por vantagens de ordem técnica, econômica e ambiental, como menor utilização de máquinas agrícolas para preparo do solo e conseqüente redução de custos, redução nas perdas de solo, nutrientes e água, reduzindo a poluição de mananciais de água, além de preservar a estrutura do solo. No entanto, pesquisadores tem verificado que o tráfego de máquinas pesadas sobre o solo provoca compactação superficial do solo com maiores valores na profundidade de 0,075 a 0,17 m (SILVA et al., 2000b), fato que tem dificultado a expansão do SPD.

Em solos compactados o desenvolvimento das plantas é menor (VIEIRA & MUZILLI, 1984; TORMENA et al., 1998; MEROTTO & MUNDSTOCK, 1999; GUIMARÃES et al., 2002). Isto tem sido atribuído ao impedimento mecânico do solo ao crescimento radicular, que resulta em menor volume de solo explorado, menor absorção de água e nutrientes e, conseqüentemente menor produção das culturas. Por outro lado, ANDRADE et al. (1993) verificaram menor crescimento das plantas de girassol sob estresse físico provocado pela compactação do solo, o qual não foi influenciado pelo suprimento de água, oxigênio, nutrientes e disponibilidade de carboidratos.

Para avaliar a compactação do solo em relação a produtividade das culturas são utilizados alguns atributos físicos. Segundo LETEY (1985), os atributos físicos são classificados como diretamente e indiretamente relacionados com o crescimento das plantas, sendo a água, o oxigênio, a temperatura e a resistência do solo à penetração (RP) os que tem relações diretas com o crescimento radicular, e a densidade do solo, a porosidade, a infiltração de água, a agregação e a textura os de relações indiretas. Dentre estes, é importante a seleção e utilização de atributos físicos sensíveis ao manejo e relacionados com a produção, para o monitoramento da qualidade do solo,

maximização da produção das culturas e manutenção da sustentabilidade dos sistemas agrícolas, minimizando a degradação dos solos e do meio ambiente.

A compactação é caracterizada pelo aumento da RP, da densidade do solo e da microporosidade, com redução da porosidade total e da macroporosidade (ALVARENGA et al., 1996; MEROTTO & MUNDSTOCK, 1999; ROSOLEM et al., 1999; BEUTLER et al., 2002; STONE et al., 2002). Em geral, pequenas compactações são benéficas por aumentar a área de contato das raízes com o solo, proporcionando um adequado suprimento de água e nutrientes à parte aérea (KOOISTRA et al., 1992). Entretanto, o valor de RP de 2,0 MPa é considerado como restritivo ao desenvolvimento das plantas (TORMENA et al., 1998).

Os solos apresentam comportamentos físicos distintos de acordo com a composição granulométrica, mineralogia (FERREIRA et al., 1999), teor de matéria orgânica e o conteúdo de água. Neste sentido, HAMBLIM (1985) afirmou que a resposta das culturas à compactação do solo é acentuadamente influenciada pela condição estrutural do solo. Ainda, DEXTER (1987) afirma que a compactação do solo é mais prejudicial em solo seco, sendo que em condições de maior conteúdo de água pode haver crescimento radicular em valores de RP superiores a 4,0 MPa.

Este estudo objetivou avaliar atributos físicos e as correlações com a produção de grãos de soja e arroz de sequeiro, em níveis de compactação e de água de um Latossolo Vermelho, textura média (LVd) e um Latossolo Vermelho argiloso (LVef).

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Universidade Estadual Paulista (UNESP/FCAV), Jaboticabal, SP, em Latossolo Vermelho distrófico típico textura média A moderado caulínítico hipoférrico (LVd), e Latossolo Vermelho eutroférrico típico textura argilosa A moderado caulínítico-oxídico (LVef). A composição granulométrica foi determinada em amostras deformadas por meio da dispersão com NaOH (0,1 mol L⁻¹) e agitação lenta durante 16 horas, sendo o conteúdo de argila

obtido pelo método da pipeta (GEE & BAUDER, 1986). A densidade de partículas foi determinada pelo método do picnômetro, segundo BLAKE & HARTGE (1986a). Os solos LVd e LVef apresentaram, respectivamente, 271 e 517 g kg⁻¹ de argila; 42 e 256 g kg⁻¹ de silte; 687 e 227 g kg⁻¹ de areia; e densidade de partículas de 2,82 e 2,98 Mg m⁻³.

As amostras dos solos foram coletadas na camada de 0,0-0,20 m e passadas em peneira de 0,004 m. O solo utilizado para cada cultura foi adubado segundo RAIJ et al. (1996), cuja análise química seguiu a metodologia de RAIJ et al. (1987). A caracterização química no momento da colheita mostrou níveis médios de fósforo e potássio, altos de cálcio e magnésio (relação 2:1) e saturação de bases de 68%, para soja e arroz, no LVd e LVef.

Após a realização da adubação, foram ajustados os conteúdos de água de 0,11 e 0,14 kg kg⁻¹ no LVd e 0,24 e 0,27 kg kg⁻¹ no LVef, correspondentes aos conteúdos de água retida nas tensões de 0,05 e 0,01 MPa, respectivamente. Estes conteúdos de água foram determinados previamente em câmaras de Richards em amostras indeformadas, segundo KLUTE (1986). Em seguida, o solo foi colocado em vaso cilíndrico de PVC com capacidade de 9,82 L (0,20 m de altura e 0,25 m de diâmetro), em camadas de 0,03 m. Cada camada foi compactada em decorrência da queda livre de um êmbolo de 7 kg, da altura de 0,60 m, no centro geométrico de um suporte de madeira com diâmetro ligeiramente inferior ao vaso, semelhante ao descrito por MORAES et al. (1991). Foram estabelecidos três níveis de resistência do solo à penetração (RP).

Em vasos com níveis de compactação e conteúdo de água equivalente aos utilizados para o cultivo, foram coletadas amostras indeformadas, na profundidade de 0,02 – 0,05 m, com anéis volumétricos de 0,03 m de altura e 0,048 m de diâmetro para determinação da densidade do solo (Ds) segundo BLAKE & HARTGE (1986b), da microporosidade (Mi), por secagem (tensão de 0,006 MPa), em câmaras de pressão de Richards com placa porosa (KLUTE, 1986), da porosidade total (PT) segundo DANIELSON & SUTHERLAND (1986), e a macroporosidade (Ma) foi obtida por diferença entre a PT e a Mi.

A RP foi determinada com o penetrômetro de anel dinamométrico (Solotest 1.210.001), com ângulo de cone de 30°. As leituras foram realizadas quando a base do cone atingiu a profundidade de 0,03 m, e o valor de cada repetição foi obtido da média de quatro subdeterminações. Foram utilizados cones com diâmetros de 0,0284; 0,022; 0,0120 e 0,006 m, respectivamente, diminuindo a área do cone com o incremento da compactação do solo. O valor obtido no relógio de leitura foi transformado em kgf pela equação linear de calibração do aparelho, a seguir:

$$R = 1,0444 + 0,2998x$$

em que R é a resistência à penetração em kgf e x é a leitura no relógio. O valor obtido em kgf foi dividido pela área do cone e multiplicado pelo fator 0,098 para transformação em MPa.

Foram semeadas três sementes por cova (4 covas vaso⁻¹) de soja (*Glycine max* cv. Embrapa 48) e arroz (*Oryza sativa* cv. IAC 165), em 2001. Após sete dias, realizou-se o desbaste, deixando duas plantas de soja e quatro plantas de arroz por vaso. Nesta data foram aplicados os conteúdos de água, visto que foi necessário aumentar o conteúdo de água no solo para possibilitar a germinação nos vasos mais secos e compactados. O conteúdo de água foi mantido constante, mediante duas pesagens diárias dos vasos referentes a uma repetição e reposição de água através de tubo de PVC perfurado, instalado no centro geométrico do vaso, sendo feita a pesagem e rodízio de todos vasos a cada cinco dias.

Foi avaliada a produção de grãos de soja e arroz por planta, sendo o conteúdo de água dos grãos ajustada a 0,12 kg kg⁻¹ pela equação a seguir:

$$P = P_i * ((100 - U_i)/(100 - U_f))$$

em que P é a produção final (g planta⁻¹) com 0,12 kg kg⁻¹ de água nos grãos, P_i é a produção inicial (g planta⁻¹), U_i é o conteúdo de água inicial (kg kg⁻¹) e U_f é o conteúdo de água final (0,12 kg kg⁻¹).

Os tratamentos consistiram de três níveis de compactação e dois conteúdos de água, constituindo um experimento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3 x

2, com três repetições. Foram realizadas correlações entre os atributos físicos e destes com a produção de grãos de soja e arroz de sequeiro.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores dos atributos físicos e da produção de grãos de soja e arroz no LVd e LVef, nos dois conteúdos de água são apresentados na Tabela 14. Verifica-se que o menor nível de compactação foi próximo a RP de 2,0 MPa, adotado como crítico ao crescimento radicular e da parte aérea das plantas (TORMENA et al., 1998). Assim, as correlações dos atributos físicos com a produção das culturas foram realizadas na condição de compactação prejudicial ao desenvolvimento das plantas. A PT e a Ma diminuíram e a Mi aumentou com o incremento da RP e da Ds (Tabela 14). Resultados semelhantes foram encontrados por ALVARENGA et al. (1996), MEROTTO & MUNDSTOCK (1999), BEUTLER et al. (2002) e STONE et al. (2002). Entretanto, verifica-se que o incremento da Mi foi de 4,2 e 5,5%, valor inferior relativo ao decréscimo da PT de -7,1 e -7,3% e da Ma -31,4 e -53,0% no LVd no conteúdo de água retida a 0,05 MPa, fato que se repete no outro conteúdo de água e solo. Neste sentido, MEROTTO & MUNDSTOCK (1999) e STONE et al. (2002) verificaram incremento não significativo da Mi com o aumento da Ds; e STONE et al. (2002) observaram que o aumento da Ds se refletiu na redução da PT e em maior proporção da Ma.

É importante mencionar que foram encontradas altas correlações significativas a 1% de probabilidade entre os atributos físicos, e com valores acima de 0,92 para a Ds, Ma, Mi e PT (Tabela 15). VIEIRA & MUZILLI (1984) estudando atributos físicos em sistemas de plantio direto e convencional e rotação de culturas com milho, soja e trigo, verificaram, após quatro anos, correlações de 0,97 , 0,87 e 0,99 para a Ma, Mi e PT com a Ds na profundidade de 0,10 m.

Tabela 14. Porosidade total (PT), macro (Ma) e microporosidade (Mi), densidade do solo (Ds), resistência do solo à penetração (RP) e produção de grãos de soja e arroz de sequeiro por planta, em níveis crescentes de compactação e no conteúdo de água retida nas tensões de 0,05 e 0,01 MPa, no Latossolo Vermelho textura média (LVd) e no Latossolo Vermelho argiloso (LVef).

0,05 MPa							0,01 MPa						
PT	Ma	Mi	Ds	RP	Produção(g)		PT	Ma	Mi	Ds	RP	Produção(g)	
-----	(m ³ m ⁻³)	-----	(Mg m ⁻³)	(MPa)	Soja	Arroz	-----	(m ³ m ⁻³)	-----	(Mg m ⁻³)	(MPa)	Soja	Arroz
LVd													
0,391	0,155	0,236	1,46	2,04	6,29	1,70	0,386	0,141	0,245	1,43	1,79	13,61	6,16
0,367	0,118	0,249	1,51	2,75	5,73	1,06	0,372	0,124	0,248	1,54	2,32	13,48	5,27
0,365	0,118	0,246	1,54	4,18	3,23	0,77	0,330	0,064	0,266	1,59	3,58	11,29	5,09
LVef													
0,500	0,153	0,347	1,20	2,52	12,06	1,09	0,484	0,126	0,358	1,24	1,78	18,71	4,45
0,484	0,132	0,352	1,24	3,83	11,22	0,99	0,466	0,097	0,369	1,28	2,54	17,46	3,95
0,466	0,100	0,366	1,30	4,32	10,41	0,89	0,442	0,063	0,379	1,39	4,03	17,00	2,95

Tabela 15. Correlações de Pearson entre a porosidade total (PT), macro (Ma) e microporosidade (Mi), densidade do solo (Ds), resistência do solo à penetração (RP), e regressões entre a RP e a Ds, no conteúdo de água retida nas tensões de 0,05 e 0,01 MPa no Latossolo Vermelho textura média (LVd) e no Latossolo Vermelho argiloso (LVef).

	Correlação de Pearson (r)							
	0,05 MPa				0,01 MPa			
	Ma	Mi	Ds	RP	Ma	Mi	Ds	RP
LVd								
PT	0,99	-0,99	-0,96	-0,80	0,99	-0,99	-0,92	-0,99
Ma		-0,99	-0,96	-0,82		-0,99	-0,92	-0,99
Mi			0,97	0,85			0,92	0,99
LVef								
PT	0,99	-0,93	-0,99	-0,96	0,99	-0,99	-0,99	-0,99
Ma		-0,98	-0,99	-0,90		-0,99	-0,99	-0,99
Mi			0,95	0,80			0,99	0,98

Solo – Tensão	Equação de regressão	R ²	
LVd	(0,05)	RP= 903,6 - 1228,2 Ds + 4187,3 Ds ²	0,99
	(0,01)	RP= 208,9 - 285,2 Ds + 98,1 Ds ²	0,99
LVef	(0,05)	RP= -402,6 + 632,6 Ds - 245,8 Ds ²	0,99
	(0,01)	RP= -79,5 + 110,6 Ds - 36,4 Ds ²	0,99

Todas as correlações foram significativas a 1% de probabilidade.

As altas correlações entre a Ds e PT, Ds e Ma (negativas) e Ds e Mi (positivas) ocorrem, segundo STONE et al. (2002), em razão da aproximação das partículas com o incremento da pressão mecânica exercida sobre o solo, reduzindo a proporção dos poros de maior diâmetro e incrementando ligeiramente os de menor diâmetro.

Foram obtidas equações quadráticas com altos coeficientes de determinação entre a RP e a Ds, nos dois solos e conteúdos de água (Tabela 15). No entanto, no LVd, textura média, a convectividade da parábola está voltada para cima se aproximando de um ajuste exponencial. STONE et al. (2002) encontraram equação quadrática com coeficiente de determinação de 0,96 entre a RP e a Ds em Latossolo Vermelho argiloso; e ROSOLEM et al. (1999) verificaram aumento quadrático e logarítmico da RP em função da Ds com coeficientes de determinação acima de 0,98, para solos com menos e mais de 400 g kg^{-1} de argila, respectivamente. Estes autores verificaram ainda que próximo a Ds máxima o valor de RP foi superior e aumentou em maior proporção com a Ds em solos mais argilosos. Isto demonstra que a RP é extremamente dependente da Ds.

A PT e a Ma apresentaram correlações significativas e positivas, e a Mi, a Ds e a RP correlações negativas com a produção de grãos de soja e arroz no LVd, nos dois conteúdos de água (Tabela 16). Já no LVef, as correlações foram significativas apenas para o arroz no conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa, apesar de apresentarem correlações significativas a 15,0% de probabilidade nas demais condições. Este resultado demonstra que no LVd textura média a produção de grãos de soja e arroz foi mais influenciada pelos atributos físicos. Neste contexto, HAMBLIM (1985) menciona que a resposta das plantas a compactação do solo é dependente da estrutura do solo, principalmente da porosidade; e MORAES et al. (1991) observaram que o mesmo nível de compactação foi mais prejudicial ao desenvolvimento de soja em Latossolo Roxo, comparado a Terra Roxa Estruturada mais argilosa.

Tabela 16. Correlações de Pearson entre a porosidade total (PT), macro (Ma) e microporosidade (Mi), densidade do solo (Ds), resistência do solo à penetração (RP) com a produção de grãos de soja e arroz por planta, no conteúdo de água retida nas tensões de 0,05 e 0,01 MPa, no Latossolo Vermelho textura média (LVd) e no Latossolo Vermelho argiloso (LVef).

Atributos Físicos	Correlação com a produção de grãos			
	0,05 MPa		0,01 MPa	
	r	Probabilidade	r	Probabilidade
			Soja	
			LVd	
PT	0,91**	0,0017	0,67*	0,0499
Ma	0,91**	0,0016	0,67*	0,0474
Mi	-0,92**	0,0012	-0,68*	0,0423
Ds	-0,93**	0,0009	-0,82**	0,0073
RP	-0,85**	0,0027	-0,70*	0,0375
			LVef	
PT	0,58 ^{ns}	0,0980	0,65 ^{ns}	0,0588
Ma	0,60 ^{ns}	0,0880	0,65 ^{ns}	0,0601
Mi	-0,60 ^{ns}	0,0910	-0,64 ^{ns}	0,0629
Ds	-0,59 ^{ns}	0,0944	-0,63 ^{ns}	0,0666
RP	-0,53 ^{ns}	0,1466	-0,65 ^{ns}	0,0566
			Arroz	
			LVd	
PT	0,68*	0,0429	0,75*	0,0203
Ma	0,70*	0,0350	0,75*	0,0207
Mi	-0,73*	0,0245	-0,74*	0,0217
Ds	-0,86**	0,0031	-0,63 ^{ns}	0,0688
RP	-0,97**	0,0001	-0,74*	0,0229
			LVef	
PT	0,60 ^{ns}	0,0878	0,74*	0,0215
Ma	0,59 ^{ns}	0,0952	0,75*	0,0196
Mi	-0,55 ^{ns}	0,1224	-0,76*	0,0170
Ds	-0,60 ^{ns}	0,0887	-0,77*	0,0150
RP	-0,58 ^{ns}	0,1005	-0,71*	0,0314

** significativo a 1%; * significativo a 5%; ^{ns} não significativo.

No conteúdo de água retida na tensão de 0,05 MPa, no LVd, as correlações entre os atributos físicos e a produção de grãos foram significativas e superiores para soja, comparado a 0,01 MPa. Já para o arroz as correlações foram superiores no LVd apenas para a Ds e RP, comparada a tensão de 0,01 MPa. Ainda, a produção de grãos de soja no LVd (Tabela 14) foi reduzida em 48,7 e 17,0% quando a RP passou de 2,04 a 4,18 MPa e de 1,79 a 3,58 MPa, no conteúdo de água retida nas tensões de 0,05 e 0,01 MPa, respectivamente. A maior relação dos atributos físicos com a produção de grãos em menores conteúdos de água no solo é mencionada por DEXTER (1987), que verificou que em baixos conteúdos de água no solo, valores de RP de 1,0 MPa podem restringir o crescimento radicular, e que em solos mais úmidos pode haver crescimento radicular em valores de RP superiores a 4,0 MPa.

As correlações significativas e positivas da Ma com a produção de grãos de soja e arroz no LVd ocorrem, segundo TIMLIM et al. (1994), em virtude do incremento da densidade de macroporos aumentar o crescimento das raízes e a quantidade de solo explorado pelas raízes e, conseqüentemente, proporcionando maior absorção de água e nutrientes, resultando em maior produção de grãos. Entretanto, para o LVeF a correlação foi menor ($r = 0,59$ a $0,75$), em razão da maior PT do solo. Neste sentido, KOPI & DOUGLAS (1991) verificaram que uma grande área de contato das raízes com o solo, espaço poroso suficiente para o movimento de água e gases e baixa RP é a estrutura ideal ao desenvolvimento das plantas; e KOOISTRA et al. (1992) observaram efeitos benéficos com uma pequena compactação em solos muito porosos. MORAES et al. (1998) encontraram correlação de 0,68, significativa a 5% de probabilidade, entre a Ma e a produção de matéria seca de feijão em Latossolo Roxo argiloso e Terra Roxa Estruturada, com Ma acima de $0,18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, no maior nível de compactação.

As maiores correlações dos atributos físicos com a produção de grãos de soja e arroz no LVd mostram a importância da mineralogia caulínica, pois promove a formação da estrutura em blocos com aspecto maciça coesa "in situ", com menor porosidade em relação ao LVeF, cuja mineralogia oxidica promove a formação de microagregados com menos de 0,001 m de diâmetro, formando uma estrutura granular com aspecto maciça porosa "in situ", com maior proporção de poros de maior diâmetro

(FERREIRA et al., 1999). A estrutura granular e a melhor distribuição do sistema radicular das culturas no LVef na tensão de 0,05 MPa foram observadas visualmente, fatores estes responsáveis pela menor redução da produção com o incremento da RP de 13,7 e 18,3% comparado ao LVd com 48,7 e 54,7%, para soja e arroz, respectivamente.

As correlações entre a Ma, Mi, PT, Ds e RP com a produção de grãos, na tensão de 0,05 MPa no LVd, foram próximas para a soja e, a RP seguida da Ds apresentaram as maiores correlações com a produção de arroz nessa condição (Tabela 16). Na tensão de 0,01 MPa no LVd a RP apresentou correlações próximas a Ma, Mi e PT. Já TAYLOR & GARDNER (1963) encontraram maior correlação da RP ($r = -0,96$), comparado a Ds ($r = -0,59$) com o crescimento radicular de algodão. Além disso, a RP é um atributo físico diretamente relacionado com a resposta fisiológica e o crescimento das plantas em solos compactados (LETEY, 1985), e está sendo utilizado como atributo para definir níveis de compactação, a partir do qual devem ser tomadas medidas mecânicas ou biológicas de descompactação, para permitir o adequado desenvolvimento das plantas e maximizar a produção (TORMENA et al., 1998).

CONCLUSÕES

A resistência do solo à penetração, a densidade do solo, a porosidade total, a macro e microporosidade apresentaram correlações altas entre si, nos dois solos e conteúdos de água. O aumento da resistência do solo à penetração, da densidade e microporosidade do solo inicialmente aumentou a produção de grãos de soja e arroz de sequeiro, provocando acentuados decréscimos posteriormente. Os atributos físicos tiveram maiores relações com a produção de grãos no menor conteúdo de água no solo e no Latossolo Vermelho de textura média.

CAPÍTULO 8 – EFEITO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO NO DESENVOLVIMENTO RADICULAR E NA PRODUTIVIDADE DE SOJA

RESUMO – Em solos compactados ocorrem mudanças na distribuição do sistema radicular das plantas em profundidade. Este estudo objetivou avaliar o efeito da compactação no desenvolvimento radicular e na produtividade de soja em Latossolo Vermelho de textura média. O experimento foi conduzido na Universidade Estadual Paulista (UNESP/FCAV), Jaboticabal, SP, Brasil. Os tratamentos foram: T_0 = sem compactação; T_1 = 1 passada; T_2 = 2 passadas; T_4 = 4 passadas; e T_6 = 6 passadas de um trator, uma ao lado da outra sobre a superfície do solo, constituindo o delineamento experimental inteiramente casualizado, com quatro repetições. Em dezembro de 2002 foi semeada a soja (*Glycine max* cv. Embrapa 48) e conduzida conforme a recomendação para a cultura. Após a semeadura, foram coletadas amostras nas profundidades de 0,02-0,05; 0,07-0,10 e 0,15-0,18 m, para as determinações físicas. No estádio R6 foram coletadas amostras de 0,10 m no sentido da linha x 0,20 m no sentido da entrelinha, nas profundidades de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20 m, e na maturação das plantas foi avaliada a produtividade de soja em parcelas de 3,6 m². O aumento da compactação aumentou a densidade radicular o peso de matéria seca das raízes, na profundidade de 0,0-0,05 m, e decréscimo linear nas camadas mais compactadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,15 m. A partir do decréscimo de 18% da densidade radicular, na resistência do solo à penetração de 0,85 MPa, na profundidade de 0,05-0,15 m, ocorreu redução na produtividade de soja. A compactação do solo promoveu modificações na distribuição do sistema radicular de soja.

Palavras-Chave: densidade do solo, resistência à penetração, raízes, produção

INTRODUÇÃO

A soja tem sido amplamente cultivada no Brasil por causa da sua importância alimentar e econômica, sendo crescente a utilização do sistema de plantio direto (SPD) no seu cultivo. Entretanto, o tráfego de máquinas pesadas sobre o solo no SPD tem provocado uma compactação superficial (SILVA et al., 2000b, que tem preocupado vários pesquisadores por reduzir significativamente a produtividade da soja (HAKANSSON & VOORHEES, 1998; BEUTLER & CENTURION, 2003).

Em solos compactados ocorre a alteração da estrutura, refletindo em decréscimo da porosidade, da macroporosidade, na disponibilidade de água e nutrientes e na difusão de gases no solo (TAYLOR & BRAR, 1991), que tem relações importantes com o desenvolvimento das raízes. Segundo QUEIROZ-VOLTAN et al. (2000), em solos compactados as raízes das plantas não utilizam adequadamente os nutrientes disponíveis, uma vez que o desenvolvimento de novas raízes fica prejudicado, as quais são as principais responsáveis pela absorção. Além disso, esses autores mencionam que a quantidade de oxigênio na rizosfera pode ser limitante para os processos metabólicos. Ainda, em solos compactados o menor desenvolvimento do sistema radicular resulta em menor volume de solo explorado pelas raízes, e conseqüentemente menor absorção de água e nutrientes (HAKANSSON et al., 1998).

Estudos mostram que tanto, em vasos, em casa-de-vegetação (ROSOLEM et al., 1994a; QUEIROZ-VOLTAN et al., 2000; GUIMARÃES et al., 2002) como em experimentos de campo (MERTEN & MIELNICZUK, 1991; SILVA et al., 2000a) que as raízes apresentam dificuldades em penetrar as camadas compactadas, promovendo maior desenvolvimento radicular na camada superior ou inferior menos compactada, como forma de contornar a redução do desenvolvimento radicular na camada de solo compactada.

Segundo PABIN et al. (1998), a redução de 40% no comprimento radicular é crítico à produtividade das plantas, em solo arenoso. CINTRA & MIELNICZUK (1983) verificaram redução de 50% no comprimento radicular de várias culturas na resistência do solo à penetração (RP) de 1,10 MPa, em Latossolo Roxo. MIELNICZUK et al. (1985)

verificaram redução de 86% no comprimento radicular da soja, em vasos, quando a RP foi de 2,35 MPa, porém não decrescendo o peso de matéria seca da parte aérea, em Latossolo Roxo. ROSOLEM et al. (1994A), em vasos, verificaram que na RP de 0,69 MPa houve uma redução de 50% no comprimento radicular da soja, em Latossolo Vermelho Escuro. Em geral, tem-se adotado o valor de RP de 2,0 MPa como crítico ao crescimento radicular (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998).

Este estudo objetivou avaliar o efeito da compactação no desenvolvimento radicular e na produtividade de soja em Latossolo Vermelho de textura média.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na Universidade Estadual Paulista (UNESP/FCAV), Jaboticabal, SP, situado nas coordenadas geográficas de 21° 15' 29" de latitude Sul e 48° 16' 53" de longitude Oeste de Greenwich, e altitude média de 607 m O clima é do tipo Cwa, segundo o sistema de classificação de Köppen.

O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico, típico, textura média, A moderado, caulínítico hipoférrico (LVd) (ANDRIOLI & CENTURION, 1999), cuja composição granulométrica foi determinada por meio da dispersão com NaOH (0,1 mol L⁻¹) e agitação lenta durante 16 horas, sendo o conteúdo de argila obtido pelo método da pipeta (GEE & BAUDER, 1986). O LVd apresentou 271 g kg⁻¹ de argila; 42 g kg⁻¹ de silte; 687 g kg⁻¹ de areia, na profundidade de 0,0-0,20 m.

Antes da instalação do experimento, foi realizada uma escarificação do solo até 0,30 m de profundidade, seguido de uma gradagem. Os tratamentos foram: T₀= sem compactação; T₁= 1 passada; T₂= 2 passadas; T₄= 4 passadas e T₆= 6 passadas de um trator de 11 Mg, com os quatro pneus de mesma largura (0,40 m) e pressão interna, uma ao lado da outra, no sentido do declive da área, perfazendo toda a superfície, quando o conteúdo de água no solo estava próximo a capacidade de campo (0,01 MPa).

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com cinco níveis de compactação, quatro repetições e parcelas de 9,0 m².

A caracterização química do solo foi realizada segundo a metodologia citada por RAIJ et al (1987), e a adubação na semeadura foi de 50 kg ha⁻¹ de sulfato de amônio, 125 kg ha⁻¹ de superfosfato triplo e 85 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio, para obtenção da produtividade esperada de soja de 2,5 - 2,9 Mg ha⁻¹, segundo recomendação de RAIJ et al. (1996).

Dia 9 de dezembro de 2002 as sementes de soja (*Glycine max* cv. Embrapa 48) foram inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* e semeadas na profundidade de 0,05 m e espaçamento de 0,45 m entre linhas, no sentido transversal ao declive da área, sendo realizado o desbaste 10 dias após a semeadura, deixando 20 plantas por m linear. O controle de plantas invasoras foi manual.

Após a semeadura, foram coletadas amostras com cilindros de 53,16 x 10⁻⁶ m³ nas profundidades de 0,02-0,05; 0,07-0,10 e 0,15-0,18 m, as quais foram saturadas e submetidas à tensão de 0,006 MPa em câmaras de Richards (KLUTE, 1986) e pesadas ao atingirem o equilíbrio. Em seguida, foram submetidas a tensão de 0,01 MPa, e quando atingiram o equilíbrio foi determinada a resistência do solo à penetração (RP), com duas subdeterminações por amostra, com o penetrômetro eletrônico com velocidade constante de penetração de 0,01 m min⁻¹ e, cone com área de 3,14 x 10⁻⁶ m², conforme descrito por TORMENA et al. (1998). Na seqüência, as amostras foram secas em estufa a + 105 °C durante 24 horas e pesadas para determinação da densidade do solo (BLAKE & HARTGE, 1986b), da porosidade total Segundo DANIELSON & SUTHERLAND (1986), da microporosidade na tensão de 0,006 MPa (KLUTE, 1986) e da macroporosidade por diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

No estágio R6 da soja (Enchimento de grãos), na escala de FEHR et al. (1971), foram retiradas amostras de 0,10 m no sentido da linha x 0,20 m no sentido da entrelinha, a partir da raiz principal das plantas, nas profundidades de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; 0,15-0,20 m. Em seguida, as raízes foram separadas do solo por lavagem em água corrente, utilizando peneira de abertura de malha de 0,005 m. As

imagens das raízes foram digitalizadas em um “scanner” de leitura ótica, na resolução de 200 dpi, e analisadas quanto a densidade, superfície e diâmetro radicular pelo programa “Win Msc Rhyzo”, versão 3.8. Na seqüência as amostras foram secas em estufa a ± 65 °C até peso constante, para determinação do peso da matéria seca. Após a maturação da soja foi determinada a produtividade a partir da parcela útil de 3,6 m².

Os resultados foram submetidos à análise de variância e análise de regressão entre a resistência do solo à penetração com os componentes de desenvolvimento radicular e a produção de grãos de soja.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio dos valores de macroporosidade, Ds e RP (Tabela 17) verifica-se que, onde foi realizado o tráfego com um trator de 11 Mg sobre o solo (T₁ – T₆), ocorreu uma camada mais compactada na profundidade de 0,07-0,10 m, decrescendo a compactação na profundidade de 0,15-0,18 m. SILVA et al. (2000b), em sistemas de plantio direto, também verificaram a formação de uma camada de solo mais compactada na profundidade de 0,075-0,17 m em decorrência do tráfego de colhedora sobre o solo.

Tabela 17. Valores médios dos atributos físicos, do Latossolo Vermelho em diferentes profundidades e níveis de compactação.

Profundidade (m)	Nível de compactação									
	T ₀	T ₁	T ₂	T ₄	T ₆	T ₀	T ₁	T ₂	T ₄	T ₆
	Macroporosidade (m ³ m ⁻³)					Microporosidade (m ³ m ⁻³)				
0,02–0,05	0,28	0,10	0,06	0,05	0,03	0,24	0,29	0,30	0,29	0,29
0,07–0,10	0,24	0,06	0,05	0,04	0,04	0,25	0,29	0,28	0,28	0,28
0,15–0,18	0,18	0,08	0,06	0,05	0,05	0,28	0,30	0,30	0,29	0,28
	Resistência à penetração (MPa*)					Densidade do solo (Mg m ⁻³)				
0,02–0,05	0,21	1,00	1,92	3,58	4,57	1,19	1,54	1,70	1,74	1,80
0,07–0,10	0,32	2,38	2,63	4,40	4,10	1,31	1,68	1,76	1,82	1,81
0,15–0,18	0,65	2,07	3,65	3,64	4,07	1,46	1,64	1,74	1,77	1,78

* Determinação realizada no conteúdo de água retida na capacidade de campo (0,01 MPa).

Por ser a RP o atributo físico do solo atualmente mais utilizado como indicativo da compactação do solo, foram estabelecidas equações de regressão desta com os componentes de desenvolvimento radicular (Figura 7). No tratamento onde o solo foi revolvido e não trafegado (T_0), ocorreu uma melhor distribuição do sistema radicular em profundidade e uma maior concentração de raízes na profundidade de 0,0-0,05 e 0,05-0,10 m, comparado ao solo em que foi realizado a compactação ($T_1 - T_6$), verificado por meio da densidade, superfície e matéria seca das raízes. Na profundidade de 0,0-0,10 m, obteve-se 73% do peso de matéria seca do total até a profundidade 0,20 m (T_0), corroborando com os resultados de MERTEN & MIELNICZUK (1991), que verificaram, na profundidade de 0,0-0,10 m, que o peso de matéria seca de raízes de soja foi de 80% do total até a profundidade de 0,40 m, em sistema de plantio convencional e direto, os quais não diferiram estatisticamente, em Latossolo Roxo. Essa melhor distribuição do sistema radicular na condição de solo solto (T_0) está relacionado a maior porosidade e menor impedimento mecânico ao desenvolvimento radicular.

De modo geral, verifica-se que o aumento de tráfego sobre o solo proporcionou um aumento linear da densidade de raízes e quadrático da superfície radicular na profundidade de 0,0-0,05 m e decréscimo linear na profundidade de 0,05-0,15 m, com menores alterações na profundidade de 0,15-0,20 m (Figura 7). Estes resultados são explicados pelo maior valor de RP na profundidade de 0,07-0,10 m, dificultando a penetração das raízes nessa camada. Segundo BORGES et al. (1988), as raízes das plantas de soja se desenvolvem melhor em pontos de menor RP, razão pela qual ocorrem modificações na morfologia da raiz, como a redução no comprimento radicular quando estas encontram impedimento mecânico. BENGOUGH & MULLINS (1990) afirmam que o menor crescimento radicular em solos compactados ocorre em decorrência da menor taxa de alongação celular em razão da diminuição na taxa de divisão celular do meristema.

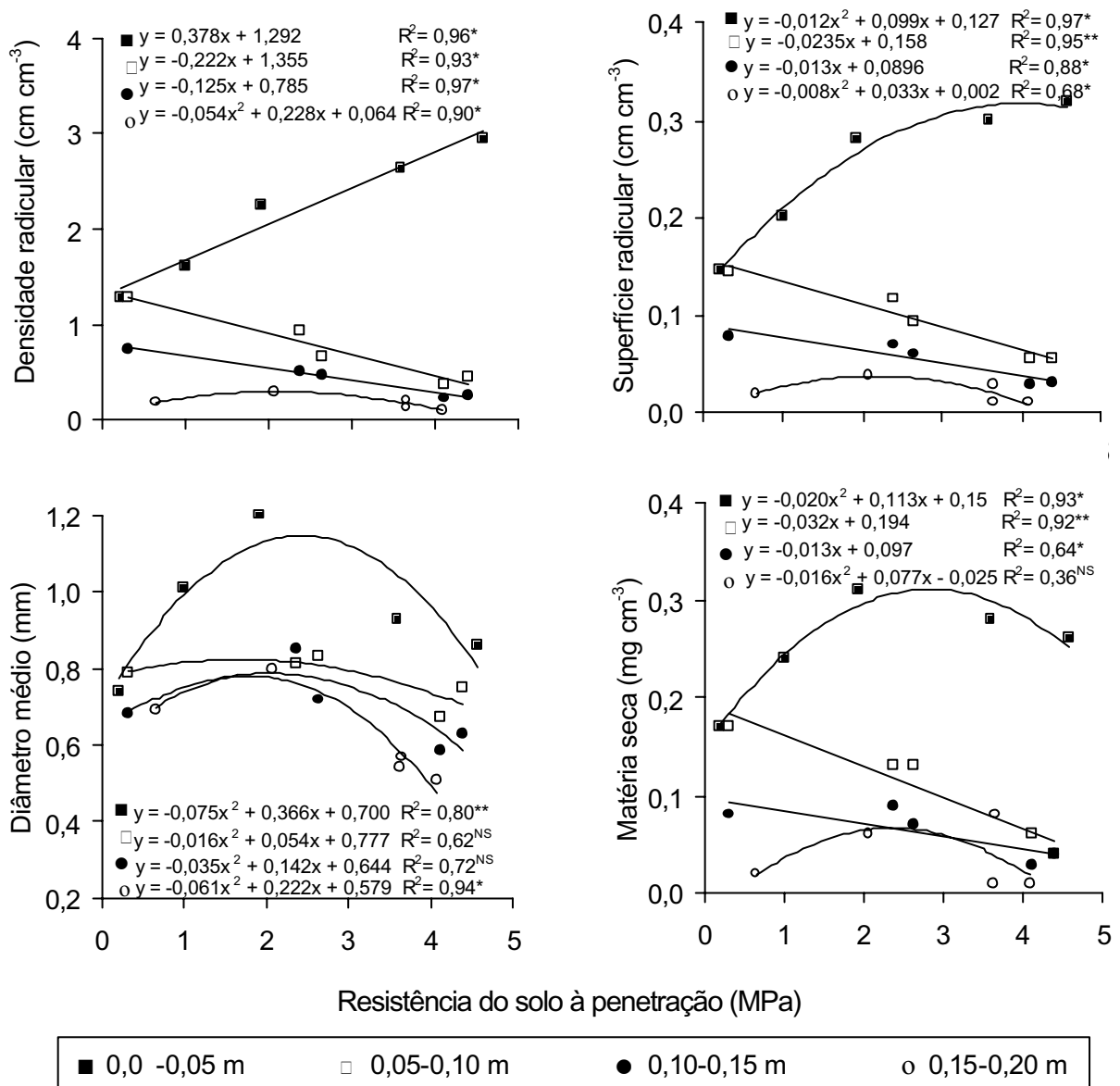


Figura 7. Regressão entre os componentes de desenvolvimento radicular com a resistência do solo à penetração, nas profundidades de 0,0-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,15; e 0,15-0,20 m, no Latossolo Vermelho.

Observou-se maior densidade e superfície radicular na profundidade de 0,0-0,05 m, com o aumento da RP na profundidade de 0,05-0,15 m, corroborando com SILVA et al. (2000a), que verificaram maior densidade radicular de milho na camada de 0,0-0,05 m em plantio direto comparado ao sistema convencional, em Podzólico Vermelho

Amarelo. Esse aumento na densidade radicular na camada de 0,0-0,05 m está associado a menor crescimento radicular na camada compactada, como também verificado por (ROSOLEM et al., 1994a). Segundo CAMARGO & ALLEONI (1997), o aumento da compactação e conseqüente redução do tamanho dos poros a ponto de impedir a passagem da raiz principal leva a planta a utilizar-se do mecanismo de defesa, que é a expansão de raízes laterais com diâmetros menores, que se proliferam lateralmente e formam um sistema radicular muito denso e raso, que no campo dificilmente sobrevive a condições de seca.

Na profundidade de 0,15-0,20 m, verifica-se que ocorreu um pequeno aumento na densidade, superfície e diâmetro das raízes com o aumento da RP, diminuindo posteriormente. Isso possivelmente ocorreu em razão do decréscimo no desenvolvimento radicular na profundidade de 0,05-0,15 m que gerou a necessidade da planta em aumentar o desenvolvimento radicular nessa camada um pouco menos compactada e na superfície, conforme mencionado por QUEIROZ-VOLTAN et al. (2000). No entanto, a partir do valor de RP próximo a 2,5 MPa o decréscimo do desenvolvimento radicular na profundidade de 0,05-0,15 m refletiu no decréscimo na profundidade de 0,15-0,20 m. Essa característica das plantas de soja em tentar suprir o menor desenvolvimento radicular na camada compactada, aumentando o desenvolvimento radicular nas regiões superior e inferior menos compactadas, de forma a contornar os efeitos supressivos da compactação também foram observados por NOGUEIRA & MANFREDINI (1983) para a cultivar Santa Rosa e por ROSOLEM et al. (1994a) para a cultivar primavera, em experimentos com vasos.

GUIMARÃES et al. (2002) estudando compactação do solo em superfície para o feijão, em vasos, verificaram que na camada superficial de solo compactada a densidade radicular e o peso de matéria seca diminuíram e a espessura das raízes aumentou com o aumento da compactação e abaixo da camada compactada de 0,20 m ocorreu aumento na densidade radicular com o aumento da compactação na camada superior.

Em relação ao diâmetro médio das raízes, não foram verificadas alterações na camada compactada de 0,05-0,15 m, corroborando com ROSOLEM et al. (1994a), para

soja. Segundo MATERECHERA et al. (1992), isso ocorre em decorrência da proliferação de raízes finas laterais em camadas menos compactadas, causada pela inibição do alongamento na região apical das raízes, conforme observada nesse estudo na profundidade de 0,0-0,05 m. Entretanto, BENGOUGH & MULLINS (1990) e GUIMARÃES et al. (2002) verificaram que o diâmetro médio das raízes aumentou na camada compactada.

Por meio dos componentes de desenvolvimento radicular na profundidade de 0,0-0,20 m (Figura 8), verifica-se que a densidade e a superfície radicular não diferiram significativamente com o aumento da RP, e o diâmetro médio e o peso de matéria seca aumentaram até a RP de 2,07 e 1,99 MPa, respectivamente, decrescendo posteriormente. Esses resultados corroboram com QUEIROZ-VOLTAN et al. (2000), que verificaram que a densidade de raízes de soja (cv. IAC 14) não diferiram com o aumento da compactação e o peso da matéria seca das raízes aumentou inicialmente, diminuindo com o aumento da compactação do solo, na profundidade de 0,0-0,20 m. O aumento do peso seco das raízes de soja com um pequeno aumento da compactação e um decréscimo posterior também foi verificado por MORAES et al. (1995). Estes resultados indicam que o desenvolvimento de raízes em solos compactados deve ser estudado por camadas, no sentido de avaliar a sua distribuição no perfil de solo.

Os resultados de desenvolvimento de raízes obtidos por meio de avaliações quantitativas são confirmados ao visualizar-se os perfis apresentados na Figura 9. Verifica-se que do menor para o maior nível de RP (média de 0,0-0,20 m) ocorrem mudanças na distribuição do sistema radicular e aumento da espessura das raízes na camada mais compactada de 0,05-0,15 m. Observa-se ainda, que na profundidade de 0,0-0,05 m o solo está visualmente menos compactado e que aumenta a concentração de raízes finas nessa camada com o aumento da RP. Ainda, visualiza-se um ligeiro espelhamento no perfil a partir da RP de 1,82 MPa, que se torna mais visível a partir da RP de 3,87 MPa e, que a camada compactada aumenta em profundidade no maior valor de RP de 4,25 MPa. É destacável ainda, o espessamento das raízes principais a partir da RP de 3,87 MPa e o seu crescimento nos planos verticais de fraqueza (rachaduras), em que ocorrem espaços livres para seu desenvolvimento, confirmando

os estudos de BARBIERI et al. (1985), que mencionam que a compactação do solo não se apresenta de forma contínua ao longo de grandes extensões e que em solos compactados as raízes se desenvolvem através dos planos verticais de fraqueza.

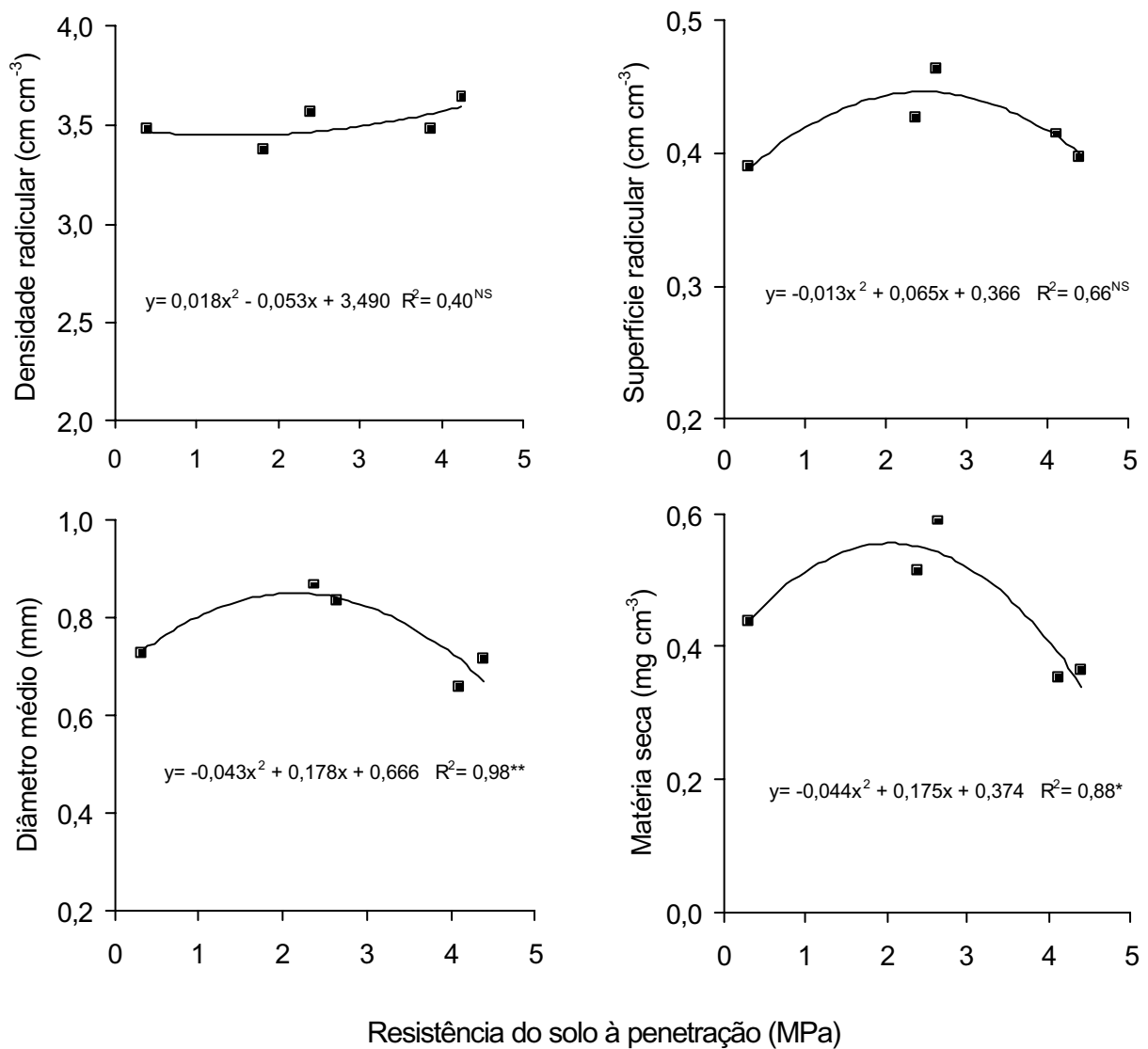


Figura 8. Regressão entre os componentes de desenvolvimento radicular com a resistência do solo à penetração, na média de 0,0-0,20 m, no Latossolo Vermelho.

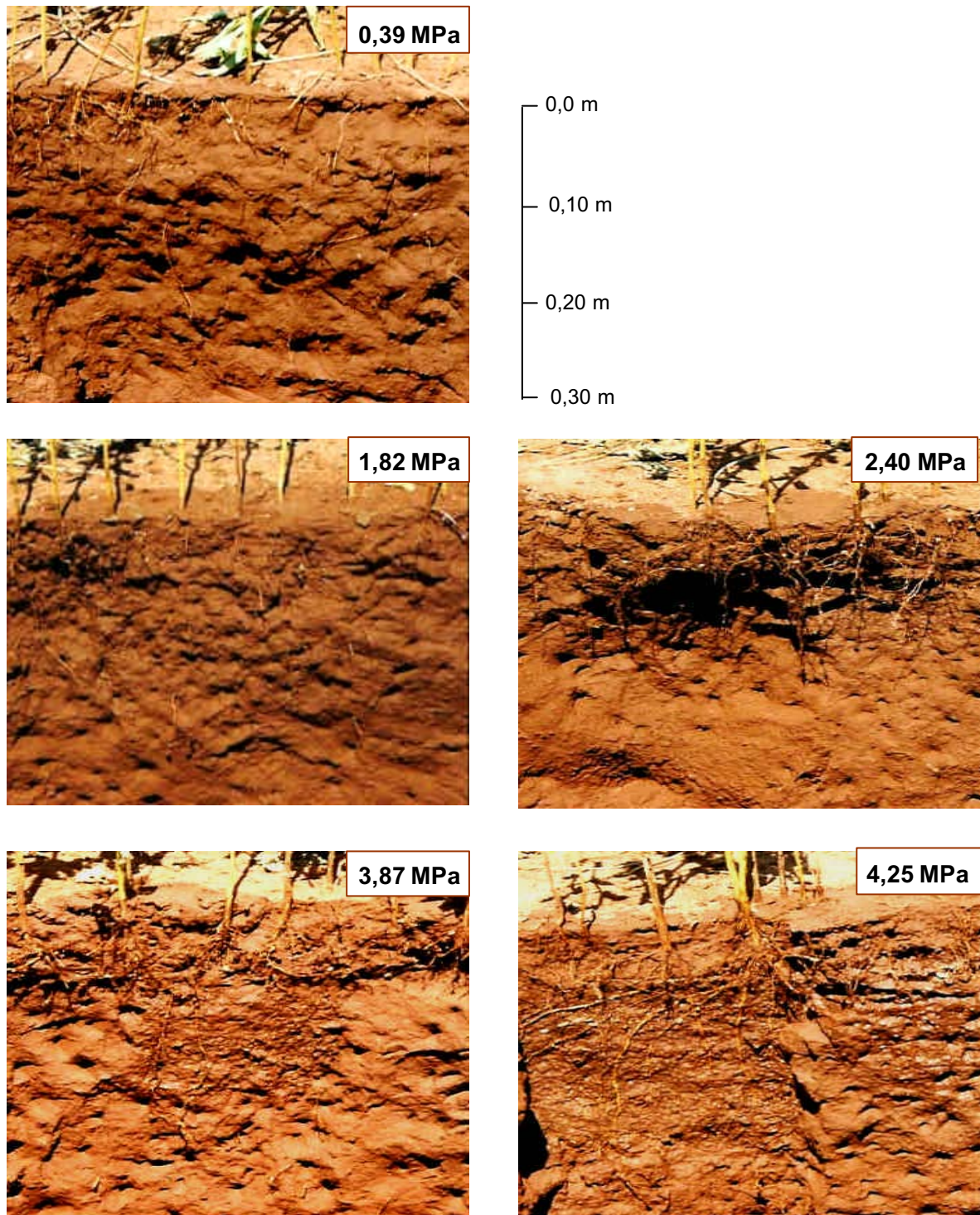


Figura 9. Perfil do desenvolvimento radicular de soja até 0,30 m de profundidade, em diferentes valores de resistência do solo à penetração, no Latossolo Vermelho.

Tão importante quanto o desenvolvimento radicular é a determinação do valor crítico de RP ao desenvolvimento radicular e sua relação com a produção de soja. Desta forma, foi estabelecida a equação de regressão quadrática entre a RP e a produtividade de soja (Figura 10a), sendo obtido o valor de RP de 0,85 MPa como valor a partir do qual a produção de soja decresceu. Este valor é inferior ao preconizado como crítico de 2,0 MPa (TORMENA et al., 1998). Inserindo o valor de RP de 0,85 MPa em substituição a variável independente (x) da equação linear da densidade radicular (Figura 7), na profundidade de 0,05-0,10 e 0,10-0,15 m e somando-se o valor das duas, obteve-se redução de 18% na densidade radicular. Esse valor é inferior à redução de 40% do comprimento radicular considerado crítico à produção das culturas, por PABIN et al. (1998). Isso pode ter ocorrido em razão da resposta diferenciada das culturas à compactação do solo. Por outro lado, verifica-se aumento linear no comprimento radicular na profundidade de 0,0-0,05 m, que possivelmente tiveram menor importância no suprimento de água e nutrientes à planta, uma vez que a adubação foi realizada na profundidade de $\pm 0,10$ m e que o conteúdo de água na camada superficial é menor e aumenta em profundidade (Figura 10b). Menor conteúdo de água na profundidade de 0,0-0,5 m, em condições de menor conteúdo de água no solo, em plantio direto, também foi encontrado por SILVA et al. (2000b).

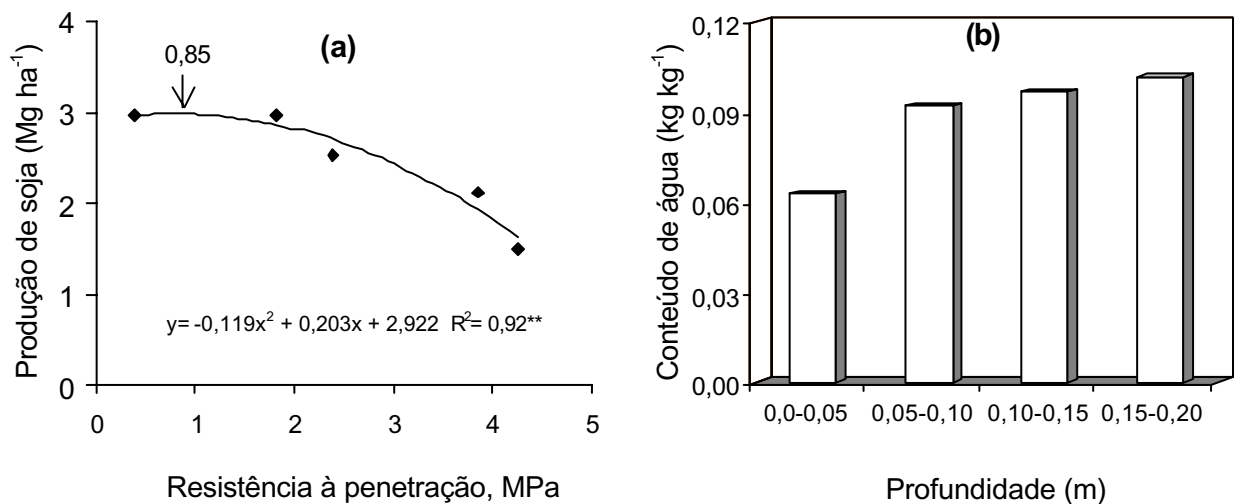


Figura 10. Regressão entre a RP e a produção de soja (a), e conteúdo de água em diferentes camadas, em condição de menor conteúdo de água no solo (b).

Desta forma, em sistema de plantio direto, a alteração na distribuição de raízes em profundidade, aumentando a concentração de raízes na camada superficial de 0,0-0,05 m torna-se fator limitante à obtenção de produtividade adequada de soja, principalmente em condições de menor conteúdo de água no solo, conforme também mencionado por CAMARGO & ALLEONI (1997).

CONCLUSÕES

O aumento da compactação proporcionou aumento na densidade, na superfície e no peso de matéria seca das raízes, na profundidade de 0,0-0,05 m, e decréscimo linear nas camadas mais compactadas de 0,05-0,10 e 0,10-0,15 m.

Na média de 0,0-0,20 m de profundidade não houve diferença na densidade e superfície radicular, e o diâmetro médio aumentou até a resistência à penetração de 2,07 MPa e matéria seca até 1,99 MPa.

A partir do decréscimo de 18% da densidade radicular, na RP de 0,85 MPa, na profundidade de 0,05-0,15 m, ocorreu redução na produtividade de soja.

A compactação do solo promoveu alterações na distribuição do sistema radicular e na produtividade de soja.

CAPÍTULO 9 – RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO, INTERVALO HÍDRICO ÓTIMO E PRODUTIVIDADE DE SOJA

RESUMO – A compactação do solo impede a penetração e ramificação das raízes no solo, culminando com a redução da produtividade. Este estudo teve o objetivo de determinar a relação da resistência do solo à penetração (RP), do intervalo hídrico ótimo (IHO) e da densidade do solo crítica (Dsc) com a produção de grãos de soja em um Latossolo Vermelho de textura média (LVd). O experimento foi conduzido na Universidade Estadual Paulista (UNESP/FCAV), Jaboticabal, SP. Os tratamentos de compactação foram: T₀= sem compactação; T₁= 1 passada; T₂= 2 passadas; T₄= 4 passadas e T₆= 6 passadas de trator uma ao lado da outra, na superfície do solo, constituindo o delineamento experimental inteiramente casualizado, com quatro repetições. Foram coletadas amostras nas profundidades de 0,02-0,05; 0,07-0,10 e 0,15-0,18 m, das quais utilizou-se uma média de 0,0-0,20 m, para determinação da RP, IHO, Dsc, Ds e da curva de retenção de água no solo. Em dezembro de 2002 foi semeada a soja (*Glycine max* cv. Embrapa 48) e conduzida conforme a recomendação para a cultura. Foram avaliados a altura das plantas, número de vagens, matéria seca da parte aérea, peso de 100 sementes e produtividade em parcelas úteis de 3,6 m². A produtividade de soja decresceu a partir da RP de 0,85 MPa e da densidade do solo de 1,48 Mg m⁻³. O intervalo hídrico ótimo foi limitado na parte superior pelo conteúdo de água na capacidade de campo (0,01 MPa) e na parte inferior pelo conteúdo de água em que a RP foi crítica, atingindo a densidade do solo crítica ao crescimento radicular em 1,48 Mg m⁻³. O tráfego do solo com um trator de 11 Mg, no conteúdo de água equivalente a capacidade de campo (0,01 MPa), compactou o solo e reduziu a produtividade de soja em até 45,6%.

Palavras-Chave: conteúdo de água, resistência à penetração, densidade do solo

INTRODUÇÃO

A soja é uma das principais culturas de grãos do Brasil, com incrementos anuais na produtividade média, graças aos grandes investimentos realizados na área de insumos agrícolas. Entretanto, o aumento da utilização do sistema de plantio direto para o cultivo da soja tem provocado uma compactação superficial do solo que resulta em significativas reduções na produtividade e acréscimos nos custos de produção (RALISCH & TAVARES FILHO, 2002). Apesar da dificuldade em quantificá-la, o conhecimento dos níveis de compactação, a partir dos quais ocorre redução da produção das culturas, são importantes no manejo adequado dos solos, a fim de que possam ser adotadas medidas preventivas e corretivas a cada tipo e condição de solo, para melhorar a qualidade do solo e maximizar a produção.

A compactação do solo de origem antrópica, é formada pelas forças mecânicas relacionadas principalmente ao tráfego intenso de máquinas e equipamentos pesados sobre o solo em condições de excessivo conteúdo de água. Essa compactação é uma alteração estrutural do solo que resulta em menor penetração e ramificação das raízes, podendo afetar o desenvolvimento vegetativo da parte aérea das plantas. Isto ocorre por causa da reorganização das partículas e dos agregados do solo, que provocam a redução da porosidade total e da macroporosidade, prejudicando a infiltração e o movimento da água e disponibilidade de nutrientes no solo (HAKANSSON & VOORHEES, 1998; RALISCH & TAVARES FILHO, 2002; GOEDERT et al., 2002).

Alguns atributos físicos são utilizados para caracterizar a compactação do solo, entre estes, a infiltração de água, a porosidade, a densidade do solo e a resistência do solo à penetração (RP). Atualmente, a RP tem sido utilizada como o atributo físico indicativo da compactação do solo em sistemas de manejo (IMHOFF et al., 2000; BEUTLER et al., 2001) por estar diretamente relacionado ao crescimento das plantas (LETEY, 1985) e por apresentar forte relação com o crescimento radicular das plantas (HOAD et al., 2001). Entretanto, a RP apresenta valores 2 a 8 vezes superior a máxima pressão axial que a raiz pode exercer (MISRA et al., 1986) e é acentuadamente influenciada pelo conteúdo de água, textura e pela condição estrutural do solo

(HAMBLIM, 1985; TARDIEU, 1994), fatores que dificultam a obtenção de valores críticos ao desenvolvimento das culturas.

Neste sentido, o conteúdo de água na capacidade de campo é considerado ideal quando se determina a RP e ao crescimento radicular (SMITH et al., 1997), sendo geralmente o conteúdo de água utilizado na maioria dos estudos em que é determinada a RP, a fim de que seja possível fazer inferência com relação ao valor crítico de 2,0 MPa (SILVA et al., 1994).

Valores de RP restritivos ao desenvolvimento radicular situam-se entre 1,5 a 4,0 MPa, sendo, em geral aceito o valor de 2,0 MPa (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998; IMHOFF et al., 2001). Neste contexto, GOEDERT et al. (2002) verificaram que a RP de 1,1 MPa não afetou a produção de soja em Latossolo Vermelho Amarelo muito argiloso e Latossolo Vermelho argiloso e, SILVA et al. (2000b) verificaram que a cultura da soja teve uma produtividade adequada na RP de 1,5 MPa, em Latossolo Vermelho argiloso. Já, MIELNICZUK et al. (1985), em casa de vegetação, não observaram alteração no crescimento da parte aérea da soja até a RP de 2,35 MPa, em Latossolo Roxo.

Para avaliar a compactação e a qualidade do solo para o desenvolvimento radicular, além da RP, surgiu o intervalo hídrico ótimo (IHO), índice proposto por LETEY (1985) e desenvolvido por SILVA et al. (1994), sendo, no Brasil, os primeiros estudos realizados por TORMENA et al. (1998). Este indicador define o conteúdo de água do solo ideal, na qual as limitações ao crescimento das raízes por causa da água disponível, aeração e RP são mínimas.

O IHO integra os atributos físicos que atuam diretamente no crescimento das plantas. O limite superior é o conteúdo de água na capacidade de campo na tensão de 0,01 MPa (REICHARDT, 1988) ou o conteúdo de água no qual a porosidade de aeração é de 10% (GUPTA & ALLMARAS, 1987), sendo limitante o atributo que primeiro apresenta valores críticos; e o limite inferior o conteúdo de água no ponto de murcha permanente na tensão de 1,5 MPa (SAVAGE et al., 1996) ou a RP de 2,0 MPa (SILVA et al., 1994). SILVA & KAY (1996) verificaram que a ocorrência de conteúdos de água fora dos limites do IHO restringiu o crescimento das plantas de milho. No entanto,

são escassos os estudos que relacionam o IHO com a produção de soja, em especial nos solos tropicais do Brasil.

O conteúdo de água em que a RP é de 2,0 MPa é fator que mais reduz o IHO em solos compactados (SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998; IMHOFF et al., 2001). Neste sentido, a definição do nível de RP crítico às culturas em solos tropicais e sua inserção no IHO aumenta a sua precisão para aplicação no manejo do solo.

O incremento da densidade do solo reduz o IHO até atingir o valor zero (SILVA et al., 1994; IMHOFF et al., 2000, 2001), quando ocorre o valor de densidade do solo crítica (Dsc) ao crescimento radicular e quando são indispensáveis medidas corretivas para a descompactação do solo e para evitar perdas na produção das culturas. Entretanto, há necessidade de estudos para relacionar estes atributos físicos com a produção das culturas e definir valores aplicáveis no campo.

Este estudo teve o objetivo de determinar a relação da resistência do solo à penetração e do intervalo hídrico ótimo com a produção de grãos de soja em um Latossolo Vermelho de textura média.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na Universidade Estadual Paulista (UNESP/FCAV), Jaboticabal, SP, situado nas coordenadas geográficas de 21° 15' 29" de latitude Sul e 48° 16' 53" de longitude Oeste de Greenwich, e altitude média de 607 m. O clima é do tipo Cwa, segundo o sistema de Köppen. As precipitações pluviais diárias durante o ciclo da cultura (dezembro a março) são apresentadas na Figura 11.

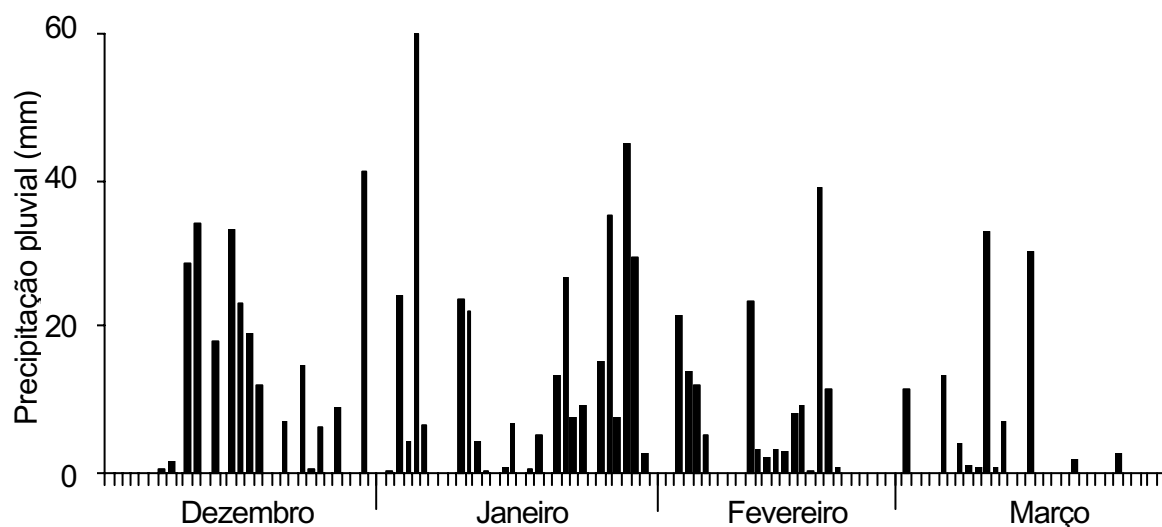


Figura 11. Precipitação pluviométrica diária durante o ciclo da soja, nos anos agrícolas 2002/03.

Utilizou-se um Latossolo Vermelho distrófico, típico, textura média, A moderado, caulinitico hipoférrico (LVd) (ANDRIOLI & CENTURION, 1999), cuja composição granulométrica foi determinada em amostras deformadas por meio da dispersão com NaOH ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$) e agitação lenta durante 16 horas, sendo o conteúdo de argila obtido pelo método da pipeta (GEE & BAUDER, 1986). O LVd apresentou 271 g kg^{-1} de argila; 42 g kg^{-1} de silte; 687 g kg^{-1} de areia; e densidade de partículas de $2,82 \text{ Mg m}^{-3}$, na profundidade de 0,0-0,20 m.

Antes da instalação do experimento foi realizada uma escarificação do solo até $\pm 0,30 \text{ m}$ de profundidade, seguida de uma gradagem para nivelar o solo. A compactação foi realizada por meio de passadas, uma ao lado da outra, de um trator de 11 Mg com os quatro pneus de 0,40 m de largura e mesma pressão interna, perfazendo toda a superfície do solo. Um dia após uma precipitação pluviométrica intensa, quando o conteúdo de água estava próximo a capacidade de campo ($0,01 \text{ MPa}$) foram estabelecidos os tratamentos de compactação: T_0 = sem compactação; T_1 = 1 passada; T_2 = 2 passadas; T_4 = 4 passadas e T_6 = 6 passadas de trator sobre o solo.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com cinco níveis de compactação e quatro repetições, sendo as parcelas de $9,0 \text{ m}^2$.

O solo foi analisado quimicamente segundo metodologia citada por RAIJ et al. (1987) e, na semeadura, adubado com 50 kg ha⁻¹ de sulfato de amônia, 125 kg ha⁻¹ de superfosfato triplo e 85 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio, para obtenção da produtividade esperada de soja de 2,5 - 2,9 Mg ha⁻¹, segundo RAIJ et al. (1996). Dia nove de dezembro de 2002 foi realizada a semeadura da soja (*Glycine max* cv. Embrapa 48) na profundidade de 0,05 m e espaçamento de 0,45 m entre linhas, sendo realizado o desbaste 10 dias após a semeadura, deixando 20 plantas por m linear. Foi realizado controle manual de plantas invasoras. Foram avaliadas a altura, número de vagens e matéria seca da parte aérea por planta, peso de 100 sementes e produção de grãos de soja por hectare, a partir da parcela útil de 3,6 m².

Após a semeadura, foram coletados dois grupos de seis amostras indeformadas, com cilindros de 53,16 x 10⁻⁶ m³, nas profundidades de 0,02 – 0,05; 0,07 – 0,10 e 0,15 – 0,18 m, totalizando 36 amostras por tratamento. Essas amostras foram saturadas e submetidas as tensões de 0,006; 0,01; 0,033; 0,06; 0,1 e 0,3 MPa, em câmaras de Richards (KLUTE, 1986), sendo uma amostra de cada grupo por tensão. Ao atingir o equilíbrio foi realizada a pesagem das amostras e duas sub-determinações de resistência do solo à penetração (RP) por amostra, na profundidade de 0,01 a 0,02 m, perfazendo 100 leituras por amostra, as quais foram utilizadas para obtenção da RP média. A RP foi determinada com o penetrômetro eletrônico com velocidade constante de penetração de 0,01 m min⁻¹, equipado com atuador linear e célula de carga de 20 kg acoplada a um microcomputador, e cone com área de 3,14 x 10⁻⁶ m², conforme descrito por TORMENA et al. (1998).

Após a determinação da RP, as amostras foram secas em estufa a ± 105 °C por 24 horas. Nestas amostras foram determinados o conteúdo de água retida em cada tensão (KLUTE, 1986) e a densidade do solo (BLAKE & HARTGE, 1986b). A função entre conteúdo de água do solo e tensão, i.e. as curvas de retenção de água, foram ajustadas pelo modelo proposto por GENUCHTEN (1980). A partir do modelo ajustado aos dados foi estimado o conteúdo de água na capacidade de campo (tensão de 0,01 MPa) e no ponto de murcha permanente (tensão de 1,5 MPa).

Os valores de RP foram ajustados em função do conteúdo de água volumétrico e da Ds utilizando o modelo não-linear proposto por BUSSCHER (1990), na sua forma log-transformada, descrito a seguir:

$$\ln RP = \ln a + b \ln \theta + c \ln Ds \quad (1)$$

em que a RP é a resistência do solo à penetração (MPa), θ o conteúdo de água volumétrico ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), Ds a densidade do solo (Mg m^{-3}) e a , b e c são os coeficientes obtidos por meio do ajuste do modelo aos dados. Os coeficientes ajustados foram significativos a 1% de probabilidade, com valores de $-8,3736$; $-3,16505$ e $9,46211$, para a , b e c , respectivamente. Os valores de RP utilizados na elaboração do modelo variaram de $0,05$ - $18,90$ MPa; θ de $0,10$ a $0,30 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$; e Ds de $1,11$ a $1,84 \text{ Mg m}^{-3}$.

O conteúdo de água em que a RP foi crítica foi calculado pela equação (2) obtida de (1), a seguir:

$$\theta_{(RP_{\text{crit.}})} = RP_{(\text{crit.})} / (e^{a*} (Ds^c))^{1/b} \quad (2)$$

O conteúdo de água em que a porosidade de aeração é de 10% foi obtida pela equação a seguir:

$$\theta_{PA} = \theta_S - 0,10 \quad (3)$$

em que θ_{PA} é o conteúdo de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) em que a porosidade de aeração de 10% é crítica e θ_S é o conteúdo de água quando o solo está saturado ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

O conteúdo volumétrico de água do solo nos valores críticos de RP foi obtido utilizando os níveis de RP críticos obtidos no experimento de produção de grãos de soja. Os valores críticos de RP correspondem a RP determinada no conteúdo de água na capacidade de campo de $0,01$ MPa (REICHARDT, 1988).

Os modelos do IHO ajustados para cada profundidade convergiram para o mesmo resultado. Assim, foi ajustado um modelo com todos os dados das três profundidades. Desta forma, os dados de produção de soja foram discutidos com os valores dos atributos físicos obtidos da média das três profundidades (Tabela 18).

Tabela 18. Valores médios de resistência do solo à penetração e densidade do solo nos diferentes tratamentos e profundidades, no LVd.

Profundidade m	Resistência à penetração (MPa)*					Densidade do solo (Mg m ⁻³)				
	T ₀	T ₁	T ₂	T ₄	T ₆	T ₀	T ₁	T ₂	T ₄	T ₆
0,02–0,05	0,21	1,00	1,92	3,58	4,57	1,19	1,54	1,70	1,74	1,80
0,07–0,10	0,32	2,38	2,63	4,40	4,10	1,31	1,68	1,76	1,82	1,81
0,15–0,18	0,65	2,07	3,65	3,64	4,07	1,46	1,64	1,74	1,77	1,78
Média	0,39	1,82	2,40	3,87	4,25	1,32	1,62	1,73	1,78	1,80

* Determinação realizada no conteúdo de água retida na capacidade de campo (0,01 MPa).

Os resultados foram submetidos à análise de variância e análise de regressão entre a RP e a densidade do solo com os componentes de desenvolvimento da soja.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A altura das plantas decresceu a partir da RP de 1,46 MPa, e o peso da matéria seca da parte aérea e o número de vagens por planta diminuíram linearmente a partir da RP de 0,39 MPa (Figura 12). MIELNICZUK et al. (1985) verificaram menor peso de matéria seca da parte aérea de soja a partir da RP de 2,35 MPa, em Latossolo Roxo, em casa de vegetação. BEUTLER & CENTURION (2003) verificaram, em casa de vegetação, que a produção de matéria seca da parte aérea decresceu a partir da RP de 2,12 e 2,69 MPa, em Latossolo Vermelho distrófico e Latossolo Vermelho eutrófico, respectivamente, no conteúdo de água retida na tensão de 0,01 MPa.

Segundo HAKANSSON & VOORHEES (1998) e RALISCH & TAVARES FILHO (2002), o menor desenvolvimento da parte aérea em solos compactados ocorre por causa da redução da penetração e da ramificação das raízes em consequência da resistência mecânica do solo, e em decorrência da menor infiltração e movimento da água e disponibilidade de nutrientes no solo. De acordo com HOAD et al. (2001), em solos compactados ocorre a redução no comprimento e maior espessura radicular que

diminui a área de contato do solo com as raízes e, estas possuem menor resistência de transporte no xilema em relação as raízes mais finas.

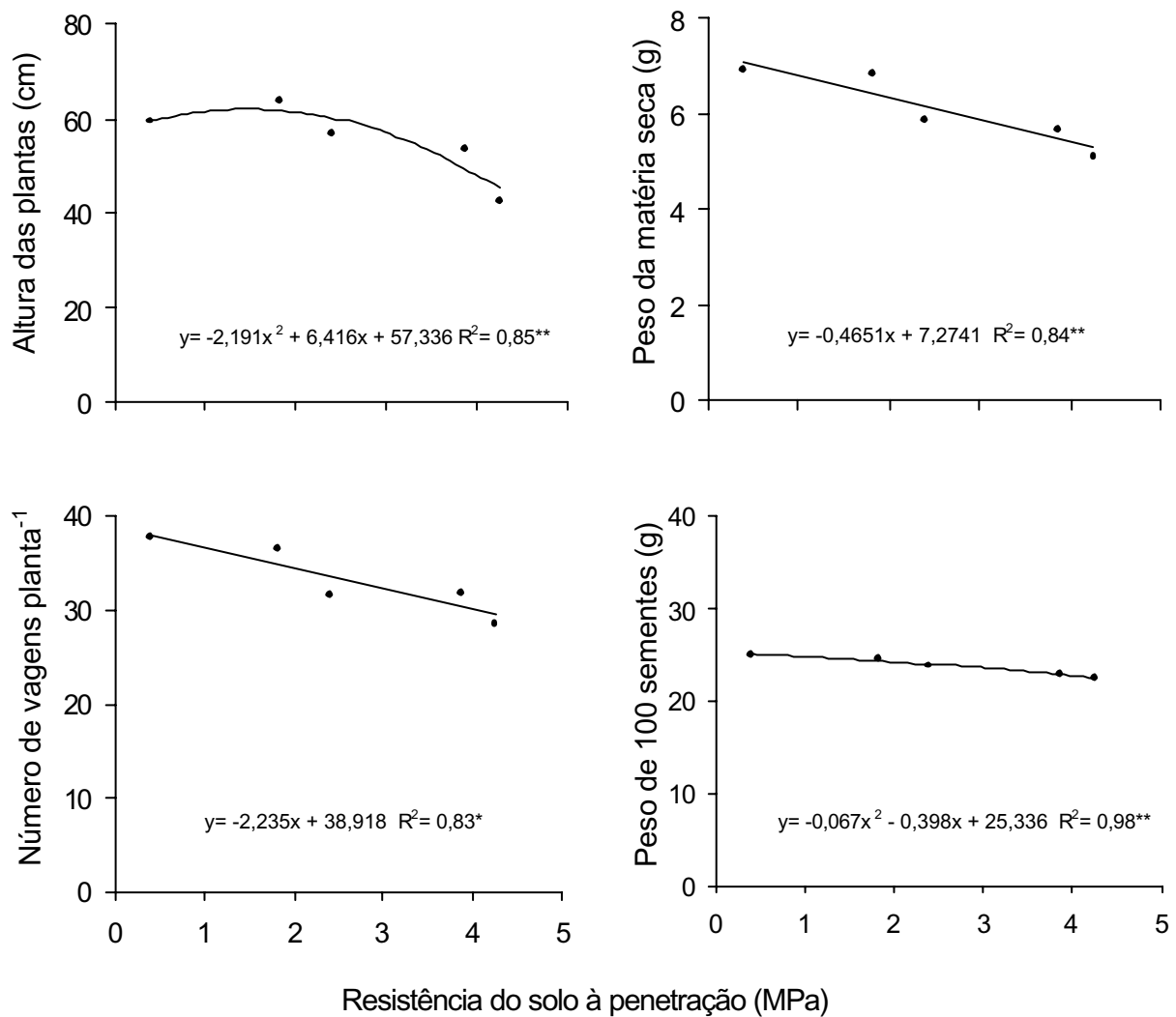


Figura 12. Regressão entre resistência do solo à penetração e altura das plantas, peso da matéria seca da parte aérea, número de vagens por planta e peso de 100 sementes. **, * Significativo a 1 e 5% de probabilidade.

Em relação ao peso de 100 sementes, por meio da análise de variância não foram verificadas diferenças significativas entre os valores de RP, apesar de apresentar uma decréscimo quadrático com o aumento da RP (Figura 12).

A produtividade máxima de soja foi de $2,975 \text{ Mg ha}^{-1}$, condizente com relação a quantidade de adubo utilizado e a produtividade esperada, e decresceu a partir da RP de 0,85 MPa e da Ds de $1,48 \text{ Mg m}^{-3}$ (Figura 13). BEUTLER & CENTURION (2003), em casa de vegetação, obtiveram decréscimo da produtividade de soja a partir da RP de 2,22 e 1,66 MPa para o conteúdo de água retida nas tensões de 0,01 e 0,05 MPa, respectivamente. O valor a partir do qual a produtividade de soja decresceu no campo foi menor possivelmente em decorrência das maiores variações no conteúdo de água no solo (Figura 11), que tem relação direta com o valor de RP crítico, segundo DEXTER (1987) e TARDIEU (1994).

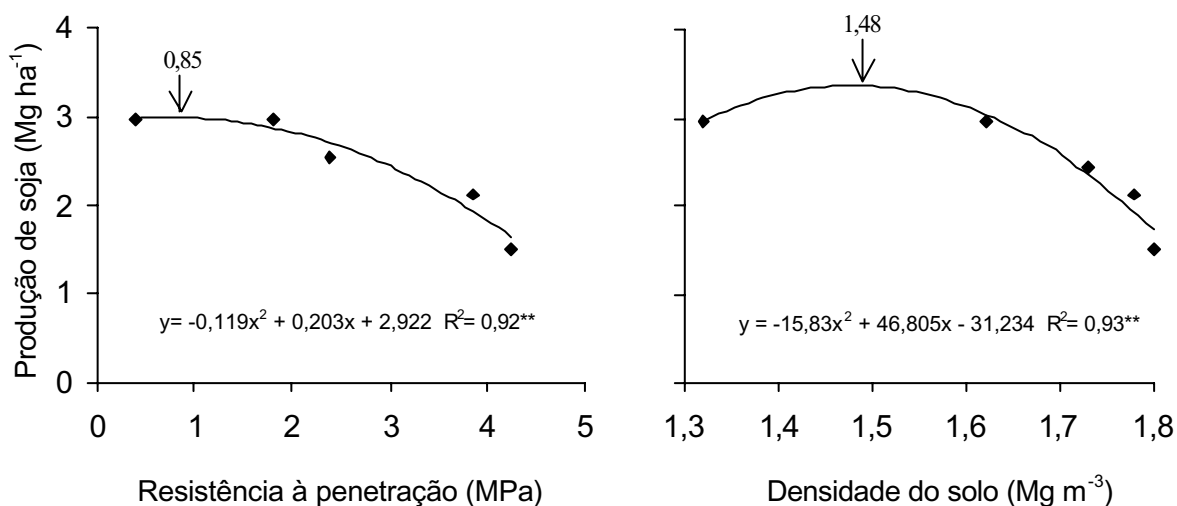


Figura 13. Regressão entre a resistência do solo à penetração e a densidade do solo com a produção de grãos de soja no LVd (n= 4). ** Significativo a 1% de probabilidade de erro.

Na literatura são mencionados valores de RP de 2,0 MPa (SILVA et al., 1994) e de Ds de 1,55 Mg m⁻³ para solos franco-argilosos (CAMARGO & ALLEONI, 1997) como críticos ao crescimento radicular. Desta forma, por meio das regressões quadráticas ajustadas aos dados de RP e Ds com a produtividade de soja, verificou-se decréscimo na produtividade de 5,18 e 2,28%, respectivamente, para os valores críticos de RP e Ds. Entretanto, é importante mencionar que o valor crítico de RP é variável com o tipo de solo, conforme verificado por BEUTLER & CENTURION (2003). Neste contexto, SILVA et al. (1994) afirmam que a seleção de valores críticos de RP modifica a sensibilidade e a precisão do IHO.

Na Figura 14, verifica-se que a partir da Ds de 1,13 Mg m⁻³ o IHO é limitado na parte inferior pela RP, ou seja, a θ em que a RP de 0,85 MPa foi crítica a produtividade da soja foi fator limitante do IHO e o limite superior foi o conteúdo de água na capacidade de campo. TORMENA et al. (1998) e IMHOFF et al. (2001) também verificaram que, em solos tropicais, o IHO foi limitado na parte inferior pela RP e na superior pelo conteúdo de água na capacidade de campo, fato que evidencia a importância em determinar os valores críticos de RP para as diferentes culturas e tipos de solos. Os estudos com IHO indicam que em solos tropicais o IHO é limitado pela curva de RP até a Dsc que é o valor de IHO igual a zero, quando o valor numérico do limite superior é igual ao limite inferior (IMHOFF et al., 2001). Assim, IMHOFF et al. (2000) verificaram que a curva de RP pode ser utilizada para orientar práticas de manejo visando a manutenção da qualidade física para o desenvolvimento das plantas.

O IHO variou negativamente com o aumento da Ds, com amplitude inicial de 0,095 m³ m⁻³, e decrescendo acentuadamente até atingir a zero denominado Dsc de 1,48 Mg m⁻³. TORMENA et al. (1998) verificaram amplitude do IHO de 0,118 m³ m⁻³ em Latossolo Roxo argiloso, contradizendo os estudos de SILVA et al. (1994) que menciona que o IHO está negativamente correlacionado com a textura do solo. Isto ocorre por causa da mineralogia oxidica do Latossolo Roxo que promove a formação de uma estrutura granular forte muito pequena, com maior espaço poroso (FERREIRA et al., 1999), comparado ao Latossolo Vermelho distrófico utilizado no estudo. Essa amplitude do IHO é importante ao passo que quanto maior a amplitude do IHO menor a

possibilidade de restrição de água ou mecânica ao sistema radicular, ou seja, menor será a quantidade de dias em que o solo poderá estar fora das condições adequadas ao desenvolvimento radicular das plantas. SILVA et al. (1994) afirmam que frequência de valores de conteúdos de água fora do IHO depende da sua amplitude e da variabilidade do conteúdo de água do solo em consequência do clima (precipitações pluviais).

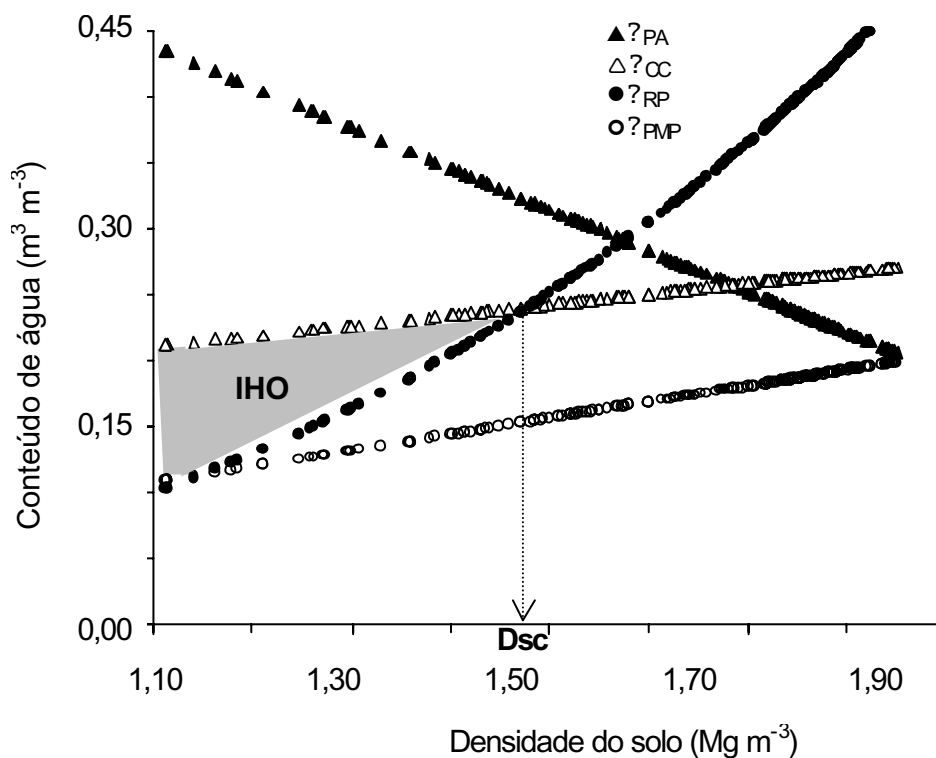


Figura 14. Variação do conteúdo de água volumétrico (θ) com a densidade do solo, para os limites críticos da porosidade de aeração (θ_{PA}), capacidade de campo (θ_{CC}), resistência do solo à penetração de 0,85 MPa (θ_{RP}) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) no LVd. IHO= intervalo hídrico ótimo. Dsc= Densidade do solo crítica.

A Dsc do LVd obtida no IHO foi de $1,48 \text{ Mg m}^{-3}$ (Figura 14), que é o valor de densidade do solo a partir do qual o crescimento radicular é restringido pela excessiva resistência mecânica do solo, isso se o conteúdo de água do solo corresponder ao conteúdo de água retida na capacidade de campo (0,01 MPa). Caso o conteúdo de água do solo seja inferior, a restrição ao sistema radicular ocorre em valores inferiores de densidade do solo, segundo o modelo do IHO (SILVA et al., 1994). Assim, a produtividade das culturas deve ser reduzida em valores inferiores ou próximos a densidade do solo de $1,48 \text{ Mg m}^{-3}$. De fato, na Figura 13 verifica-se que o valor de densidade do solo a partir do qual ocorreu decréscimo da produtividade foi de $1,48 \text{ Mg m}^{-3}$. Isso demonstra um modelo adequado, porém, o conteúdo de água do solo no campo não está sempre no conteúdo de água retida na capacidade de campo (0,01 MPa).

Entretanto, ao verificar-se as precipitações pluviárias diárias durante o ciclo da soja (Figura 11), observa-se a partir da semeadura da soja no dia 10 de dezembro de 2002, que ocorreram 73 dias sem estiagens superiores à quatro dias, até o dia 22 de fevereiro de 2003, quando ocorreu uma pequena estiagem de sete dias, e a partir desta data ocorreram precipitações mais esparsas, que foi na fase de enchimento de grãos da soja. Assim, na fase de intenso crescimento radicular o conteúdo de água esteve poucos dias abaixo da capacidade de campo que normalmente é atingida 2 a 3 dias após a chuva (REICHARDT, 1985). Ainda, a porosidade de aeração limitante é muito superior a capacidade de campo, desta forma, ocorrendo pouca restrição ao crescimento radicular durante esse período.

Além disso, o valor de Dsc a produção das culturas não é o mesmo que limita o crescimento radicular. Segundo TAYLOR & BRAR (1991), muitas vezes ocorrem mudanças e redução no comprimento radicular, porém este mantém satisfatoriamente o suprimento de água e nutrientes para a parte aérea, não refletindo em menor produção. BEUTLER & CENTURION (2003) verificaram que o desenvolvimento radicular da soja é restringido em valores inferiores de densidade do solo e resistência à penetração em relação a matéria seca da parte aérea e a produção de grãos.

O valor de Ds de $1,48 \text{ Mg m}^{-3}$ obtido como crítico à produção de grãos de soja é inferior ao valor de $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$, para solos franco-argilosos (CAMARGO & ALLEONI, 1997), valor acima do qual o solo é considerado compactado e a partir do qual são sugeridas medidas corretivas para descompactá-lo. Entretanto, é importante mencionar que os valores de RP de 0,85 MPa e de Ds de $1,48 \text{ Mg m}^{-3}$ foram obtidos como valores a partir dos quais ocorre decréscimo da produtividade de soja. Para que esses sejam utilizados como valores críticos, a partir dos quais é viável a adoção de medidas para descompactar o solo, é necessário uma análise econômica da relação custo/benefício.

No aspecto de manejo do solo, é importante mencionar que 1, 2 e 6 passadas de uma máquina de 11 Mg no mesmo local, no conteúdo de água próximo à retida na capacidade de campo (0,01 MPa), causou um decréscimo de 3,7; 9,4 e 45,6% na produtividade de soja, destacando a importância e a necessidade de trafegar o solo quando o mesmo está mais seco. Ainda, o valor crítico RP de 0,85 MPa e de Ds $1,48 \text{ Mg m}^{-3}$ encontrado neste estudo como valor a partir do qual ocorre decréscimo da produtividade de soja no LVd deve ser analisado para cada solo, cultura, cultivar e sistema de manejo, conforme mencionado por ARSHAD et al. (1996).

CONCLUSÕES

A produtividade de soja decresceu a partir da resistência do solo à penetração de 0,85 MPa e da densidade do solo de $1,48 \text{ Mg m}^{-3}$, no Latossolo Vermelho.

O intervalo hídrico ótimo foi limitado na parte superior pelo conteúdo de água na capacidade de campo (0,01 MPa) e na parte inferior pela resistência à penetração, atingindo a densidade do solo crítica ao crescimento radicular em $1,48 \text{ Mg m}^{-3}$.

A densidade do solo crítica obtida no intervalo hídrico ótimo foi de $1,48 \text{ Mg m}^{-3}$, igual ao valor densidade a partir da qual ocorreu decréscimo da produtividade de soja.

O tráfego do solo com um trator de 11 Mg, no conteúdo de água equivalente a capacidade de campo (0,01 MPa), compactou o solo e reduziu a produtividade de soja em até 45,6% quando passou 6 vezes no mesmo local.

REFERÊNCIAS

AGRIANUAL 2002: **anúário da agricultura brasileira**. São Paulo: FNP Consultoria e Comércio, 2001. p. 469-498.

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**, Viçosa, v. 20, p. 319-326, 1996.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **Soil cone penetrometer**. In: _____. Agricultural engineers yearbook. Saint Joseph, 1976. p. 368-369 (ASAE Re., 313.1).

ANDRADE, A.; WOLFE, D.W.; FERERES, E. Leaf expansion, photosynthesis and water relations of sunflower plants grown on compacted soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 149, p. 175-184, 1993.

ANDRIOLI, I.; CENTURION, J.F. Levantamento detalhado dos solos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 27., 1999, Brasília. **Anais...** Brasília: SBCS, 1999. 1 CD-ROM.

ARSHAD, M.A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 123-141 (Special Publication, 49).

ATWELL, B.J. The effect of soil compaction on wheat during early tillering: I. Growth, development and root structure. **New Phytologist**, Cambridge, v. 115, p. 29-35, 1990a.

ATWELL, B.J. The effect of soil compaction on wheat during early tillering: III. Fate of carbon transported to the root structure. **New Phytologist**, Cambridge, v. 115, p. 43-49, 1990b.

BACCHI, O.O.S. **Efeito da compactação sobre o sistema solo-planta em cultura de cana-de-açúcar** (*Saccharum spp.*). 1976. 65 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1976.

BARBIERI, J.L.; POLI, D.M.; DONZELLE, J.L.O. Latossolos roxos e a cana-de-açúcar. **Boletim Técnico Coopersucar**, São Paulo, v. 32, p. 1-10, 1985.

BAR-YOSEF, B.; LAMBERT, J.R. Corn and cotton root growth in response to soil impedance and water potential. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, p. 930-935, 1981.

BATAGLIA, O.C.; FURLANI, A.M.C.; TEIXEIRA, J.P.F.; FURLANI, P.R.; GALLO, J.R. **Métodos de análise química das plantas**. Campinas: Instituto Agronômico, 1983. 48 p. (Boletim Técnico, 78).

BELTRAME, L.F.C.; GONDIM, L.A.P.; TAYLOR, F.C. Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 5, p. 145-149, 1981.

BELTRAME, L.F.S.; TAYLOR, J.C. Causas e efeitos da compactação do solo. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v. 33, p. 59-62, 1980.

BENGOUGH, A.G.; MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 41, p. 341-358, 1990.

BENGOUGH, A.G.; YOUNG, I.M. Root elongation of seedling peas through layered soil of different penetration resistances. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 149, p. 129-139, 1993.

BENGOUGH, A.G.; CROSER, C.; PRITCHARD, J. A biophysical analysis of root growth under mechanical stress. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 189, p. 155-164, 1997.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, p. 849-856, 2003.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SOUZA, Z.M.; SILVA, L.M. Utilização dos penetrômetros de impacto e de anel dinamométrico em Latossolos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, p. 191-199, 2002.

BEUTLER, A.N.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; CRUZ, J.C.; PEREIRA FILHO, I.A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 167-77, 2001.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Particle density. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986a. v. 1, p. 377-382.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986b. v. 1. p. 363-375.

BORGES, E.N.; NOVAIS, R.F.; REGAZZI, A.J.; FERNANDES, B.; BARROS, N.F. Respostas de variedades de soja à compactação de camadas de solo. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 35, p. 553-568, 1988.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 33, p. 519-524, 1990.

BUSSCHER, W.J.; FREDERICK, J.R.; BAUER, P.J. Timing effects of deep tillage on penetration resistance and wheat and soybean yield. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, p. 999-1003, 2000.

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

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

CAMPBELL, D.J. A laboratory penetrometer for the measurement of the strenght of soil clods. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 22, p. 85-91, 1977.

CINTRA, F.L.D.; MIELNICZUK, J. Potencial de algumas espécies vegetais para recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, p. 323-327, 1983.

CORNISH, P.S.; 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. 621-644, 1984.

DANIELSON, R.E.; SUTHERLAND, P.L. Porosity. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. part 1, p. 443-461.

DEXTER, A.R. Mechanics of root growth. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 98, p. 303-312, 1987.

DOLAN, M.S.; DOWDY, R.H.; VOORHEES, W.B.; JOHNSON, J.F.; BIDWELL-SCHRADER, A.M. Corn phosphorus and potassium uptake in response to soil compaction. **Agronomy Journal**, Madison, v. 84, p. 639-642, 1992.

EMBRAPA SOJA. **Recomendações técnicas para a cultura da soja na região central do Brasil 1999/2000**. Londrina, 1999. 226 p. (Documentos, 132).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212 p.

FEHR, W.R.; GAVINESS, C.E.; BURMOOD, D.T.; PENNINGTON, J.S. Stage of development description for soybeans (*Glycine max* (L) Merrill). **Crop Science**, Madison, v. 11, p. 929-931, 1971.

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**, São Paulo, v. 23, p. 117-132, 1995.

FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B.; CURTI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 507-514, 1999.

FRITTON, D.D. A standard for interpreting soil penetrometer measurements. **Soil Science**, Baltimore, v. 150, p. 542-551, 1990.

GEDIGA, K. Influence of subsoil compaction on the uptake of ^{45}Ca from the soil profile and on maize yield. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, p. 351-355, 1991.

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. part. 1. p. 383-411.

GENUCHTEN, M.T.A. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-897, 1980.

GOEDERT, W.; SCHERMACK, M.J.; FREITAS, F.C. Estado de compactação do solo em áreas cultivadas no sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, p. 223-227, 2002.

GOMES, A. da S.; PEÑA, Y.A. Caracterização da compactação através do uso do penetrômetro. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v. 49, p. 18-20, 1996.

GOSS, M.J. Effects of mechanical impedance on root growth in barley (*Hordeum vulgare* L.) I. Effects on the elongation and branching of seminal root axes. **Journal of Experimental Botany**, Oxon, v. 28, p. 96-111, 1977.

GRANT, C.A.; LAFOND, G.P. The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on a clay soil in southern Saskatchewan. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 73, p. 223-32, 1993.

GUIMARÃES, C.M.; MOREIRA, J.A.A. Compactação do solo na cultura do arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, p. 703-707, 2001.

GUIMARÃES, C.M.; STONE, L.F.; MOREIRA, J.A.A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. II: efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, p. 213-218, 2002.

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

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W.H.; VALENTINE, C.; STEWARD, B.A. **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: CRS Press, 1998. p. 167-179 (Advances in Soil Science).

HAKANSSON, I.; STENBERG, M.; RYDBERG, T. Long-term experiments with different depths of mouldboard ploughing in Sweden. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 46, p. 209-223, 1998.

HAMBLIM, A.P. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 38, p. 95-158, 1985.

HENDERSON, C.W.L. Using a penetrometer to predict the effects of soil compaction on the growth and yield of wheat on uniform, sandy soils. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v. 40, p. 497-508, 1989.

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

HIRA, G.S.; SINGH, N.T. Observe and predicted rates of phosphorus difusion in soils of varyng bulk density and water content. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 41, p. 537-540, 1977.

HOAD, S.P.; RUSSEL, G.; LUCAS, M.E.; BINGHAM, I.J. The management of wheat, barley, and oat root systems. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 74, p. 195-254, 2001.

IMHOFF, S.; 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, p. 11-18, 2001.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, p. 1493-1500, 2000.

JOHNSON, J.F.; VOORHEES, W.B.; NELSON, W.W.; RANDALL, G.W. Soybean growth and yield as affected by surface and subsoil compaction. **Agronomy Journal**, Madison, v. 82, p. 973-979, 1990.

KIRKEGAARD. H.B. so; TROEDSON, R.J. The effect of soil strength on the growth of pigeonpea radicles and seedlings. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 140, p. 65-74, 1992.

KLEIN, V.A.; LIBARDI, P.L.; SILVA, A.P. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes condições de densidade e teor de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 18, p. 45-54, 1998.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. part. 1, p. 635-662.

KOOISTRA, M.J.; SCHOONDERBEEK, D.; BOONE, F.R.; VEEN, B.W.; NOORDWIJK, M. van. Root-soil contact of maize, as measured by a thin-section technique – II: effects of soil compaction. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 139, p. 119-129, 1992.

KOPI, A.J.; DOUGLAS, J.T. A rapid inexpensive and quantitative procedure for assessing soil structure with respect to cropping. **Soil Use and Management**, v. 7, p. 52-56, 1991.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, New York, v. 1, p. 277-294, 1985.

MACKAY, A.D.; BARBER, S.A. Effect of soil moisture and phosphate level on root hair growth of corn roots. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 86, p. 321-331, 1985.

MASLE, A.; PASSIOURA, J.B. Effect of soil strength on the growth of young wheat plants. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 14, p. 643-656, 1987.

MATERECHERA, S.A.; ALSTON, A.M.; KIRBY, J.M.; DEXTER, A.R. Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 144, p. 297-303, 1992.

MEROTTO, A.J.; MUNDSTOCK, C.M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 197-202, 1999.

MERTEN, G.H.; MIELNICZUK, J. Distribuição do sistema radicular e dos nutrientes em Latossolo Roxo sob dois sistemas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, p. 369-374, 1991.

MIELNICZUK, J.; CARPENEDO, V.; PEDO, F. Desenvolvimento de raízes em solos compactados. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v. 38, p. 42-43, 1985.

MISRA, R.K.; DEXTER, A.R.; ALSTON, A.M. Penetration of soil aggregates of finite size. II. Plant roots. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 94, p. 59-85, 1986.

MORAES, M.H.; BENEZ, S.H.; LIBARDI, P. Influência de camadas compactadas de subsuperfície no desenvolvimento do sistema radicular de plantas de soja (*Glycine max* (L) Merrill). **Científica**, São Paulo, v. 19, p. 195-206, 1991.

MORAES, M.H.; BENEZ, S.H.; LIBARDI, P. Efeitos da compactação em algumas propriedades físicas do solo e seu reflexo no desenvolvimento das raízes de plantas de soja. **Bragantia**, Campinas, v. 54, p. 393-403, 1995.

MORAES, M.H.; VILLAS BÔAS, R.L.; BREDA, C.C.; ELIAS JUNIOR, R.C.; LUNA, P.E.V.; PRADO FILHO, R.S. Efeito da compactação subsuperficial do solo no desenvolvimento inicial e no estado nutricional de plantas de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 18, p. 35-43, 1998.

MOURA NETO, F.P. **Desempenho de cultivares de arroz de terras altas sob plantio direto e convencional**. 2001. 92 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.

NESMITH, D.S. Soil compaction in double cropped wheat and soybean on Ultissol. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, p. 183-186, 1987.

NOGUEIRA, S.S.S.; MANFREDINI, S. Influência da compactação do solo no desenvolvimento da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 18, p. 973-976, 1983.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, 1999. 399 p.

ORTOLANI, A.F.; COAN, O.; SALLES, H.C. Influência da compactação do solo no desenvolvimento da soja (*Glycine max* (L) Merrill). **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 6, p. 35-42, 1982.

PABIN, J.; LIPIEC, J.; WODEK, S. Critical soil bulk density and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, p. 131-143, 1998.

PETTER, R.L. **Desenvolvimento radicular da soja em função da compactação do solo, conteúdo de água e fertilidade em Latossolo**. 1990. 144 f. Dissertação (Mestrado Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1990.

QUEIROZ-VOLTAN, R.B.; NOGUEIRA, S.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, p. 929-938, 2000.

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

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S.; BATAGLIA, O.C. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170 p.

RALISCH, R.; TAVARES FILHO, J. Compactação: uma preocupação pertinente. **A Granja**, Porto Alegre, v. 646, p. 55-57, 2002.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, p. 211-216, 1988.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo – planta – atmosfera**. Piracicaba: Fundação Cargill, 1985. 445 p.

RIBEIRO, M.A.V. **Resposta da soja e do eucalipto a fósforo em solos de diferentes texturas, níveis de densidade e de umidade**. 1999. 71 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1999.

ROSOLEM, C.A.; ALMEIDA, A.C.S.; SACRAMENTO, L.V.S. Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 53, p. 259-266, 1994a.

ROSOLEM, C.A.; VALE, L.S.R.; GRASSI FILHO, H.; MORAES, M.H. Sistema radicular e nutrição do milho em função da calagem e da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, p. 491-497, 1994b.

ROSOLEM, C.A.; FERNANDEZ, E.M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C.A.C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, p. 821-828, 1999.

SAVAGE, M.J.; RITCHIE, J.T.; LAND, W.L.; DUGAS, W.A. Lower limit of soil water available. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 651-844, 1996.

SECCO, D.; SILVA, V.R.; RUBIN, R.B; REINERT, D.J. Efeitos da compactação nos atributos físicos do solo e na produtividade da cultura do trigo, em Latossolo Vermelho Escuro no sistema plantio direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 13., 2000, Ilhéus. **Anais...** Ilhéus: SBSCS, 2000. 1 CD-ROM.

SHIERLAW, J.; ALSTON, A.M. Effect of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 77, p. 15-28, 1984.

SIDIRAS, N.; VIEIRA, M.J. Comportamento de um Latossolo Roxo distrófico compactado pelas rodas de um trator na semeadura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 19, p. 1285-1293, 1984.

SIDIRAS, N.; VIEIRA, S.R.; ROTH, C.H. Determinação de algumas características físicas de um Latossolo Roxo distrófico sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 8, p. 265-8, 1984.

SILBERBUSCH, M.; HALLMARK, W.B.; BARBER, S.A. Simulation of effects of soil bulk density and P addition on K uptake of soybean. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 14, p. 287-296, 1983.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 184, p. 323-329, 1996.

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

SILVA, G.P.; NOVAIS, R.F. de; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F. Respostas de espécies de gramíneas forrageiras a camadas compactadas de solo. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 39, p. 31-43, 1992.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 191-199, 2000a.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, p. 795-801, 2000b.

SILVA, V.R.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; SILVA, A.P.; BRAIDA, J.A.; KAISER, D.R. Intervalo Hídrico Ótimo para três solos em sistema de plantio direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14., 2003, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: SBCS, 2002. 1 CD-ROM.

SMITH, C.W.; JOHNSTON, M.A.; LORENTZ, S. The effect of soil compaction and soil physical properties on the mechanical resistance of South African forestry soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 78, p. 93-111, 1997.

STIRZAKER, R.J.; PASSIOURA, J.B.; WILMS, Y. Soil structure and plant growth: impact of bulk density and biopores. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 185, p. 151-162, 1996.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, p. 229-235, 1991.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V.L. **Recomendação para uso do penetrômetro de impacto, modelo IAA/Planalsucar - Stolf**. São Paulo: MIC/IAA/PNMCA-Planalsucar, 1983. 8 p. (Série Penetrômetro de Impacto - Boletim, 1).

STONE, L.F.; GUIMARÃES, C.M.; MOREIRA, A.A.J. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, p. 207-212, 2002.

TARDIEU, F. Analysis of the spatial variability in maize root density. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 109, p. 257-262, 1988.

TARDIEU, F. Growth and functioning of roots and to root systems subjected to soil compaction. Towards a system with multiple signaling. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 30, p. 217-243, 1994.

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*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 725-730, 2001.

TAYLOR, H.M.; BRAR, G.S. Effect of soil compaction on root development. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 19, p. 111-119, 1991.

TAYLOR, H.; GARDNER, H. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content, and strength. **Soil Science**, Baltimore, v. 963, p. 153-156, 1963.

TAYLOR, H.M.; RATLIFF, L.F. Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strength and soil water content. **Soil Science**, Baltimore, v. 108, p. 113-119, 1969.

TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER Jr., J.J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, Baltimore, v. 102, p. 18-22, 1966.

THOMPSON, P.J.; JANSEN, I.J.; HOOKS, C.L. Penetrometer resistance and bulk density as parameters for predicting root system performance in mine soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, p. 1288-1293, 1987.

TIMLIM, D.J.; AHUJA, L.R.; ANKENY, M.D. Comparison of three field methods to characterize apparent macropore conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 278-284, 1994.

TOPP, G.C.; GALGANOW, Y.T.; WIRES, K.C. **Non limiting water range (NLWR)**: an approach for assessing soil structure. Ottawa: Soil Quality Evaluation Program, 1994. 96 p. (Technical Report, 2).

TORMENA, C.A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, p. 333-339, 1996.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 573-581, 1998.

TU, J.C.; TAN, C.S. Effect of soil compaction on growth, yield and root rots of white beans in clay loam and sandy loam soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 23, p. 233-238, 1991.

TURNER, N.C. Further progress in crop water relations. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 58, p. 293-325, 1997.

UNGER, W.P.; KASPAR, T.C. Soil compaction and root growth: a review. **Agronomy Journal**, Madison, v. 86, p. 759-766, 1994.

VEEN, B.W.; BOONE, F.R. The influence of mechanical resistance and soil water on the growth of seminal roots of maize. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, p. 219-226, 1990.

VEEN, B.W.; NOORDWIJK, M.; WILLIGEN, P.; BOONE, F.R.; KOOISTRA, M.J. Root-soil contact of maize, as measured by a thin-section technique. III. Effects on shoot growth, nitrate and water uptake efficiency. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 139, p. 131-138, 1992.

VIEIRA, M.J.; MUZILLI, O. Características físicas de um Latossolo Vermelho Escuro sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 19, p. 873-882, 1984.

VOORHEES, W.B.; LINDSTORM, M.J. Soil compaction constraints on conservation tillage in the northorn corn belt. **Journal of Soil Water Conservation**, Ankeny, v. 38, p. 307-311, 1983.

VOORHEES, W.B.; FARRELL, D.A.; LARSON, W.E. Soil strenght and aeration effects on root elongarion. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 39, p. 948-953, 1975.

WEAICH, K.; BRISTOW, K.L.; CASS, A. Preemergent shoot growth of maize under different dryin conditions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p. 1272-1278, 1992.

WOLFE, D.W.; TOPOLESKI, D.T.; GUNDERSHEIM, N.A.; INGALL, B.A. Growth and yeld sensitivity of four vegetable crops to soil compaction. **Journal of the American Society of Horticultural Science**, Alexandria, v. 120, p. 956-963, 1995.