

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO SOB
SISTEMA DE SEMEADURA DIRETA E CULTIVO
CONVENCIONAL**

Cinara Xavier de Almeida

Engenheira Agrônoma

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL

Dezembro de 2011

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO SOB
SISTEMA DE SEMEADURA DIRETA E CULTIVO
CONVENCIONAL**

Cinara Xavier de Almeida

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
Dezembro de 2011

A447q Almeida, Cinara Xavier de
Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistema de
semeadura direta e cultivo convencional / Cinara Xavier de Almeida. –
– Jaboticabal, 2011
xvii, 103 f; 28 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias, 2011

Orientador: José Frederico Centurion

Banca examinadora: Elias Nascentes Borges, Ednaldo Carvalho
Guimarães, Teresa Cristina Tarlé Pissarra, Renato de Mello Prado
Bibliografia

1. Funções de pedotransferência. 2. Resistência do solo à
penetração. 3. Indicadores de qualidade física do solo. I. Título. II.
Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.43

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

CINARA XAVIER DE ALMEIDA – Nasceu no dia 29 de janeiro do ano de 1982, em Monte Carmelo, MG. No ano de 1992, concluiu o ensino fundamental na Escola Estadual Melo Viana, em Monte Carmelo, MG. cursou todo o ensino médio na Escola Estadual Professor Vicente Lopes Perez, no período de 1997 a 1999, também em Monte Carmelo, MG. Em julho de 2000, ingressou no curso de Graduação em Agronomia pela Universidade Federal de Uberlândia, em Uberlândia, MG, e em julho de 2005, obteve o título de Engenheira Agrônoma. No período de outubro a dezembro de 2005, foi bolsista pelo convênio EMBRAPACafé/FUNAPE, na área de Desenvolvimento Científico e Inovação. Iniciou em março de 2006 o curso de Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo) na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, unidade da Universidade Estadual Paulista, Câmpus de Jaboticabal, SP, onde foi bolsista FAPESP. No dia 28 de abril de 2008, submeteu-se à banca para a defesa da dissertação e obteve o título de Mestre em Agronomia. Em agosto de 2008, ingressou no curso de doutorado em Agronomia (Produção Vegetal), na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, unidade da Universidade Estadual Paulista, Câmpus de Jaboticabal, SP, sendo bolsista CNPq no início do curso e logo depois bolsista FAPESP. Foi bolsista do Programa ELAP (*Emerging Leaders in the Americas Program*), oferecido pelo Governo do Canadá, atuando como pesquisadora junto ao *Departamento des Sols et de Génie Agroalimentaire*, da Universidade Laval, em Québec, concluindo assim, as exigências para o Doutorado Sanduíche. No dia 21 de dezembro de 2011 submeteu-se à banca para a defesa da tese, obtendo o título de Doutora em Agronomia.

"Amemo-nos uns aos outros, pois o amor vem de Deus. E todo aquele que ama, nasceu de Deus e conhece a Deus. Quem não ama não conhece a Deus, porque Deus é amor. Nisto se tornou visível o amor de Deus entre nós: Deus enviou seu Filho único a este mundo, para dar-nos a vida por meio dele. Deus é amor: quem permanece no amor permanece em Deus, e Deus permanece nele."

1 Jo 4,7-9;16

"Diz-se que, mesmo antes de um rio cair no oceano, ele treme de medo. Olha para trás, para toda a jornada: os cumes, as montanhas, o longo caminho sinuoso através das florestas, através dos povoados, e vê à sua frente um oceano tão vasto, que entrar nele nada mais é que desaparecer para sempre.

Mas não há outra maneira. O rio não pode voltar. Ninguém pode voltar. Voltar é impossível na existência. Você pode apenas ir em frente. O rio precisa se arriscar e entrar no oceano. E somente quando ele entra no oceano é que o medo desaparece.

Porque apenas então o rio saberá que não se trata de desaparecer no oceano, mas de tornar-se oceano. Por um lado é desaparecimento, e por outro lado é renascimento. Assim somos nós. Voltar é impossível na existência. Você tem que ir em frente e se arriscar - tornar-se oceano!"

Albert Einstein

"Deus não escolhe capacitados, mas capacita seus escolhidos."

Albert Einstein

Aos meus pais,
Lindolfo Xavier Rios e Neusa Maria de Almeida Rios, primeiramente pelo milagre da vida e por
sempre me apoiarem e incentivarem em todas as etapas da minha vida,

A minha irmã,
Cristiane Xavier de Almeida Delfino, pelo exemplo de caridade, amor e apoio em todas as horas,

Ao meu cunhado,
Iran Delfino de Sousa, pelo exemplo de luta e dedicação, e

Aos meus sobrinhos,
Amanda Heloisa Xavier Delfino, Iran Delfino de Sousa Filho e Luisa Xavier Delfino, por me
reensinarem o que é ternura, alegria, cuidado, carinho, diversão, solidariedade e esperança

Ofereço

Ao meu noivo, Ricardo Falqueto Jorge, pelo amor incondicional,

Dedico

A Deus, que me deu vida, saúde e força para que eu pudesse chegar até aqui
Agradeço e Louvo Sempre.

AGRADECIMENTOS

- A Deus, pelo dom da vida e pela presença onipotente;
- A Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – FCAV/UNESP pela oportunidade de realização deste trabalho;
- A FAPESP e ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos;
- Ao meu orientador Prof. Dr. José Frederico Centurion pela oportunidade, orientação, confiança, incentivo, profissionalismo, compreensão e amizade;
- Ao Prof. Dr. William Natale, pela oportunidade de ir estudar na Universidade Laval, em Québec, no Canadá;
- Ao Prof. Dr. Léon-Étienne Parent, pela gentil recepção em seu país e também por todos os grandes ensinamentos;
- Aos docentes do Curso de Pós-graduação em Agronomia da FCAV/UNESP pela amizade, apoio, conhecimento transmitido e atenção;
- Aos professores, Dr. Elias Nascentes Borges, Dr. Ednaldo Carvalho Guimarães, Dra. Teresa Cristina Tarlé Pissara e Dr. Renato de Mello Prado pela participação na banca de defesa da tese, pela disposição e pelas sugestões para a melhoria desse trabalho;
- Aos professores, Dr. José Frederico Centurion, Dr. Itamar Andrioli, Dr. José Carlos Barbosa, Dr. Renato de Melo Prado e Dr. William Natale, pela participação no Exame Geral de Qualificação e pelas sugestões, conselhos e ensinamentos;
- Aos professores Dr. José Carlos Barbosa e Dr. Ednaldo Carvalho Guimarães, pelo auxílio nas análises estatísticas;
- A Fabiana de Souza Pereira, minha irmã do coração, pelos belos exemplos de compaixão e amor ao próximo e pelo imenso carinho e amizade;
- A Amanda Hernandes, pela presteza sempre que precisei, pelo apoio nos momentos difíceis, pela amizade e pelos momentos juntas em Québec;
- Ao engenheiro agrônomo e colega Jarbas Martins Jesuíno Junior pela enorme colaboração na realização desse trabalho e amizade;

- Ao “Quarteto Fantástico” (Fabi, Lílian, Amandinha e Ci), por me ensinar o que é uma amizade verdadeira, daquelas que duram para sempre;
- Aos funcionários do Departamento de Solos e Adubos, Gomes, Dejair, Luis, Mauro, Anderson, Afonso, Dibeli, Ademir, Cristiano, Hoster, Celinha, Maria Inês e Claudinha, pela prontidão nos momentos que precisei e pela amizade;
- Aos funcionários da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Produção pela prestatividade na realização dos trabalhos de campo;
- Aos amigos da Pós-Graduação, Onã, Fernanda, Karina, Paula, José Luiz, Leomar, Juvenal, Adriana, Adriane, Tatiana, Ivana, Thiago, Amaury, Danilo, Henrique, Daniel, Adolfo, Márcio, José Marcos, Getúlio, Marcos, Diego, e todos os outros, que me proporcionaram momentos muito agradáveis durante nossa convivência;
- Às funcionárias da seção de Pós-Graduação e aos funcionários da Biblioteca da FCAV/UNESP, pelo atendimento e auxílio;
- Ao colega Michaël Leblanc pela gentil acolhida em Québec, pelos ensinamentos e por toda a amizade;
- À Mme. Katherine Parent pela calorosa acolhida em sua casa em Québec, e por toda a amizade;
- Aos amigos Marcel Fantin, Gilles Bélanger, Fabiana Soares, Márcio Martins, Mme. Sylvie, Alberto Riquelme Diaz e Amelie Fauchon pelos prazerosos momentos que me proporcionaram em Québec;
- Aos meus colegas do *Departamento des Sols et de Génie Agroalimentaire*, da Universidade Laval, Nicolas Samson e sua esposa Anaïs Samson, Martin Anders Bolinder, pela prontidão nos ensinamentos e pela gentil amizade;
- Ao M. Marc-Antoine Désy e M. Antoine Karam pelo apoio e amizade junto à Universidade Laval;
- A todos meus Familiares e amigos pessoais, que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando e torcendo por mim;
- Enfim, a todos que, de alguma forma, contribuíram para essa minha nova conquista,

MUITO OBRIGADA!!!

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	ix
SUMMARY.....	x
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xv
CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
CAPÍTULO 2 – FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA A CURVA DE RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO: VALIDAÇÃO DE MODELOS	13
2.1. INTRODUÇÃO	14
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	17
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
2.4. CONCLUSÕES	30
CAPÍTULO 3 – INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICA EM UM LATOSSOLO VERMELHO SOB SISTEMA DE SEMEADURA DIRETA E CULTIVO CONVENCIONAL	31
3.1. INTRODUÇÃO	32
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	33
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64
3.5. CONCLUSÃO	65
4. REFERÊNCIAS.....	66
APÊNDICES.....	82

QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO SOB SISTEMA DE SEMEADURA DIRETA E CULTIVO CONVENCIONAL

RESUMO - O estudo de indicadores de qualidade dos solos é fundamental para avaliar o nível de degradação imposta pelo uso agrícola e para estabelecer estratégias de manejo sustentáveis. O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a qualidade de um Latossolo Vermelho distrófico típico sob cultivo convencional (CC) e sistema de semeadura direta (PD), por meio de indicadores físicos e da avaliação da produção das culturas da soja e do milho. Os objetivos específicos foram: *i*) comparar a eficiência de funções de pedotransferência para a curva de resistência do solo à penetração presentes na literatura, por meio do ajuste de dados obtidos com o penetrômetro de impacto e também com o penetrômetro eletrônico; *ii*) determinar a resistência do solo à penetração (RP) durante o ciclo das culturas relacionando-a ao conteúdo de água no solo (Ug); e, *iii*) determinar alguns indicadores de qualidade física do solo, relacionando-os com as características agronômicas das culturas. Os sistemas de uso e manejo do solo foram: CC e PD por sete e oito anos consecutivos (solo de textura média) e CC e PD por nove e dez anos consecutivos (solo de textura argilosa). Foram determinadas a RP, a porosidade total, a macroporosidade, a microporosidade, a retenção de água no solo, o índice S, a densidade, a densidade do solo máxima e também a densidade do solo relativa. Nas culturas da soja e do milho foram avaliadas: massa seca das raízes, altura das plantas, altura de inserção da primeira vagem/espiga, número de vagens por planta de soja, massa seca da parte aérea do milho e produtividade. As Equações $RP = aUg^b$; $RP = a(1 - Ug)^b$; $RP = ae^{bUg}$ e $RP = a + be^{-\frac{Ug}{c}}$ não diferiram e foram as mais precisas e acuradas na predição da RP. Dentre os sistemas de manejo, embora o CC tenha apresentado melhores resultados em relação aos indicadores de qualidade física do solo, o PD foi o que proporcionou maior produção de milho.

Palavras-chave: resistência do solo à penetração, densidade do solo, porosidade, retenção de água no solo, *Glycine max*, *Zea mays*.

PHYSICAL QUALITY OF AN OXISOL (RED LATOSOL) UNDER NO-TILLAGE AND CONVENTIONAL TILLAGE

SUMMARY - The study of indicators of soil quality is essential to assess the level of degradation imposed by agricultural use and to establish sustainable management strategies. The aim of this study was to evaluate the quality of an Oxisol under conventional (CC) and no-tillage (NT), through soil physical indicators and assessing the soybeans and corn crops yield. The specific objectives were: *i*) compare the efficiency of pedotransfer functions due to soil resistance to penetration curve in the literature, by adjusting the data obtained with the impact penetrometer and also with the electronic penetrometer), *ii*) monitoring the soil resistance to penetration (PR) during the crop cycle relating it to the soil water content (Wc), and *iii*) determine some soil physical indicators, relating them to the agronomic characteristics of crops. The management systems were: CC and NT to seven and eight years consecutives (sandy loam soil) and CC and NT to nine and ten years consecutives (clayey soil). The PR, total porosity, macroporosity and microporosity, soil water retention, index S, soil bulk density, maximum dry bulk density, and also the relative bulk density were determined. The agronomic characteristics of soybean and corn crops have been evaluated: roots dry mass, height plant, insertion of the first spike height/pod, pods per soybean plant number, corn shoot dry mass and yield. The equations $PR = aWc^b$; $PR = a(1 - Wc)^b$; $PR = ae^{bWc}$ e $PR = a + be^{-\frac{Wc}{c}}$ did not differ and were the most precise and accurate in prediction of soil resistance to penetration. Among the management systems, although the CC has shown better results in relation to soil physical indicators, the NT was that the highest corn yield.

Keywords: soil resistance to penetration, soil bulk density, porosity, soil water retention, *Glycine max*, *Zea mays*.

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
Tabela 1. Conteúdo de matéria orgânica e granulometria dos solos nos sistemas de manejo.....	18
Tabela 2. Estatísticas descritivas básicas das variáveis resistência do solo à penetração (RP, MPa), conteúdo de água no solo (U_g , $kg\ kg^{-1}$), índice S (S) e estresse efetivo (σ) utilizadas no ajuste das equações para o Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, e na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa	21
Tabela 3. Estatísticas descritivas básicas das variáveis resistência do solo à penetração (RP, MPa), conteúdo de água no solo (U_g , $kg\ kg^{-1}$), índice S (S) e estresse efetivo (σ) utilizadas no ajuste das equações para o Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, e na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa	22
Tabela 4. Parâmetros ajustados pelas funções de pedotransferência para as curvas de resistência do solo à penetração, a partir de dados obtidos com o penetrômetro eletrônico (Eletrônico) e com o penetrômetro de impacto (Impacto), para o Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1) de textura média, e na área experimental 2 (LVd2) de textura argilosa	24
Tabela 5. Equações para as curvas de resistência do solo à penetração ajustadas para o Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, e na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa	27
Tabela 6. Erro padrão da predição (RMSE), coeficiente de eficiência (EF) e diferença média (MD) das diferentes equações para a curva de resistência do solo à penetração para o Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, e na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa.....	28
Tabela 7. Teste F entre as diferentes equações para a curva de resistência do solo à penetração para o Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, e na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa.....	30
Tabela 8. Conteúdo de matéria orgânica e granulometria dos solos nos sistemas de manejo.....	34

Tabela 9. Densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, ao longo do ciclo da cultura da soja, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m	45
Tabela 10. Densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa, ao longo do ciclo da cultura da soja, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m	45
Tabela 11. Densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, ao longo do ciclo da cultura do milho, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m	47
Tabela 12. Densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa, ao longo do ciclo da cultura do milho, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m	47
Tabela 13. Índice S no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, cultivado com soja, sob cultivo convencional (CC _{LVd1}) e sistema de semeadura direta (PD _{LVd1}), nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m	51
Tabela 14. Índice S no Latossolo Vermelho típico, na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa, cultivado com soja, sob cultivo convencional (CC _{LVd2}) e sistema de semeadura direta (PD _{LVd2}), nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m	51
Tabela 15. Índice S no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, cultivado com milho, sob cultivo convencional (CC _{LVd1}) e sistema de semeadura direta (PD _{LVd1}), nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m	51
Tabela 16. Índice S no Latossolo Vermelho eutrófico, típico, na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa, cultivado com milho, sob cultivo convencional (CC _{LVd2}) e sistema de semeadura direta (PD _{LVd2}), nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m	51
Tabela 17. Densidade do solo relativa (%) no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, cultivada com soja, sob cultivo convencional (CC _{LVd1}) e sistema de semeadura direta (PD _{LVd1}), nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m	56

- Tabela 18. Densidade do solo relativa (%) no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa, cultivada com soja, sob cultivo convencional (CC_{LVd2}) e sistema de semeadura direta (PD_{LVd2}), nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.....57
- Tabela 19. Densidade do solo relativa (%) no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, cultivada com milho, sob cultivo convencional (CC_{LVd1}) e sistema de semeadura direta (PD_{LVd1}), nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.....57
- Tabela 20. Densidade do solo relativa (%) no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa, cultivada com milho, sob cultivo convencional (CC_{LVd2}) e sistema de semeadura direta (PD_{LVd2}), nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.....58
- Tabela 21. Matriz de correlações de Pearson entre os indicadores de qualidade física do solo: resistência do solo à penetração (RP), porosidade total (PT), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), índice S (S), densidade do solo (Ds), densidade do solo máxima (Dsm) e densidade do solo relativa (Dsr) ..59
- Tabela 22. Massa seca das raízes de soja (g) nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m do Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, sob sistema de semeadura direta (PD_{LVd1}) e cultivo convencional (CC_{LVd1})59
- Tabela 23. Massa seca das raízes de soja (g) nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m do Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa, sob sistema de semeadura direta (PD_{LVd2}) e sob cultivo convencional (CC_{LVd2})60
- Tabela 24. Massa seca das raízes de milho (g) nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m do Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, sob sistema de semeadura direta (PD_{LVd1}) e cultivo convencional (CC_{LVd1})60
- Tabela 25. Massa seca das raízes de milho (g) nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m do Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa sob sistema de semeadura direta (PD_{LVd2}) e sob cultivo convencional (CC_{LVd2})61
- Tabela 26. Altura da planta (Alt), altura de inserção da primeira vagem (Ins), número de vagens por planta (Núm) e produção das plantas (Prod) de soja no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, sob sistema de semeadura direta (PD_{LVd1}) e cultivo convencional (CC_{LVd1})...62

- Tabela 27. Altura da planta (Alt), altura da inserção da primeira vagem (Ins), número de vagens por planta (Núm) e produção das plantas (Prod) das plantas de soja no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 2, de textura argilosa, sob sistema de semeadura direta (PD_{LVd2}) e sob cultivo convencional (CC_{LVd2})62
- Tabela 28. Altura da planta (Alt), altura da inserção da primeira espiga (Ins), massa da parte aérea (Mas) e produção (Prod) das plantas de milho no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, sob sistema de semeadura direta (PD_{LVd1}) e cultivo convencional (CC_{LVd1})...62
- Tabela 29. Altura da planta (Alt), altura da inserção da primeira espiga (Ins), massa da parte aérea (Mas) e produção (Prod) das plantas de milho no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa, sob sistema de semeadura direta (PD_{LVd2}) e sob cultivo convencional (CC_{LVd2})63
- Tabela 30. Matriz de correlações de Pearson entre os indicadores de qualidade física do solo: resistência do solo à penetração (RP), porosidade total (PT), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), índice S (S), densidade do solo (Ds), densidade do solo máxima (Dsm) e densidade do solo relativa (Dsr), e as características agronômicas das culturas: massa seca das raízes (Raiz), altura das plantas (Altura), altura de inserção da primeira vagem/espiga (Inserção) e produção das plantas (Produção).....64
- Tabela 31A. Resultados dos testes de normalidade e homocedasticidade da variância dos erros do ajuste das Equações 1, 2, 3, 4 e 8 aos dados obtidos com o penetrômetro eletrônico (Eletrônico) e com o penetrômetro de impacto (Impacto) no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, e na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa.....83
- Tabela 32B. Resultados dos testes de normalidade e homocedasticidade da variância dos erros do ajuste das Equações 1, 2, 3, 4 e 8 aos dados do Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, e na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa.....89

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1. Valores observados (RP Obs) e estimados pelas Equações 1 (RP Eq.1A e RP Eq.1B), 2 (RP Eq.2A e RP Eq.2B), 3 (RP Eq.3A e RP Eq.3B) e 8 (RP Eq.8A e RP Eq.8B) da resistência do solo à penetração obtida com o penetrômetro eletrônico (Eletrônico) e também com o penetrômetro de impacto (Impacto) em função do conteúdo de água no solo (valores observados) para o Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, e na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa.	26
Figura 2. Precipitação pluvial mensal para os anos agrícolas 2008/2009 e 2009/2010.....	33
Figura 3. Imagem de satélite indicando a localização das parcelas experimentais, no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1, de coordenadas geográficas 21°15'11"S e 48°15'58"W a 619 m de altitude (LVd1) e na área experimental 2, de coordenadas geográficas 21°15'33"S 48°16'17"W a 607 m de altitude (LVd2) (Fonte: Google Earth, acesso em 20/11/2010).....	35
Figura 4. Esquema representando a disposição das unidades experimentais.....	39
Figura 5. Conteúdo de água (Ug) e resistência do solo à penetração (RP) nas diferentes camadas do Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd), de textura média e na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa, sob sistema de semeadura direta (PD) e cultivo convencional (CC), ao longo do ciclo da cultura da soja. As linhas horizontais representam os valores médios em cada camada.....	41
Figura 6. Conteúdo de água (Ug) e resistência do solo à penetração (RP) nas diferentes camadas do Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd), de textura média e na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa, sob sistema de semeadura direta (PD) e cultivo convencional (CC), ao longo do ciclo da cultura do milho. As linhas horizontais representam os valores médios em cada camada.....	42
Figura 7. Curvas de retenção de água no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, sob cultivo convencional (CC _{LVd1}) e sistema de semeadura direta (PD _{LVd1}) de soja, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.	48

- Figura 8. Curvas de retenção de água no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa, sob cultivo convencional (CC_{LVd2}) e sistema de semeadura direta (PD_{LVd2}) de soja, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.49
- Figura 9. Curvas de retenção de água no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, sob cultivo convencional (CC_{LVd1}) e sistema de semeadura direta (PD_{LVd1}) de milho, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.50
- Figura 10. Curvas de retenção de água no Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd2), de textura argilosa, sob cultivo convencional (CC_{LVd2}) e sistema de semeadura direta (PD_{LVd2}) de milho, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.50
- Figura 11. Densidade máxima do solo (Dsm) determinada pelo ensaio de Proctor nos solos cultivados com soja, sob cultivo convencional (CC_{LVd1} e CC_{LVd2}), e sistema de semeadura direta (PD_{LVd1} e PD_{LVd2}), no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média e na área experimental 2, de textura argilosa, respectivamente, na camada de 0-0,30 m. Ugc representa o conteúdo de água crítico em que ocorre a máxima compactação.53
- Figura 12. Densidade máxima do solo (Dsm) determinada pelo ensaio de Proctor nos solos cultivados com milho, sob cultivo convencional (CC_{LVd1}), e sistema de semeadura direta (PD_{LVd1}), no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. Ugc representa o conteúdo de água crítico em que ocorre a máxima compactação.54
- Figura 13. Densidade máxima do solo (Dsm) determinada pelo ensaio de Proctor nos solos cultivados com milho, sob cultivo convencional (CC_{LVd2}), e sistema de semeadura direta (PD_{LVd2}), no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. Ugc representa o conteúdo de água crítico em que ocorre a máxima compactação.55
- Figura 14A. Resíduos das Equações 1, 2, 3, 4 e 8 ajustadas aos dados do penetrômetro eletrônico obtidos no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1, de textura média, em função das variáveis independentes: índice S (S), estresse efetivo (σ) e conteúdo de água no solo (Ug).85

- Figura 15A. Resíduos das Equações 1, 2, 3, 4 e 8 ajustadas aos dados do penetrômetro de impacto obtidos no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1, de textura média, em função das variáveis independentes: índice S (S), estresse efetivo (σ) e conteúdo de água no solo (U_g).86
- Figura 16A. Resíduos das Equações 1, 2, 3, 4 e 8 ajustadas aos dados do penetrômetro eletrônico obtidos no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 2, de textura argilosa, em função das variáveis independentes: índice S (S), estresse efetivo (σ) e conteúdo de água no solo (U_g)87
- Figura 17A. Resíduos das Equações 1, 2, 3, 4 e 8 ajustadas aos dados do penetrômetro de impacto obtidos no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 2, de textura argilosa, em função das variáveis independentes: índice S (S), estresse efetivo (σ) e conteúdo de água no solo (U_g).88
- Figura 18B. Resíduos das Equações 1, 2, 3, 4 e 8 ajustadas aos dados do Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1, de textura média, em função das variáveis independentes: índice S (S), estresse efetivo (σ) e conteúdo de água no solo (U_g).90
- Figura 19B . Resíduos das Equações 1, 2, 3, 4 e 8 ajustadas aos dados do Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 2, de textura argilosa, em função das variáveis independentes: índice S (S), estresse efetivo (σ) e conteúdo de água no solo (U_g).91

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

O solo deve prover uma estrutura estável e um suporte adequado para as plantas, mas não deve inibir a proliferação das raízes e a atividade da fauna. Sob esse aspecto, as condições físicas do solo são essenciais para o crescimento das culturas, já que determinam o armazenamento e o fornecimento de água, nutrientes disponíveis, oxigênio e temperatura adequada. Condições físicas do solo que permitam e/ou promovam essas respostas constituem boa qualidade física do solo (TOPP et al., 1997).

No entanto, nem sempre essas condições são encontradas no campo, devido ao manejo inadequado do solo que ocasiona a sua degradação e a queda no rendimento de muitas culturas (PRADO et al., 2002). Assim, uma das principais conseqüências do manejo inadequado do solo é a compactação que leva à perda da sustentabilidade e à redução da produtividade (OLIVEIRA et al., 2003)

Por outro lado, a qualidade do solo pode ser mantida ou melhorada com o uso de sistemas de manejo sustentáveis, colaborando para a manutenção da produtividade das culturas em longo prazo (GREGORICH, 2002). Nesse sentido, o sistema de semeadura direta vem se destacando por constituir uma excelente alternativa de manejo conservacionista do solo e vem sendo difundido amplamente no país (KLUTHCOUSKI et al., 2000).

Nesse sistema, os resíduos vegetais são mantidos na superfície, contribuindo continuamente com o aporte de matéria orgânica ao solo, a qual é responsável pela conservação e melhoria da qualidade física do solo (LAL & GREENLAND, 1979; CASTRO FILHO et al., 1998). Assim, a vegetação e seus resíduos protegem os agregados da superfície contra a desagregação pelo impacto da chuva e variações bruscas de umidade. Ao mesmo tempo, o contínuo fornecimento de material orgânico, bem como secreções radiculares, serve de fonte de energia para a atividade microbiana, cujos subprodutos, constituídos de moléculas orgânicas em diversas fases de decomposição, atuam como agentes de formação e estabilização de agregados (ALLISON, 1973; TISDALL & OADES, 1982). Ao lado desses benefícios, manifesta-se também o efeito mecânico e físico das raízes sobre a formação dos agregados. As pressões de crescimento, formação de zonas de depleção de água e acumulação e precipitação de sais, decorrentes de fluxos ocasionados pela atividade da planta, são

fenômenos importantes na formação e estabilização de agregados em zonas adjacentes às raízes (ALLISON, 1973; TISDALL & OADES, 1982).

Assim, o estado de agregação do solo é de grande importância para as atividades agrícolas, uma vez que está relacionado com a sua estruturação, e conseqüentemente, com a aeração do solo, desenvolvimento radicular das plantas, suprimento de nutrientes, resistência do solo à penetração, retenção e armazenamento de água, resistência à erosão, dentre outros (DUFRANC et al., 2004).

Dessa forma, a compreensão e a quantificação do impacto do uso e manejo do solo na sua qualidade são fundamentais no desenvolvimento e seleção de sistemas agrícolas sustentáveis (DEXTER & YOUNGS, 1992), justificando assim, a importância do presente estudo.

Qualidade dos solos agrícolas e sistemas de manejo

Nos sistemas agrícolas, a qualidade do solo é monitorada com vistas ao manejo do sistema para incentivar a produção, sem degradar os solos e o ambiente (GREGORICH, 2002). Assim, um sistema de manejo poderá ser considerado sustentável se mantiver ou melhorar a qualidade do solo e do ambiente, bem como alcançar adequadas produtividades das culturas em longo prazo.

Nesse sentido, destaca-se o sistema de semeadura direta como uma boa opção para o manejo do solo (DERPSCH et al., 1985; TORRES & SARAIVA, 1998; KLUTHCOUSKI et al., 2000). O interesse nesse sistema de cultivo está relacionado à utilização permanente da cobertura do solo, associada ao preparo conservacionista que minimiza as perdas de solo por erosão (DERPSCH et al., 1985). Além da proteção do solo, outra característica importante do sistema de semeadura direta reside no aporte de matéria orgânica proporcionado pelo aumento da cobertura vegetal, tendo como conseqüência alterações positivas nas condições físico-químicas e biológicas do solo.

A produção de cobertura vegetal afeta o teor de matéria orgânica do solo que é muito importante para a sua conservação, à medida que, quanto maior o teor de matéria orgânica do solo, maior também é a estabilidade dos agregados, melhorando a estrutura do solo de forma a permitir maior infiltração, diminuindo o escoamento superficial de água (WOHLENBERG et al., 2004; MELLO et al., 2006). Assim, STONE

et al. (2000) verificaram que o sistema de semeadura direta com quatro anos e com adequada cobertura verde, propicia maior economia de água em comparação ao sistema de cultivo convencional.

Os sistemas de manejo do solo têm a finalidade de criar condições favoráveis ao desenvolvimento das culturas. Todavia, a intensificação do uso de máquinas agrícolas, nas várias etapas dos processos de produção, é a principal responsável pela compactação do solo, com consequências para o aumento dos processos erosivos e da energia necessária para o preparo do solo (SOANE & OUWERKERK, 1994).

O manejo do solo também influencia a rugosidade na superfície, constituindo-se principal fator que afeta a erosão hídrica (LEITE et al., 2004). Para BEUTLER et al. (2003), a chuva e a enxurrada combinadas são os agentes ativos da erosão hídrica, a qual é também influenciada pela cobertura do solo, proporcionada por alguns sistemas de manejo. Dessa forma, os sistemas de manejo conservacionistas reduzem a erosão hídrica em relação aos sistemas de cultivo convencionais, pois o solo se mantém coberto por maior período de tempo, proporcionando aumento da rugosidade superficial do solo.

Nesse sentido, manter a qualidade física do solo é fundamental para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas e, o seu monitoramento deve ser feito por meio de indicadores que descrevam o comportamento físico do mesmo.

Indicadores de qualidade do solo

A habilidade ou capacidade de um solo desempenhar uma função desejada é freqüentemente dependente de um ou mais dos vários processos dinâmicos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no solo (BRADY & WEIL, 2002). Nem sempre é possível medir as taxas desses processos, mas se podem medir os atributos específicos que são indicativos das mesmas. Os atributos medidos para considerar a qualidade do solo são denominados de indicadores. Os atributos físicos freqüentemente usados como indicadores para avaliar a qualidade do solo baseiam-se na textura, na densidade, na porosidade, na resistência do solo à penetração, na capacidade de retenção, infiltração e transporte de água e na erosão (BRADY & WEIL, 2002).

O sistema solo é dinâmico, e como base para a avaliação da sua qualidade em relação à sustentabilidade ambiental os indicadores escolhidos devem ser aqueles que mais respondam ao seu uso e manejo, e consigam definir os sistemas que ocasionam maior ou menor impacto (LARSON & PIERCE, 1994), pois um índice de qualidade do solo deve servir como indicador da capacidade do solo para a produção sustentável das culturas. Assim, o monitoramento da qualidade do solo é importante para detectar os problemas e indicar ações corretivas necessárias (KARLEN & STOTT, 1994).

Características indicadoras da qualidade do solo para serem de utilidade prática devem contemplar propriedades e processos físicos, químicos e biológicos do solo; devem ser acessível aos usuários, em termos de facilidade de medição, além de apresentar o caráter de reprodutibilidade; devem ser aplicáveis em condições de campo, permitindo também relacionar medidas obtidas em laboratório e em campo; devem possuir critérios definidos para quantificar e interpretar seus valores; devem ter sensibilidade às variações de manejo e de clima para permitir intervenções, visando melhorar a qualidade do solo e, devem permitir avaliações da qualidade do solo à curto e à longo prazo, compondo assim, bancos de dados pré ou pró-existentes (DORAN & PARKIN, 1994; KARLEN & STOTT, 1994; LARSON & PIERCE, 1994; DORAN & ZEISS, 2000).

Assim, a escolha dos indicadores a serem utilizados em determinada situação é dependente da finalidade da avaliação da qualidade do solo. Uma avaliação indicada para a produção das culturas pode incluir indicadores físicos e químicos diferentes de outra indicada para analisar a suscetibilidade à erosão, ou até incluir os mesmos indicadores, porém com diferentes importâncias relativas de cada um deles (KARLEN & STOTT, 1994).

Resistência do solo à penetração

Frequentemente o desenvolvimento radicular das plantas encontra-se restrito, devido à impedância mecânica ocasionada pela compactação do solo (PASSIOURA, 2002). A compactação do solo é diretamente relacionada à resistência do solo à penetração, a qual, por sua vez, está intimamente ligada ao desenvolvimento radicular das plantas. Conforme CAMARGO (1983), o alongamento radicular só é possível

quando a pressão de crescimento das raízes for maior do que a resistência do solo à penetração. Segundo GREGORY (2006) existem duas respostas óbvias das plantas à impedância mecânica: diminuição da taxa de alongamento e um aumento do seu diâmetro imediatamente antes da sua extremidade.

Muitos pesquisadores consideram que os valores de resistência do solo à penetração acima de 2,00 MPa são restritivos ao desenvolvimento radicular com reflexos na produtividade das culturas (TAYLOR et al., 1966; SILVA et al., 1994; TORMENA et al., 1998; NEIRO et al., 2003). No entanto, há resultados que mostram que esse valor é variável (ROSOLEM et al., 1999; FOLONI et al., 2003; TORMENA et al., 2004; BEUTLER et al., 2006; FREDDI et al., 2006; FREDDI et al., 2007).

Dessa forma, TORMENA et al. (2004), quantificando algumas propriedades físicas em um Latossolo Vermelho eutroférico, verificaram que valores iguais a 2,00 MPa de resistência do solo à penetração não foram restritivos à cultura da soja. Segundo BEUTLER et al. (2006), o valor de resistência do solo à penetração que promove a diminuição da produtividade, variou entre as cultivares de soja de 2,24 a 2,97 MPa, para um Latossolo Vermelho textura média.

Contudo, FOLONI et al. (2003) afirmam que o sistema radicular das plantas de milho não é capaz de romper uma camada compactada de solo com resistência do solo à penetração de 1,40 MPa. Além disso, ROSOLEM et al. (1999) constataram que a resistência do solo à penetração de 1,30 MPa reduz à metade o crescimento das raízes seminais do milho. Porém, FREDDI et al. (2006) observaram que valores variando de 0,90 a 2,00 MPa não diminuiram a produtividade do milho.

A dificuldade em determinar os valores de resistência do solo à penetração críticos ao desenvolvimento das plantas deve ser atribuída possivelmente à variação dessa medida com os atributos do solo.

A resistência do solo à penetração, mensurada pela penetrometria (BENGOUGH & MULLINS, 1990; TORMENA & ROLOFF, 1996), indica a relação entre a força exercida para a penetração no solo, de uma haste provida de um cone metálico numa extremidade, e a sua área basal, que é constante e conhecida. Esse método apresenta algumas vantagens por ser rápido, fácil e possuir boa correlação com o desenvolvimento radicular das plantas (BENGOUGH et al., 2001); como desvantagem, destaca-se a relação de dependência entre a resistência do solo à penetração e outros

atributos do solo, como o conteúdo de água e a densidade (BAILEY et al., 1986; CUNHA et al., 2002).

Contudo, ABREU et al. (2004) e AGGARWAL et al (2006) concluíram que a resistência do solo à penetração é mais sensível à mudanças no conteúdo de água, do que na densidade do solo. A restrição é que com a diminuição do conteúdo de água no solo, há um incremento na resistência do solo à penetração (FREDDI et al., 2006; LIMA et al, 2006), o que faz com que haja uma sub ou superestimativa na interpretação dos resultados (BUSSCHER et al., 1997).

BAILEY et al. (1986) relata que a resistência do solo à penetração obtida em diferentes condições de densidade e/ou conteúdo de água no solo é difícil de ser comparada. Além disso, conforme BUSSCHER (1990), diferenças na resistência do solo à penetração, ocasionadas por diferentes tratamentos, podem não ser detectadas devido ao efeito do conteúdo de água no solo. Devido a isso, segundo LAPEN et al. (2004) a resistência do solo à penetração apresenta alta variação ao longo do ciclo das culturas.

A partir dos resultados obtidos por TORMENA et al. (2004), verifica-se que, no sistema de semeadura direta, os valores de resistência à penetração são maiores do que no cultivo convencional, independentemente da umidade do solo, podendo atingir valores críticos ao crescimento das plantas. Segundo SILVA et al. (2003), o tráfego contínuo e inadequado de rodados de máquinas e a ação da soleira dos implementos sobre áreas agrícolas têm provocado alterações nos atributos físicos e mecânicos dos solos, e portanto, maior resistência do solo à penetração.

A correção dos dados de resistência do solo à penetração para um mesmo conteúdo de água no solo pode ajudar a reduzir problemas de interpretação de resultados obtidos em diversas condições de campo e sistemas de manejo (BUSSCHER et al., 1997). Nesse sentido, pesquisadores têm realizado estudos para desenvolver funções de pedotransferência que traduzam essa relação. (Quadro 1).

Quadro 1. Equações propostas para a curva de resistência do solo à penetração presentes na literatura

Curvas de resistência do solo à penetração	Referência
$RP = \frac{aDs^b}{c+(Ug-d)^2}$	AYERS & PERUMPRAL (1982)
$\alpha \frac{RP}{K} = a \left(\frac{Ds}{\rho} \right)^b (e^{-cUg})$	OHU et al. (1988)
$RP = aDs^bUg^c$	BUSSCHER et al. (1990)
$RP = aDs - bUg + c$	LINS E SILVA (1994)
$RP = aUg^b$ $RP = a(1 - Ug)^b$ $RP = ae^{bUg}$	BUSSCHER et al. (1997)
$RP = ah^b - ch$	TO & KAY (2005)
$RP = a + b \left(\frac{1}{S} \right) + c\sigma$	DEXTER et al. (2007)
$RP = a + be^{-\frac{Ug}{c}}$	ALMEIDA et al. (2008)

RP é a resistência do solo à penetração em MPa; *Ds* é a densidade do solo em Mg m⁻³; *Ug* é o conteúdo de água em kg kg⁻¹; α é um fator adimensional, numericamente igual a *k*; *k* representa o módulo de elasticidade em MPa; ρ é a densidade de partículas do solo em Mg m⁻³; *e* representa a base dos logaritmos naturais; *h* representa o potencial de água no solo em MPa; *S* representa um índice de qualidade física do solo; σ é dado pelo estresse efetivo, e *a*, *b*, *c* e *d* são os coeficientes da equação.

Densidade e porosidade do solo

Os solos devem apresentar resistência suficiente para fornecer fixação para a planta ao longo do seu ciclo de vida e para sustentar o sistema de poros contendo água e ar que são essenciais para o seu desenvolvimento. Contudo, a compactação do solo, que pode ser oriunda de processos pedogenéticos (CAMARGO, 1983), ou da atividade agrícola, devido ao manejo inadequado, é uma alteração na estrutura do solo onde ocorre uma reorganização das suas partículas e de seus agregados (DIAS JÚNIOR, 2000; REZENDE, 2000; STONE et al., 2002; RICHART et al. 2005) ocasionando uma

redução, linear, da porosidade total e do espaço de aeração, além do aumento da densidade do solo (BORGES et al., 1999).

Dessa forma, regiões de elevada densidade do solo podem limitar o desenvolvimento das raízes porque oferecem elevada resistência do solo à penetração, restringindo o suprimento de água, nutrientes e oxigênio às plantas. Segundo GREGORY (2006) não existe muita informação sobre o tamanho mínimo do poro em que a raiz possa crescer sem ter que ampliá-lo, mas poucas plantas tem raízes menores que 10 μm de diâmetro. Isso significa que as raízes são frequentemente maiores que os poros que retém água na capacidade de campo. Os poros de drenagem são os poros nos quais as raízes podem crescer, mas o crescimento será inibido a menos que o solo tenha resistência suficiente para permitir que a extremidade da raiz possa larguear o poro para proceder sua alongação. Se o solo está compactado e não é passível de deformação, então as raízes tem uma capacidade limitada para modificar sua anatomia para ajustar-se ao tamanho do poro de tamanho menor que o seu diâmetro.

Assim, a degradação física do solo afeta diretamente a produtividade das culturas e, conseqüentemente, a qualidade dos agroecossistemas (CARVALHO et al., 2004). Nesse sentido, o estudo da qualidade física do solo pode ser feito não só pelo volume e tamanho de poros, como também pelas relações entre a massa e o volume de um determinado solo, ou seja, devido à densidade do solo, que segundo IMHOFF et al. (2001) é um dos atributos físicos mais empregados como indicador da qualidade do solos.

As práticas inadequadas de uso e manejo das áreas produtivas, como o preparo excessivo do solo, com o uso de grade aradora, promove incremento da densidade do solo. O aumento nos valores de densidade do solo dificulta a penetração das raízes no solo, não só pela elevação da resistência à penetração como também pela diminuição da sua porosidade, com reflexos negativos na qualidade do solo (STONE & SILVEIRA, 2001; LIMA et al., 2005). Entretanto, é possível adotar práticas de manejo que minimizem seu efeito degenerativo, causando o mínimo de entropia aos sistemas produtivos, como é o caso das técnicas que envolvem o sistema de semeadura direta.

Retenção de água no solo e índice S

A capacidade de um solo em reter e disponibilizar água para as plantas é representada pela sua curva de retenção de água, que é a relação entre o conteúdo de água no solo e a tensão na qual ela está retida. Dessa forma, a curva de retenção de água no solo é elaborada pela determinação do conteúdo de água no solo em diferentes tensões.

O conhecimento da retenção de água no solo é essencial para a compreensão da infiltração, da redistribuição e da disponibilidade de água para as culturas (WALCZAK et al, 2006). Assim sendo, a curva de retenção de água pode ser utilizada como um indicador da qualidade física do solo.

DEXTER (2004a,b,c) propôs o conceito do índice S como indicador da qualidade física e estrutural do solo. O seu valor é fisicamente baseado na curva de retenção de água no solo, sendo definido como o valor da inclinação da curva no seu ponto de inflexão (DEXTER, 2004a).

Esse índice é um indicador da condição estrutural determinada pela microestrutura do solo que estabelece parte da porosidade estrutural notadamente composta por uma rede de poros interligados (fendas, microfendas), sensíveis aos efeitos dos sistemas de uso e manejo do solo. Assim, o índice S é um parâmetro usado para quantificar a qualidade física do solo, apresentando grande sensibilidade em perceber alterações devido ao manejo do solo para o desenvolvimento das plantas (DEXTER, 2004a,b,c).

Conforme DEXTER (2004a,b,c), solos fisicamente degradados, considerados altamente restritivos (nenhum crescimento radicular), apresentam valores do índice S menores que 0,020. Ao contrário, solos que apresentam valores do índice S maiores que 0,035 são considerados favoráveis ao crescimento e desenvolvimento das raízes. Contudo, valores do índice S entre 0,020 e 0,035 são apresentados por solos considerados pouco favoráveis ao desenvolvimento das raízes.

NETTO et al. (2007) verificaram em um Latossolo Vermelho argiloso, que mesmo sendo exposto à perda de sua qualidade física, devido ao tráfego de máquinas e implementos agrícolas, os valores do índice S também foram superiores ao limite sugerido por DEXTER (2004a,b,c), considerado adequado ao desenvolvimento radicular das plantas. TORMENA et al. (2008) verificaram maiores valores do índice S

sob cultivo convencional (0,045 na linha e 0,036 na entrelinha da cultura) em relação àqueles sob sistema de semeadura direta (0,040 na linha e 0,033 na entrelinha da cultura), em um Latossolo Vermelho muito argiloso.

BEUTLER et al. (2008) verificaram, em um Latossolo Vermelho textura média, que o índice S apresentou valores de 0,056 a 0,062 como limitantes à produtividade da soja e do milho.

Densidade do solo máxima e densidade do solo relativa

A suscetibilidade do solo à compactação torna-se crítica toda vez que lhe são aplicadas pressões que venham exceder a sua capacidade de suporte de carga. Uma vez que tal capacidade é função da umidade, pode-se concluir que ela é o fator que governa a quantidade de deformação que poderá ocorrer, refletindo sua condição de densidade inicial e o estado de compactação (DIAS JÚNIOR, 2000). Assim, quando o solo está mais seco, sua capacidade de suporte de carga poderá ser suficiente para absorver pressões aplicadas, a ponto de sua compactação não ser significativa (BEUTLER et al., 2001; TAVARES FILHO et al., 2001).

Os sistemas de manejo do solo têm influencia direta na susceptibilidade de um solo à compactação, pois ela torna-se maior à medida que decresce a quantidade de material orgânico existente (BRAIDA, et al., 2006). Em geral, para um mesmo nível de energia, quanto maior é o teor de matéria orgânica no solo, menor é o valor de densidade máxima obtido e maior é o conteúdo de água necessário para atingi-lo (BRAIDA, et al., 2006).

A densidade do solo máxima pode ser obtida pelo ensaio de Proctor, a partir do ajuste da densidade do solo (D_s , Mg m^{-3}) em função da umidade (U_g , kg kg^{-1}) por meio de uma equação polinomial de segundo grau ($D_s = aU_g^2 + bU_g + c$). Assim, a umidade ótima para máxima compactação ou umidade crítica de compactação é obtida por: $U_{gc} = \frac{-b}{2a}$, e a densidade do solo máxima (D_{sm}) é determinada pelo ponto de máxima da curva: $D_{sm} = \frac{-(b^2 - 4ac)}{4a}$.

A densidade do solo máxima também é dependente da composição mineral dos solos, e, segundo KLEIN (2008) e BRAIDA et al. (2006), quanto menor é o teor de argila

no solo, maior é a densidade do solo máxima, ou seja, solos arenosos apresentam densidade maior do que solos argilosos. BEUTLER et al. (2005) verificaram que a densidade do solo máxima de um Latossolo Vermelho textura média (271 g kg⁻¹ de argila) e de um Latossolo Vermelho textura argilosa (517 g kg⁻¹ de argila) foi de 1,85 Mg m⁻³ e de 1,54 Mg m⁻³, respectivamente. FIGUEIREDO et al. (2000) avaliando o efeito de diferentes sistemas de manejo do solo na umidade crítica de compactação e na densidade do solo máxima de um Latossolo Vermelho muito argiloso concluíram que as operações motomecanizadas devem ser executadas quando a umidade do solo for menor que 0,29 kg kg⁻¹.

Segundo KLEIN (2008) mesmo os solos com mesma composição mineral e textura podem apresentar grande amplitude de densidade em virtude do intensivo manejo. Assim, essas diferenças de densidade e amplitude dificultam a comparação de resultados de densidade obtidos, ou mesmo de outros indicadores obtidos indiretamente a partir da densidade.

Nesse sentido, KLEIN (2006) sugere o conceito de densidade do solo relativa (D_{sr}), que consiste da divisão da densidade do solo no campo pela densidade do solo máxima, obtida pelo ensaio de Proctor: $D_{sr} = \frac{D_s}{D_{sm}} * 100$.

A densidade do solo máxima varia de acordo, sobretudo, com a textura do solo, o mesmo ocorrendo com a densidade do solo no campo. Desse modo, independentemente da textura, a densidade do solo relativa permite obter valores que independem do tipo de solo, que descrevem a qualidade física do solo e que podem ser então comparados (KLEIN, 2008).

BEUTLER et al. (2005) consideram que o valor de densidade do solo relativa ótima para o desenvolvimento da cultura da soja em laboratório é de 84% e 75% para solos com 570 e 270 g kg⁻¹ de argila. Já em campo, o valor ideal de densidade do solo relativa é de 80% para solos com 570 g kg⁻¹ de argila.

OBJETIVOS

O solo deve prover uma estrutura estável e um suporte adequado para as plantas sem inibir a proliferação das raízes e a atividade da fauna. Sob esse aspecto, as condições físicas do solo são essenciais para o crescimento das culturas, já que determinam o armazenamento e o fornecimento de água, nutrientes disponíveis, oxigênio e temperatura adequada. No entanto, nem sempre essas condições são encontradas no campo, devido ao manejo inadequado do solo que ocasiona a sua degradação e a diminuição no rendimento de muitas culturas. Contudo, a qualidade do solo pode ser mantida ou melhorada com o uso de sistemas de manejo sustentáveis. Nesse sentido, o sistema de semeadura direta vem se destacando por constituir uma excelente alternativa de manejo conservacionista do solo.

Assim, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar a qualidade de um Latossolo Vermelho sob sistema de semeadura direta e cultivo convencional, por meio de indicadores físicos e da avaliação da produção das culturas da soja e do milho.

Os objetivos específicos foram:

- i)* comparar a eficiência de funções de pedotransferência para a curva de resistência do solo à penetração presentes na literatura, por meio do ajuste de dados obtidos com o penetrômetro de impacto (campo) e também com o penetrômetro eletrônico (laboratório);
- ii)* determinar a resistência do solo à penetração durante o ciclo das culturas da soja e do milho relacionando-a ao conteúdo de água no solo; e,
- iii)* determinar alguns indicadores de qualidade física do solo, relacionando-os com as características agrônômicas das culturas da soja e do milho.

A tese é disposta em capítulos, compondo, além das considerações gerais, apresentadas no capítulo 1, os capítulos 2 (objetivo *i*) e 3 (objetivos *ii* e *iii*).

CAPÍTULO 2 – FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA A CURVA DE RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO: VALIDAÇÃO DE MODELOS

RESUMO - O objetivo da análise de regressão é usar as variáveis independentes, cujos valores são conhecidos e de mais fácil obtenção, para prever os valores da variável dependente. Quando essas variáveis são atributos edáficos as regressões são denominadas funções de pedotransferência. Nesse sentido, são propostas na literatura diversas funções de pedotransferência que visam prever a resistência do solo à penetração (RP). Objetivou-se comparar a eficiência de cinco funções de pedotransferência para a curva de resistência do solo à penetração (CRP), presentes na literatura, por meio do ajuste de dados obtidos com o penetrômetro de impacto (campo) e com o penetrômetro eletrônico (laboratório), em um Latossolo sob diferentes sistemas de manejo (semeadura direta e cultivo convencional), durante o ciclo das culturas do milho e da soja. Foram coletadas amostras indeformadas de solo na entrelinha das culturas, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, após a semeadura, no florescimento e na colheita, para a determinação dos atributos físico-hídricos do solo e também da RP, com o uso do penetrômetro eletrônico. A RP, obtida com o penetrômetro de impacto, foi determinada conforme a variação do conteúdo de água no solo ao longo do ciclo das culturas. As CRPs tiveram a precisão e a acurácia testadas por meio de parâmetros estatísticos e foram comparadas pelo teste F. Houve sobreposição dos valores estimados pelo ajuste das CRPs, evidenciando que a maneira de obtenção da RP (campo ou laboratório) não influenciou a relação entre a RP e os atributos do solo. As Equações $RP = aUg^b$; $RP = a(1 - Ug)^b$; $RP = ae^{bUg}$ e $RP = a + be^{-\frac{Ug}{c}}$ não diferiram e foram as mais precisas e acuradas na predição da RP.

Palavras-chave: penetrômetro de impacto, penetrômetro eletrônico, atributos físico-hídricos do solo, precisão e acuracidade

2.1. INTRODUÇÃO

A análise de regressão é uma técnica estatística que pode ser usada para analisar a relação entre uma única variável dependente e uma ou várias variáveis independentes. O objetivo da análise de regressão é usar as variáveis independentes, cujos valores são conhecidos e de mais fácil obtenção, para prever os valores da variável dependente. As variáveis independentes são ponderadas pelo procedimento da análise de regressão para garantir máxima previsão a partir do conjunto de variáveis independentes (HAIR JUNIOR et al., 2005).

Quando as variáveis são atributos edáficos essas regressões são denominadas funções de pedotransferência, segundo BOUMA (1989), que introduziu o termo pela primeira vez. Dessa forma, as funções de pedotransferência podem ser definidas como regressões utilizadas para fazer estimativas de atributos edáficos a partir de outros atributos que podem ser mensurados com maior facilidade e baixo custo (MCBRATNEY et al., 2002; MINASNY, 2007). Nesse contexto, são propostas na literatura diversas funções de pedotransferência que visam predizer a resistência do solo à penetração.

BUSSCHER et al. (1997) verificaram, a partir de dados coletados em um Argissolo (Typic Kandudults) de textura argilosa, que as três equações apresentadas a seguir foram eficientes em predizer a resistência do solo à penetração:

$$RP = aUg^b \quad (1)$$

$$RP = a(1 - Ug)^b \quad (2)$$

$$RP = ae^{bUg} \quad (3)$$

em que RP é a resistência do solo à penetração em MPa, Ug é o conteúdo de água em kg kg^{-1} e a , b e c são os parâmetros da equação.

As Equações 1 e 2 foram propostas por MIELKE et al. (1994) e a Equação 3 foi baseada em um modelo proposto por BUSSCHER (1990).

DEXTER et al. (2007) propuseram para a curva de resistência do solo à penetração uma equação fundamentada na teoria do índice S, um índice de qualidade física do solo, proposto por DEXTER (2004a,b,c):

$$RP = a + b \left(\frac{1}{S} \right) + c\sigma \quad (4)$$

σ é dado pelo estresse efetivo (TO & KAY, 2005; WHALLEY et al., 2005).

Para solos que apresentem valores do índice S próximos ou inferiores a 0,02, ou seja, solos degradados, as plantas podem ter o seu desenvolvimento radicular paralisado, provavelmente devido à impedância mecânica (DEXTER, 2004a,b,c). Esse fato levou à premissa de que a resistência do solo à penetração poderia ser estimada a partir desse parâmetro (DEXTER et al., 2007).

Dessa forma, segundo DEXTER et al. (2007), a expressão $1/S$ reflete exatamente o grau de compactação do solo. Esses pesquisadores relatam ainda que a resistência do solo à penetração predita pela Equação (4) pode ser aplicada nas comparações de solos de diferentes texturas, em densidades diferentes e em diferentes conteúdos de água. Ainda WHALLEY et al. (2005), estudando a relação entre o σ e a resistência do solo à penetração, verificaram que o desenvolvimento radicular não é prejudicado em tensões menores que 0,25 MPa.

A Equação (4) faz uma predição da resistência do solo à penetração indiretamente a partir do conteúdo de água, pois seus dois termos, S e σ , são determinados por atributos hídricos do solo:

$$S = -n(Ug_{sat} - Ug_{res}) \left(1 + \frac{1}{m} \right)^{-(1+m)} \quad (5)$$

em que n e m são os parâmetros da equação da curva de retenção de água no solo, ajustada segundo van GENUCHTEN (1980), Ug_{sat} e Ug_{res} são o conteúdo de água na saturação e residual (kg kg^{-1}), respectivamente, e

$$\sigma = \chi h \quad (6)$$

em que χ é o grau de saturação ($\chi = (Ug - Ug_{res}) / (Ug_{sat} - Ug_{res})$) e h é a tensão de água no solo, calculada a partir de:

$$h(\chi) = \frac{1}{\alpha} \left(\chi^{-\frac{1}{m}} - 1 \right)^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

em que α é parâmetro da curva de retenção de água no solo, ajustada conforme van GENUCHTEN (1980).

ALMEIDA et al. (2008) propuseram para a curva de resistência do solo à penetração uma equação exponencial decrescente, representada pelo seguinte modelo:

$$RP = a + be^{-\frac{Ug}{c}} \quad (8)$$

Essa equação foi ajustada, a partir de dados obtidos em solos brasileiros de diferentes classes texturais (Neossolo Quartzarênico, Argissolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho textura média e Latossolo Vermelho muito argiloso).

Segundo TEDESCHI (2006) os modelos são representações matemáticas de mecanismos que governam fenômenos naturais que não são totalmente conhecidos, controlados ou compreendidos. Conforme esse pesquisador, o processo de modelagem engloba diversas etapas. Dentre elas, a avaliação da adequação do modelo é uma etapa essencial, já que indica o grau de precisão e acuracidade das previsões do mesmo. Essa é uma fase importante quer seja para aumentar a confiança no modelo atual, ou para permitir a seleção de modelos alternativos.

A avaliação da adequação dos modelos só é possível pela combinação de várias análises estatísticas e investigação adequada sobre os fins para os quais os mesmos foram inicialmente propostos e desenvolvidos. Assim, a análise estatística adequada é uma fase indispensável durante o desenvolvimento, avaliação e etapas de revisão de um modelo, já que a identificação e a decisão de aceitação dos erros são passos importantes para o desenvolvimento de modelos mais confiáveis e precisos (TEDESCHI, 2006).

Assim, segundo BUDIMAN et al (2003) existem dois princípios referentes ao conceito de funções de pedotransferência, relacionados à eficiência e à incerteza das mesmas. O primeiro princípio é não prognosticar algo que é mais fácil e mais barato de medir ou determinar, ou seja, como o objetivo de funções de pedotransferência é

predizer propriedades cujas medidas ou determinações diretas são difíceis ou de alto custo, os preditores devem ser de obtenção mais fácil ou mais barata. O outro consiste em não usar funções de pedotransferência, a menos que se possa avaliar a incerteza associada e, para um determinado problema, se um conjunto de funções de pedotransferência alternativas está disponível, usar aquela com menor variância.

Objetivou-se, portanto, com este trabalho, comparar a eficiência das Equações 1, 2, 3, 4 e 8 em predizer a resistência do solo à penetração, por meio do ajuste de dados obtidos com o penetrômetro de impacto (campo) e também com o penetrômetro eletrônico (laboratório) em um Latossolo sob diferentes sistemas de manejo (semeadura direta e cultivo convencional), durante o ciclo das culturas do milho e da soja.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em Jaboticabal, SP, Brasil. O solo das duas áreas experimentais foi classificado por ANDRIOLI & CENTURION (1999), de acordo com os critérios da EMBRAPA (2006), como Latossolo Vermelho distrófico típico, textura argilosa, A moderado, caulínítico, hipoférrico. O relevo é plano e o clima é mesotérmico de inverno seco (Cwa), segundo a classificação de Köppen.

A composição granulométrica do solo foi determinada nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, conforme GEE & BAUDER (1986). O conteúdo de matéria orgânica do solo foi determinado conforme RAIJ et al. (2001). Dessa forma, verificou-se, nessas camadas, textura média do solo para a área experimental 1 (LVd1), de coordenadas geográficas 21°15'11"S e 48°15'58"W a 619 m de altitude, e textura argilosa para a área experimental 2 (LVd2) de coordenadas geográficas 21°15'33"S 48°16'17"W a 607 m de altitude (Tabela 1).

Tabela 1. Conteúdo de matéria orgânica e granulometria dos solos nos sistemas de manejo

Tratamento	Camada m	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	M.O. dag kg ⁻¹
		----- g kg ⁻¹ -----				
CC _{LVd1}	0-0,10	410	315	25	250	16
	0,10-0,20	323	334	37	306	15
	0,20-0,30	314	299	35	352	10
PD _{LVd1}	0-0,10	401	321	42	236	17
	0,10-0,20	396	309	24	271	13
	0,20-0,30	328	362	19	291	11
CC _{LVd2}	0-0,10	219	179	77	525	20
	0,10-0,20	220	181	122	477	17
	0,20-0,30	182	170	131	517	13
PD _{LVd2}	0-0,10	216	193	163	428	22
	0,10-0,20	210	196	166	428	16
	0,20-0,30	204	205	148	443	14

MO: matéria orgânica. CC_{LVd1}, CC_{LVd2}, PD_{LVd1} e PD_{LVd2}: cultivo convencional e semeadura direta na área experimental 1 (LVd1) e na área experimental 2 (LVd2), respectivamente.

Os sistemas de uso e manejo adotados foram: cultivo convencional (CC_{LVd1}) e sistema de semeadura direta por sete e oito anos (PD_{LVd1}), na LVd1, e cultivo convencional (CC_{LVd2}) e semeadura direta por nove e dez anos (PD_{LVd2}), na LVd2.

Para o cultivo convencional, procedeu-se o preparo do solo realizando uma escarificação até 0,30 m de profundidade, seguida de uma gradagem pesada e uma gradagem leve. O controle inicial de plantas infestantes nessas áreas foi realizado com a aplicação de trifluralina (0,445 kg L⁻¹) a 0,890 kg ha⁻¹. Já a dessecação das áreas submetidas ao sistema de semeadura direta (rotação com milho - *Pennisetum americanum*) foi realizada utilizando-se a associação de s-metolaclo (0,960 kg L⁻¹) a 1,44 kg ha⁻¹ e glifosato (0,480 kg L⁻¹) a 0,96 kg ha⁻¹.

No dia 19 de novembro de 2008, foi semeada a soja (*Glycine max*), cultivar M-SOY 6101 da empresa Monsoy, a 0,03 m de profundidade, com 0,45 m de distância entrelinhas, visando uma população final de 400 mil plantas por hectare. As adubações basearam-se nos resultados das análises químicas do solo, com expectativa de alta produtividade, conforme RAIJ et al. (1997). O controle de plantas infestantes em pós-emergência foi realizado com a aplicação de flusifope-P-butílico (0,250 kg L⁻¹) a 0,12 kg ha⁻¹. A colheita da soja foi realizada manualmente no dia 12 de março de 2009.

No dia 17 de dezembro de 2009, foi semeada a cultura do milho (*Zea mays*), híbrido Impacto da empresa Syngenta, à 0,03 m de profundidade, 0,90 m de distância entrelinhas e uma população final de 60 mil plantas por hectare. As adubações também se basearam nos resultados das análises químicas do solo, com expectativa de alta produtividade, conforme RAIJ et al. (1997). Os herbicidas usados na condução da cultura foram nicosulfuron ($0,04 \text{ kg L}^{-1}$) a $0,032 \text{ kg ha}^{-1}$ e também atrazine ($0,5 \text{ kg L}^{-1}$) a 1 kg ha^{-1} . Foi realizada a colheita manual do milho no dia oito de maio de 2010.

Verificou-se a variação da resistência do solo à penetração em função do conteúdo de água no solo, nos diferentes tratamentos, durante o ciclo das culturas da soja e do milho, utilizando-se um penetrômetro de impacto e também um penetrômetro eletrônico.

A resistência do solo à penetração, obtida com o penetrômetro de impacto (modelo IAA/Planalsucar-Stolf, com ângulo de 30°), foi determinada nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, no meio da entrelinha das culturas, evitando-se as áreas sob o rodado do trator, conforme STOLF (1991). Essas avaliações foram realizadas conforme a variação do conteúdo de água no solo (ao longo do ciclo das culturas), o qual foi quantificado, nas mesmas camadas, pelo método gravimétrico, conforme EMBRAPA (1997).

Para a determinação da variação da resistência do solo à penetração, a partir do penetrômetro eletrônico, amostras indeformadas de solo, com cilindros de 0,03 m de altura e 0,048 m de diâmetro ($53,16 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$), foram coletadas após a semeadura, no florescimento e ao final do ciclo, na ocasião da colheita das culturas da soja e do milho. Essas amostras foram coletadas no centro das entrelinhas das culturas, evitando-se as áreas sob o rodado do trator, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. As amostras de solo foram saturadas e submetidas a diferentes tensões em câmaras de Richards (0,001; 0,003; 0,006; 0,01; 0,033; 0,06; 0,1 e 0,3 MPa) e, assim que atingiram o equilíbrio após cada tensão, foram pesadas para quantificação do conteúdo de água no solo e tiveram a resistência do solo à penetração determinada. Foi também determinada a resistência do solo à penetração em amostras de solo logo após a sua saturação, isto é, com o conteúdo de água na saturação. Essas medidas foram realizadas por meio de um penetrômetro eletrônico estático de laboratório com velocidade constante de penetração de 0,01 m por minuto, registro de uma leitura por segundo, cone com semi-ângulo de 30° e área de $3,14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$, equipado com atuador

linear e célula de carga de 20 kgf acoplada a um microcomputador para aquisição dos dados, conforme descrito por TORMENA et al. (1998). Foram utilizadas 100 leituras por subdeterminação, correspondentes à camada central do cilindro de 0,007 a 0,024 m, e calculado o valor médio das 200 leituras (duas subdeterminações) para representar a resistência do solo à penetração da amostra.

Foram coletadas amostras indeformadas de solo, com cilindros de 0,03 m de altura e 0,048 m de diâmetro ($53,16 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$), as quais foram saturadas e submetidas às tensões de 0,001; 0,003; 0,006; 0,01; 0,033; 0,06; 0,1 e 0,3 MPa, em câmaras de Richards com placa porosa (KLUTE, 1986). Nessas amostras foram determinados o conteúdo de água retida em cada tensão (KLUTE, 1986) e as curvas de retenção de água foram então ajustadas pela equação proposta por van GENUCHTHEN (1980):

$$Ug = \frac{(Ug_{sat} - Ug_{res})}{[1 + (\alpha h)^n]^{-m} + Ug_{res}} \quad (9)$$

Dessa forma foram obtidos os parâmetros α , n e m , utilizados na determinação da tensão de água no solo (Equação 7) e também do índice S (Equação 5).

As parcelas experimentais foram constituídas de cinco linhas de semeadura de seis metros de comprimento cada, considerando-se área útil as três linhas centrais desprezando-se um metro e meio de cada extremidade, em dez repetições.

As observações atípicas (*outliers*) foram identificadas sob uma perspectiva univariada por meio da conversão dos valores dos dados em escores padrão (*z-score*), eliminando-se aquelas com escores padrão de 2,5 ou mais, conforme recomendado por HAIR JUNIOR et al. (2005) para amostras pequenas, e também sob uma perspectiva bivariada, na qual pares das variáveis foram avaliados conjuntamente por meio de um diagrama de dispersão. Nesse caso, os pontos isolados no diagrama de dispersão também foram identificados como observações atípicas (HAIR JUNIOR et al., 2005).

Foram realizados ajustes para as curvas de resistência do solo à penetração por meio das Equações 1, 2, 3 e 8, ajustadas através do *software* Microcal Origin 6.0, e por meio da Equação 4, ajustada pela ferramenta de análise de dados do *software* Microsoft Office Excel 2007. Para isso, foram utilizados os dados obtidos em campo

(penetrômetro de impacto) e também em laboratório (penetrômetro eletrônico), no ano agrícola 2008/2009 (Tabela 2).

Tabela 2. Estatísticas descritivas básicas das variáveis resistência do solo à penetração (RP, MPa), conteúdo de água no solo (U_g , kg kg^{-1}), índice S (S) e estresse efetivo (σ) utilizadas no ajuste das equações para o Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, e na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa

Solo	Penetrômetro	Variáveis	n	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
LVd1	Eletrônico	U_g	39	0,16	0,03	0,12	0,21
		RP	39	1,48	0,85	0,36	3,30
		S	39	0,03	0,01	0,02	0,06
		σ	39	30,49	16,50	9,94	67,10
	Impacto	U_g	61	0,15	0,02	0,11	0,19
		RP	61	1,92	0,86	0,60	4,36
		S	61	0,03	0,01	0,02	0,04
		σ	61	35,84	12,98	14,81	67,93
LVd2	Eletrônico	U_g	40	0,23	0,02	0,19	0,27
		RP	40	1,96	1,17	0,50	5,27
		S	40	0,03	0,01	0,02	0,05
		σ	40	54,90	46,49	7,55	167,84
	Impacto	U_g	66	0,22	0,02	0,19	0,26
		RP	66	2,30	0,96	0,67	4,93
		S	66	0,04	0,01	0,02	0,06
		σ	66	53,43	33,66	17,55	142,35

Ano agrícola 2008/2009.

Todas as equações ajustadas foram submetidas à análise de variância. As premissas relativas à análise de regressão também foram verificadas, sendo: normalidade dos erros, pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, utilizando-se o *software* @Risk 4.5 for Excel, homocedasticidade da variância, pelo teste de Levene, por meio da ferramenta Action 1.1, e independência dos erros da regressão, por meio da análise dos gráficos dos resíduos em relação às outras variáveis, conforme recomendado por HAIR JUNIOR et al. (2005).

A eficiência das Equações 1, 2, 3, 4 e 8, ou seja, a validação das equações na predição da resistência do solo à penetração foi realizada a partir de alguns parâmetros estatísticos descritos a seguir, conforme recomendado por TEDESCHI (2006),

utilizando-se os dados obtidos no segundo ano do experimento (ano agrícola 2009/2010, Tabela 3).

Tabela 3. Estatísticas descritivas básicas das variáveis resistência do solo à penetração (RP, MPa), conteúdo de água no solo (Ug, kg kg⁻¹), índice S (S) e estresse efetivo (σ) utilizadas no ajuste das equações para o Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, e na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa

Solo	Penetrômetro	Variáveis	n	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
LVd1	Eletrônico	Ug	44	0,16	0,03	0,11	0,21
		RP	44	1,56	1,13	0,35	4,26
		S	44	0,03	0,01	0,02	0,06
		σ	44	32,23	22,12	6,92	91,15
	Impacto	Ug	68	0,15	0,03	0,11	0,21
		RP	68	1,93	1,00	0,45	4,20
		S	68	0,03	0,01	0,02	0,06
		σ	68	35,69	18,60	2,94	90,75
LVd2	Eletrônico	Ug	68	0,23	0,02	0,19	0,27
		RP	68	1,97	1,18	0,54	5,43
		S	68	0,03	0,01	0,02	0,05
		σ	68	60,79	70,25	10,00	337,66
	Impacto	Ug	44	0,22	0,02	0,19	0,27
		RP	44	2,44	1,11	0,71	4,65
		S	44	0,03	0,01	0,02	0,05
		σ	44	81,76	79,00	14,00	301,30

Ano agrícola 2009/2010.

Foi determinado o erro padrão da predição (RMSE), o qual é dado pela raiz do quadrado médio do resíduo:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{(n - p)}} \quad (10)$$

em que O_i são os valores observados, P_i são os valores estimados, n o número de pares dados e p é o número de parâmetros do modelo.

Foi também utilizado o coeficiente de eficiência (EF) para avaliar o ajuste dos valores observados versus estimados. O coeficiente EF é expresso como:

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \quad (11)$$

em que O representa a média dos valores observados.

E a diferença média (MD) foi calculada a partir da diferença média entre valores observados e calculados:

$$MD = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (12)$$

O parâmetro RMSE tem limite inferior igual a zero e EF e MD podem ser negativos. Quando os valores estimados e observados são os mesmos, os parâmetros estatísticos RMSE, EF e MD assumem valores iguais a 0, 1, e 0 (CERQUETANI & MARTINS FILHO, 2006), respectivamente.

As equações foram comparadas pelo teste F em relação à predição dos valores de resistência do solo à penetração, da seguinte forma:

$$F = \frac{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{i1} - O_i)^2}{n - p_1}}{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{i2} - O_i)^2}{n - p_2}} \sim F[(n_1 - p_1); (n_2 - p_2)] \quad (13)$$

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados referentes aos ajustes, realizados separadamente para os dados obtidos em laboratório e em campo, das curvas de resistência do solo à penetração a partir das Equações 1, 2, 3, 4 e 8 encontram-se na Tabela 4. O estudo dos resíduos mostrou que todas as premissas relativas à análise de regressão foram atendidas, ou seja, os resíduos apresentaram distribuição normal, pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha=0,05$), homocedasticidade da variância, pelo teste de Levene ($\alpha=0,05$) e independência em relação às variáveis explicativas (Apêndice A).

Tabela 4. Parâmetros ajustados pelas funções de pedotransferência para as curvas de resistência do solo à penetração, a partir de dados obtidos com o penetrômetro eletrônico (Eletrônico) e com o penetrômetro de impacto (Impacto), para o Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1) de textura média, e na área experimental 2 (LVd2) de textura argilosa

Penetrômetro		Coeficientes			R ²	F	Valor-p
		a	b	c			
LVd1							
Equação 1A							
Eletrônico	Estimativa	0,0015	-3,6717	-	0,95	732,1	0,00
	Erro padrão	0,0005	0,1697	-			
Impacto	Estimativa	0,0026	-3,3714	-	0,96	1392,9	0,00
	Erro padrão	0,0005	0,0992	-			
Equação 2A							
Eletrônico	Estimativa	48,8142	21,0722	-	0,95	721,1	0,00
	Erro padrão	7,4769	1,0304	-			
Impacto	Estimativa	48,6914	21,1793	-	0,95	1186,8	0,00
	Erro padrão	4,7359	0,6905	-			
Equação 3A							
Eletrônico	Estimativa	65,2275	-24,7990	-	0,95	735,4	0,00
	Erro padrão	10,4867	1,1469	-			
Impacto	Estimativa	62,2594	-24,5983	-	0,96	1230,5	0,00
	Erro padrão	6,2866	0,7578	-			
Equação 4A							
Eletrônico	Estimativa	-1,0056	0,0320	0,0466	0,81	74,5	0,00
	Erro padrão	0,2686	0,0062	0,0039			
Impacto	Estimativa	-0,6718	0,0180	0,0564	0,80	118,4	0,00
	Erro padrão	0,2517	0,0073	0,0039			
Equação 8A							
Eletrônico	Estimativa	0,1812	98,2950	0,0351	0,95	368,1	0,00
	Erro padrão	0,1425	40,2140	0,0043			
Impacto	Estimativa	0,4307	128,7436	0,0315	0,96	679,4	0,00
	Erro padrão	0,1325	39,7001	0,0029			
LVd2							
Equação 1B							
Eletrônico	Estimativa	0,0002	-6,1240	-	0,95	764,6	0,00
	Erro padrão	0,0001	0,2601	-			
Impacto	Estimativa	0,0006	-5,4300	-	0,96	1428,8	0,00
	Erro padrão	0,0001	0,1625	-			

Continua...

Tabela 4. Continuação

		Equação 2B					
Eletrônico	Estimativa	487,2817	21,8024	-	0,94	630,1	0,00
	Erro padrão	117,3502	1,0370	-			
Impacto	Estimativa	298,5995	19,8063	-	0,95	1340,9	0,00
	Erro padrão	42,9408	0,6185	-			
		Equação 3B					
Eletrônico	Estimativa	1010,3853	-27,9658	-	0,95	659,9	0,00
	Erro padrão	261,4454	1,2176	-			
Impacto	Estimativa	562,7807	-25,2645	-	0,96	1370,5	0,00
	Erro padrão	88,0586	0,7371	-			
		Equação 4B					
Eletrônico	Estimativa	0,6505	0,0028	0,0222	0,78	64,1	0,00
	Erro padrão	0,3370	0,0091	0,0020			
Impacto	Estimativa	1,3934	-0,0125	0,0234	0,59	44,8	0,00
	Erro padrão	0,2613	0,0109	0,0027			
		Equação 8B					
Eletrônico	Estimativa	0,5691	8835,7785	0,0253	0,96	387,8	0,00
	Erro padrão	0,1462	7118,8537	0,0027			
Impacto	Estimativa	0,3179	1166,8658	0,0341	0,96	691,1	0,00
	Erro padrão	0,2080	671,8252	0,0037			

A análise de variância da equação tem por finalidade testar o efeito do conjunto das variáveis explicativas sobre a variável dependente. Isso significa verificar se pelo menos uma das variáveis explicativas do modelo exerce efetivamente influência sobre a variável dependente. Logo, verificou-se que o teste F da análise de variância foi significativo para todas as equações ajustadas, indicando que pelo menos uma das variáveis explicativas, ou seja, os atributos do solo influenciaram (globalmente) a resistência do solo à penetração.

Na Figura 1, estão representados os valores observados da resistência do solo à penetração e também os valores estimados pelas Equações 1, 2, 3 e 8 em função dos valores observados do conteúdo de água no solo, obtidos em laboratório (penetrômetro eletrônico) e também em campo (penetrômetro de impacto), no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, e na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa. Observa-se sobreposição dos dados obtidos com o penetrômetro eletrônico e também com o penetrômetro de impacto, tanto para os dados observados como também para os dados estimados pelas curvas, evidenciando que a maneira de obtenção da resistência do solo à penetração (campo ou laboratório)

não influenciou a relação entre a resistência à penetração e o conteúdo de água no solo. Resultados semelhantes foram verificados por LIMA et al. (2006), em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de textura franco-arenosa, sob pomar de laranjeiras. Esses pesquisadores afirmam que a maneira de obtenção dos dados de resistência do solo à penetração, campo ou laboratório, não influencia a curva de resistência do solo à penetração.

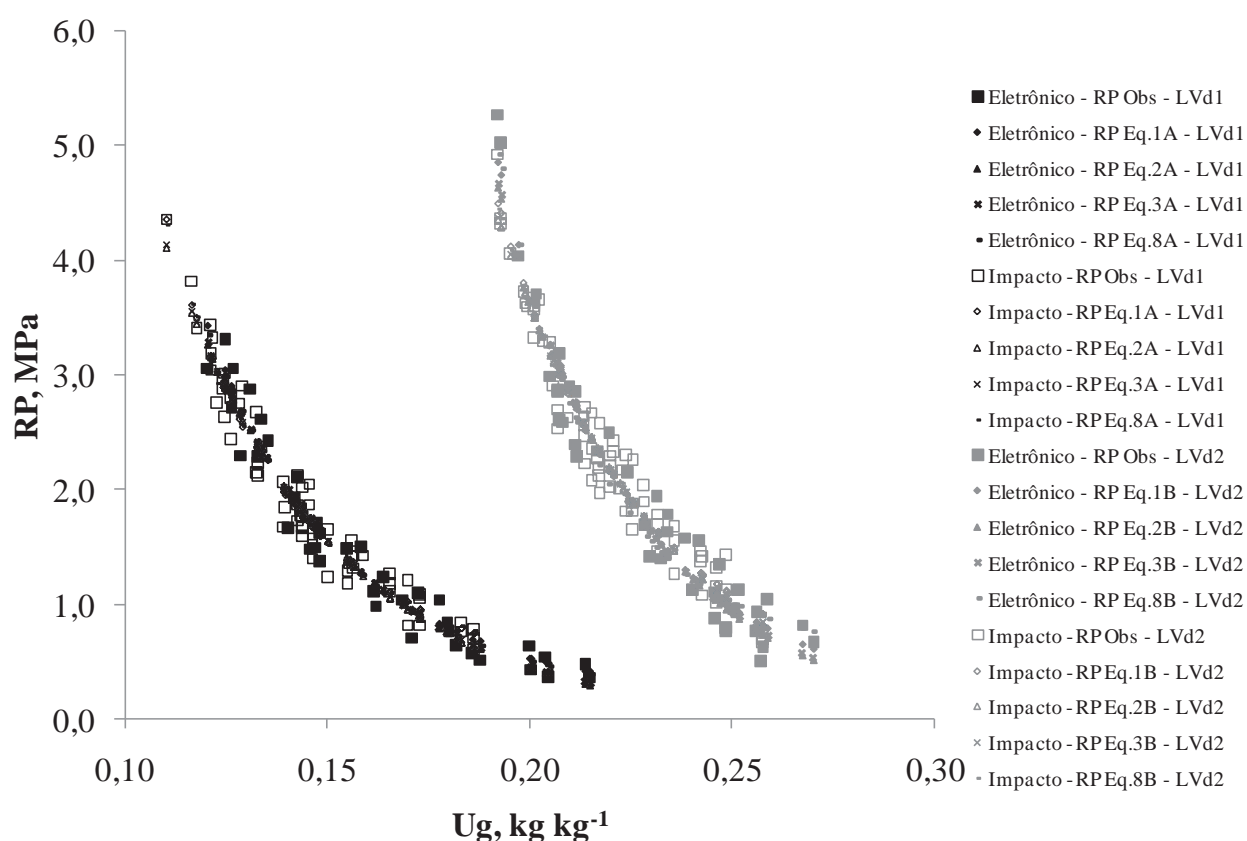


Figura 1. Valores observados (RP Obs) e estimados pelas Equações 1 (RP Eq.1A e RP Eq.1B), 2 (RP Eq.2A e RP Eq.2B), 3 (RP Eq.3A e RP Eq.3B) e 8 (RP Eq.8A e RP Eq.8B) da resistência do solo à penetração obtida com o penetrômetro eletrônico (Eletrônico) e também com o penetrômetro de impacto (Impacto) em função do conteúdo de água no solo (valores observados) para o Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, e na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa.

Ao contrário, constata-se a diferenciação das curvas ajustadas aos dados obtidos na LVd1, de textura média, e na LVd2, de textura argilosa. Essa diferenciação, conforme o conteúdo de argila do solo, também foi observada por SOJKA et al. (2001), TO & KAY (2005) e ALMEIDA et al. (2008). Segundo SILVA et al. (2008) as estimativas

dos parâmetros da curva de resistência do solo à penetração dependem exclusivamente do conteúdo de argila, não sendo influenciados pelo conteúdo de matéria orgânica do solo. Assim, segundo BUSSCHER et al. (1997), são necessários ajustes separados para a curva de resistência do solo à penetração, conforme os diferentes tratamentos. Dessa forma, foram realizados ajustes separados para cada área experimental, englobando os dados obtidos em campo (penetrômetro de impacto) e também em laboratório (penetrômetro eletrônico, Tabela 5). O estudo dos resíduos também mostrou que todas as premissas relativas à análise de regressão foram atendidas, ou seja, os resíduos apresentaram distribuição normal, pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha=0,05$), homocedasticidade da variância, pelo teste de Levene ($\alpha=0,05$) e independência em relação às variáveis explicativas (Apêndice B).

Tabela 5. Equações para as curvas de resistência do solo à penetração ajustadas para o Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, e na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa

Equações ajustadas		
LVd1		
$RP = 0,0023Ug^{-3,4383}$	$R^2 = 0,96; F = 2227,4; p \leq 0,0001$	(1C)
$RP = 48,0163(1 - Ug)^{21,0446}$	$R^2 = 0,96; F = 2067,9; p \leq 0,0001$	(2C)
$RP = 62,0999e^{-24,5383Ug}$	$R^2 = 0,96; F = 2129,3; p \leq 0,0001$	(3C)
$RP = -0,8738 + 0,0270\left(\frac{1}{S}\right) + 0,0519$	$R^2 = 0,79; F = 184,5; p \leq 0,0001$	(4C)
$RP = 0,2320 + 92,2356e^{-\frac{Ug}{0,0353}}$	$R^2 = 0,96; F = 1106,3; p \leq 0,0001$	(8C)
LVd2		
$RP = 0,0004Ug^{-5,7008}$	$R^2 = 0,95; F = 2108,6; p \leq 0,0001$	(1D)
$RP = 360,3607(1 - Ug)^{20,5793}$	$R^2 = 0,95; F = 1899,3; p \leq 0,0001$	(2D)
$RP = 705,1679e^{-26,3132}$	$R^2 = 0,95; F = 1954,8; p \leq 0,0001$	(3D)
$RP = 1,2800 - 0,0110\left(\frac{1}{S}\right) + 0,0227$	$R^2 = 0,66; F = 99,6; p \leq 0,0001$	(4D)
$RP = 0,3956 + 2094,7723e^{-\frac{Ug}{0,0310}}$	$R^2 = 0,95; F = 1020,3; p \leq 0,0001$	(8D)

RP=resistência do solo à penetração (MPa); Ug=conteúdo de água no solo ($kg\ kg^{-1}$); S=índice S e σ =estresse efetivo.

Todos os ajustes, com exceção da Equação 4, apresentaram altos valores de coeficiente de determinação (R^2), indicando alta precisão nas estimativas da resistência do solo à penetração. Dessa forma, na LVd1 foi verificado que 96% das variações dos dados podem ser explicadas pelas Equações 1A, 2A, 3A e 8A, e 79% pela Equação 4A. Na LVd2, as Equações 1B, 2B, 3B e 8B explicaram 95% da variação dos dados,

enquanto que apenas 66% das variações da resistência do solo à penetração são atribuídas à variação do índice S e do estresse efetivo, pela Equação 4B. BUSSCHER et al. (1997) também verificaram coeficientes de determinação muito próximos e até mesmo iguais para os ajustes das Equações 1, 2 e 3. Esses pesquisadores verificaram que os coeficientes de determinação variaram de 55 a 92%, a partir de dados coletados em solos de textura argilosa, sob diferentes sistemas de manejo.

O erro padrão da predição (RMSE) enfatiza os desvios entre os valores estimados e observados (GRUNWALD et al., 2001). Dessa forma, o melhor modelo é aquele que apresenta o menor RMSE (menor variância). Na LVd1, as Equações 2A, 3A e 8A e também a Equação 1A foram as que apresentaram o menor RMSE (Tabela 6) e, portanto, a menor variância. Contudo, na LVd2, as Equações 1B e 8B apresentaram menor RMSE, seguidas pelas Equações 2B e 3B. No entanto, as Equações 4A e 4B foram as que apresentaram pior desempenho em relação à esse parâmetro. Segundo TEDESCHI (2006), o RMSE é um parâmetro muito comum e confiável utilizado para validar uma equação, sendo uma medida de acuracidade e precisão.

Tabela 6. Erro padrão da predição (RMSE), coeficiente de eficiência (EF) e diferença média (MD) das diferentes equações para a curva de resistência do solo à penetração para o Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, e na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa

Solo	Equação	RMSE	EF	MD
LVd1	Eq. 1A	0,18	0,97	0,01
	Eq. 2A	0,17	0,97	0,04
	Eq. 3A	0,17	0,97	0,04
	Eq. 4A	0,32	0,91	-0,05
	Eq. 8A	0,17	0,97	0,02
LVd2	Eq. 1B	0,27	0,95	0,03
	Eq. 2B	0,29	0,94	0,05
	Eq. 3B	0,28	0,94	0,05
	Eq. 4B	0,67	0,77	-0,08
	Eq. 8B	0,27	0,95	0,03

O coeficiente de eficiência (EF) avalia o ajuste dos valores observados versus valores preditos, indicando, portanto, as melhores funções de pedotransferência (GRUNWALD et al., 2001). Na LVd1, as Equações 1A, 2A, 3A e 8A apresentaram o maior EF, e não diferiram em relação à esse parâmetro. Já na LVd2, as Equações 1B e 8B apresentaram os maiores valores do EF, seguidas pelas Equações 2B e 3B, ao contrário da Equação 4B que obteve o menor EF. Essa Equação foi proposta a partir de dados coletados em solos desenvolvidos sob influência de clima temperado, condições essas diferentes do presente estudo, o que pode explicar os resultados obtidos. Segundo LEGATES & MCCABE JÚNIOR (1999) EF representa uma melhoria em relação ao coeficiente de determinação para fins de avaliação de modelos, já que é sensível a diferenças nas médias observadas e preditas e variâncias.

A diferença média (MD) é provavelmente o parâmetro estatístico mais antigo e mais usado para avaliar a acuracidade de equações (TEDESCHI, 2006). Quando MD apresenta sinal (+) ou (-) significa que os valores preditos, em média, superestimam ou subestimam os valores observados, respectivamente (MARTINS FILHO, 1999). Dessa forma, na LVd1, as Equações 1A e 8A foram as que melhor predisseram os valores de resistência do solo à penetração, segundo a MD, embora tenham superestimado, em pequena proporção, os seus valores. Também na LVd2, as Equações 1B e 8B foram as que apresentaram melhor desempenho na predição da resistência do solo à penetração.

Dessa forma, verificou-se que as Equações 1, 2, 3 e 8 não diferiram pelo teste F ($p \geq 0,23$), ao contrário da Equação 4 que diferiu de todas as outras equações ($p \leq 0,01$) na predição dos valores de resistência do solo à penetração, tanto na LVd1 quanto na LVd2, comprovando os resultados alcançados pelos parâmetros RMSE, EF e MD (Tabela 7). BUSSCHER et al. (1997) também verificaram poucas diferenças entre as Equações 1, 2 e 3 em predizer a resistência do solo à penetração, corroborando os resultados obtidos neste estudo.

Tabela 7. Teste F entre as diferentes equações para a curva de resistência do solo à penetração para o Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, e na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa

Solo		F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p
		Eq.2		Eq.3		Eq.4		Eq.8	
LVd1	Eq.1	1,13	0,27	1,15	0,23	3,08	0,00	1,12	0,28
	Eq.2			1,02	0,45	3,47	0,00	0,99	0,51
	Eq.3					3,55	0,00	0,97	0,56
	Eq.4							3,45	0,00
LVd2	Eq.1	0,89	0,72	0,92	0,67	4,49	0,00	0,98	0,53
	Eq.2			1,03	0,44	4,02	0,00	1,10	0,31
	Eq.3					4,13	0,00	1,07	0,36
	Eq.4							4,42	0,00

2.4. CONCLUSÕES

- Houve sobreposição dos valores observados e estimados pelas curvas, evidenciando que a maneira de obtenção da resistência do solo à penetração (campo ou laboratório) não influenciou a relação entre a resistência à penetração e os atributos do solo.
- As Equações $RP = aUg^b$; $RP = a(1 - Ug)^b$; $RP = ae^{bUg}$ e $RP = a + be^{-\frac{Ug}{c}}$ não diferiram e foram as mais precisas e acuradas na predição da resistência do solo à penetração.

CAPÍTULO 3 – INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICA EM UM LATOSSOLO VERMELHO SOB SISTEMA DE SEMEADURA DIRETA E CULTIVO CONVENCIONAL

RESUMO – À medida que os solos vão sendo incorporados aos processos de produção agrícola, consideráveis alterações ocorrem em sua estrutura. Nesse sentido, objetivou-se com este trabalho avaliar a qualidade de um Latossolo Vermelho sob cultivo convencional (CC) e sistema de semeadura direta (PD), por meio de indicadores físicos e da avaliação da produção das culturas da soja e do milho. Os sistemas de uso e manejo do solo foram: CC e PD por sete e oito anos consecutivos (solo de textura média) e CC e PD por nove e dez anos consecutivos (solo de textura argilosa). Foram determinadas, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, a resistência do solo à penetração, a porosidade total, a macroporosidade e a microporosidade, a retenção de água no solo, o índice S, a densidade, a densidade do solo máxima e também a densidade do solo relativa. Nas culturas da soja e do milho foram avaliadas: massa seca das raízes, altura das plantas, altura de inserção da primeira espiga/vagem, número de vagens por planta de soja, massa seca da parte aérea do milho e produtividade. Foi verificada grande variação da resistência do solo à penetração ao longo do ciclo das culturas da soja e do milho, sendo que seus maiores valores foram constatados nas camadas superficiais. Dentre os sistemas de manejo, o PD apresentou maior resistência do solo à penetração. Não houve diferença entre os sistemas de manejo em relação à produção de soja. Dentre os sistemas de manejo, embora o CC tenha apresentado melhores resultados em relação aos indicadores de qualidade física do solo, o PD foi o que proporcionou maior produção de milho. A produção das culturas esteve relacionada aos maiores valores de porosidade total e microporosidade, e aos menores valores de densidade do solo e densidade do solo relativa.

Palavras-chave: resistência do solo à penetração, densidade do solo, porosidade, retenção de água no solo, *Glycine max*, *Zea mays*

3.1. INTRODUÇÃO

À medida que os solos vão sendo incorporados aos processos de produção agropecuária, consideráveis alterações ocorrem em sua estrutura (ANDREOLA et al., 2000; ALMEIDA et al., 2009). Esse processo promove a redução da qualidade do solo em virtude da retirada da cobertura vegetal e da mecanização excessiva. Dessa forma, uma das principais conseqüências do manejo inadequado do solo é a compactação que leva à perda da sustentabilidade e, portanto, à redução da produtividade das culturas (OLIVEIRA et al., 2003).

Por outro lado, a qualidade do solo pode ser mantida ou melhorada com o uso de sistemas de manejo sustentáveis (GREGORICH, 2002). Assim, o sistema de semeadura direta vem se destacando por constituir uma excelente alternativa de manejo conservacionista do solo (KLUTHCOUSKI et al., 2000). Nesse sistema, os resíduos vegetais são mantidos na superfície, contribuindo continuamente com o aporte de matéria orgânica ao solo, a qual é responsável pela conservação e melhoria da qualidade física do solo (LAL & GREENLAND, 1979; CASTRO FILHO et al., 1998).

O sistema solo é dinâmico, e como base para a avaliação da sua qualidade em relação à sustentabilidade ambiental os indicadores escolhidos devem ser aqueles que mais respondam ao seu uso e manejo, e consigam definir os sistemas que ocasionam maior ou menor impacto (LARSON & PIERCE, 1994), pois um índice de qualidade do solo deve servir como indicador da capacidade do solo para a produção sustentável das culturas. Assim, o monitoramento da qualidade do solo é importante para detectar os problemas e indicar ações corretivas necessárias (KARLEN & STOTT, 1994).

Dessa forma, os indicadores de qualidade física do solo devem ter sensibilidade às variações de manejo e de clima para permitir intervenções, visando melhorar a qualidade do solo; devem permitir avaliações da qualidade do solo à curto e à longo prazo, compondo assim, bancos de dados pré ou pró-existentes; devem ser acessíveis aos usuários, em termos de facilidade de medição, além de apresentar o caráter de reprodutibilidade; devem ser aplicáveis em condições de campo, permitindo também relacionar medidas obtidas em laboratório e em campo, e, além disso, devem possuir critérios definidos para quantificar e interpretar seus valores (DORAN & PARKIN, 1994; KARLEN & STOTT, 1994; LARSON & PIERCE, 1994; DORAN & ZEISS, 2000).

Nesse contexto, objetivou-se com este trabalho avaliar a qualidade de um Latossolo Vermelho sob cultivo convencional e sistema de semeadura direta, por meio de indicadores físicos e da avaliação da produção das culturas da soja e do milho.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área experimental e tratamentos

O estudo foi realizado em Jaboticabal, SP, Brasil. O solo das duas áreas experimentais foi classificado por ANDRIOLI & CENTURION (1999), de acordo com os critérios da Embrapa (2006), como Latossolo Vermelho distrófico típico, textura argilosa, A moderado, caulínítico, hipoférrico. O relevo é plano e o clima é mesotérmico de inverno seco (Cwa), segundo a classificação de Köppen. Realizou-se coleta dos dados de precipitação para os anos agrícolas 2008/2009 e 2009/2010, épocas em que os experimentos foram realizados (Figura 2).

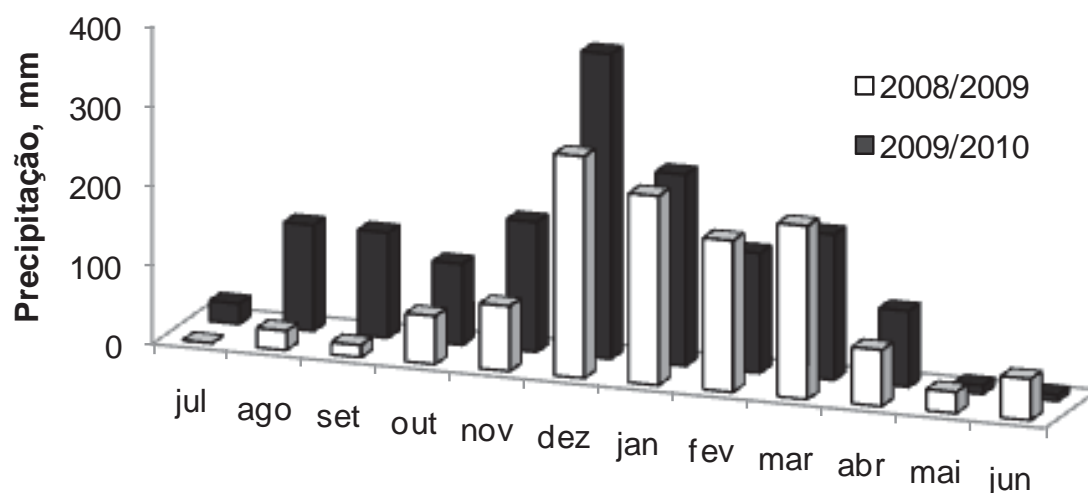


Figura 2. Precipitação pluvial mensal para os anos agrícolas 2008/2009 e 2009/2010.

A composição granulométrica do solo foi determinada nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, conforme GEE & BAUDER (1986). O conteúdo de matéria orgânica do solo foi determinado conforme RAIJ et al. (2001). Dessa forma, verificou-se,

nessas camadas, textura média do solo para a área experimental 1 (LVd1), de coordenadas geográficas 21°15'11"S e 48°15'58"W a 619 m de altitude, e textura argilosa para a área experimental 2 (LVd2) de coordenadas geográficas 21°15'33"S 48°16'17"W a 607 m de altitude (Tabela 8).

Tabela 8. Conteúdo de matéria orgânica e granulometria dos solos nos sistemas de manejo

Tratamento	Camada m	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	M.O.
		g kg ⁻¹				dag kg ⁻¹
CC _{LVd1}	0-0,10	410	315	25	250	16
	0,10-0,20	323	334	37	306	15
	0,20-0,30	314	299	35	352	10
PD _{LVd1}	0-0,10	401	321	42	236	17
	0,10-0,20	396	309	24	271	13
	0,20-0,30	328	362	19	291	11
CC _{LVd2}	0-0,10	219	179	77	525	20
	0,10-0,20	220	181	122	477	17
	0,20-0,30	182	170	131	517	13
PD _{LVd2}	0-0,10	216	193	163	428	22
	0,10-0,20	210	196	166	428	16
	0,20-0,30	204	205	148	443	14

MO: matéria orgânica. CC_{LVd1}, CC_{LVd2}, PD_{LVd1} e PD_{LVd2}: cultivo convencional e sistema de semeadura direta na área experimental 1 (LVd1) e na área experimental 2 (LVd2), respectivamente.

Os sistemas de uso e manejo adotados foram: cultivo convencional (CC_{LVd1}) e sistema de semeadura direta por sete e oito anos (PD_{LVd1}), na LVd1, e cultivo convencional (CC_{LVd2}) e semeadura direta por nove e dez anos (PD_{LVd2}), no LVd2 (Figura 3).

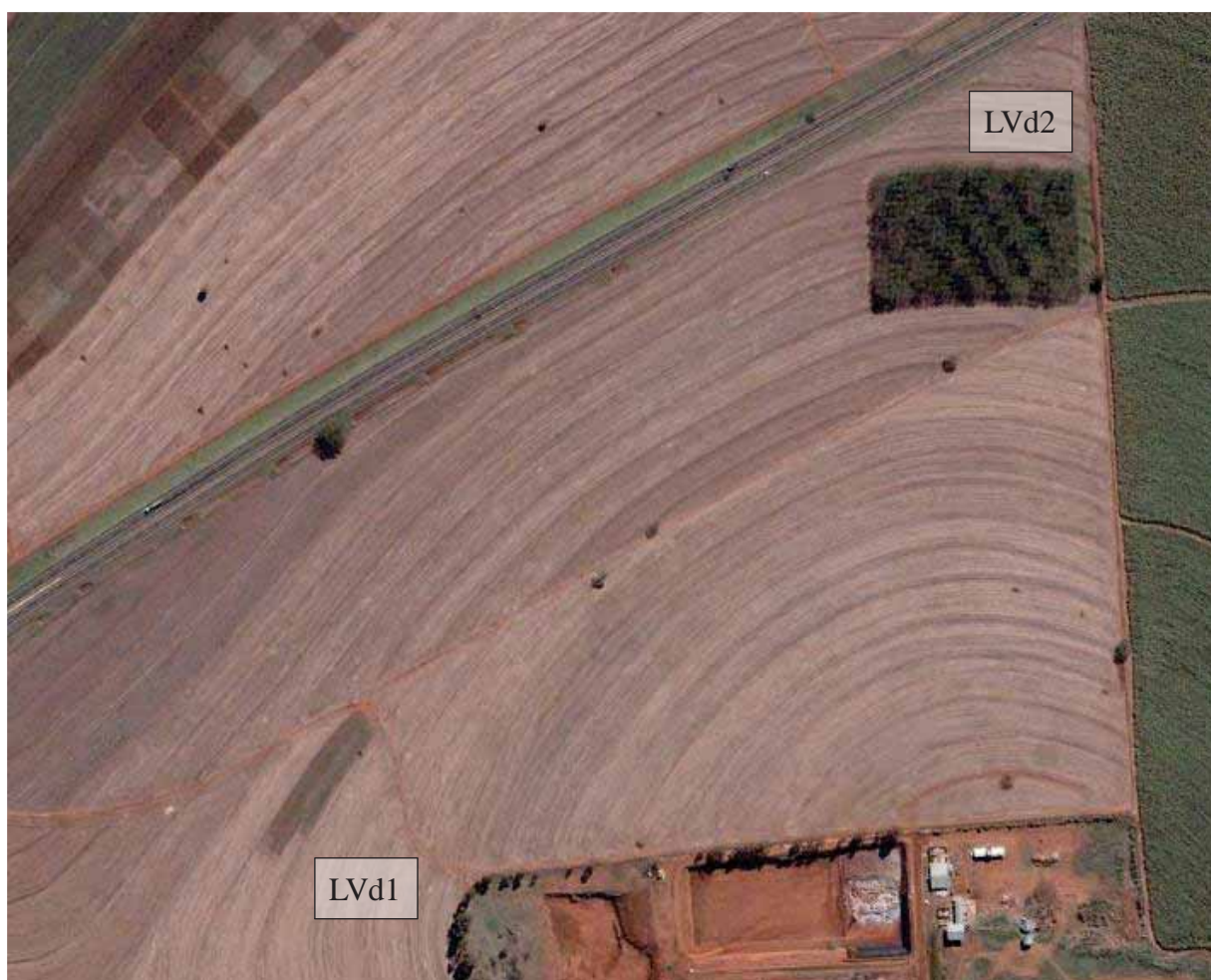


Figura 3. Imagem de satélite indicando a localização das parcelas experimentais, no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1, de coordenadas geográficas 21°15'11"S e 48°15'58"W a 619 m de altitude (LVd1) e na área experimental 2, de coordenadas geográficas 21°15'33"S 48°16'17"W a 607 m de altitude (LVd2) (Fonte: Google Earth, acesso em 20/11/2010).

Condução dos ensaios – ano agrícola 2008/2009

Para o cultivo convencional, procedeu-se o preparo do solo realizando uma escarificação até 0,30 m de profundidade, seguida de uma gradagem pesada e uma gradagem leve. O controle inicial de plantas infestantes nessas áreas foi realizado com a aplicação de trifluralina (0,445 kg L⁻¹) a 0,890 kg ha⁻¹, que foi então incorporada com uma gradagem leve. A dessecação das áreas submetidas ao sistema de semeadura direta foi realizada utilizando-se a associação de s-metolaclo (0,960 kg L⁻¹) a 1,44 kg ha⁻¹ e glifosato (0,480 kg L⁻¹) a 0,96 kg ha⁻¹.

No dia 19 de novembro de 2008, foi semeada a soja (*Glycine max*), cultivar M-SOY 6101 da empresa Monsoy, a 0,03 m de profundidade, com 0,45 m de distância entre linhas e uma população de 400 mil plantas por hectare. Foi utilizado o inoculante Masterfix[®] (estirpes SEMIA 5019 (*Bradyrhizobium elkanii*) e SEMIA 5079 (*Bradyrhizobium japonicum*), com garantia de 5 bilhões de células viáveis g⁻¹), na dosagem de 1,7 ml kg⁻¹ de sementes. As adubações basearam-se nos resultados das análises químicas do solo, com expectativa de alta produtividade, conforme RAIJ et al. (1997).

Foi realizada uma aplicação de 0,08 kg ha⁻¹ de fipronil (800 g kg⁻¹) no sulco de semeadura, visando o controle de pragas iniciais de solo. O controle de plantas infestantes em pós-emergência foi realizado com a aplicação de fluasifope-P-butílico (0,250 kg L⁻¹) a 0,12 kg ha⁻¹. Foram realizadas duas aplicações do inseticida profenofós (0,500 kg L⁻¹), sendo a primeira aplicação a 0,063 kg ha⁻¹ e a segunda a 0,05 kg ha⁻¹, visando o controle de pragas. Foi também efetuada uma pulverização do fungicida azoxistrobina (0,200 kg L⁻¹) combinado com o ciproconazol (0,08 kg L⁻¹) a 0,06 e 0,024 kg ha⁻¹, respectivamente, para o controle de doenças.

A colheita da soja foi realizada no dia 12 de março de 2009.

Condução dos ensaios – ano agrícola 2009/2010

O preparo do solo para o cultivo convencional foi realizado conforme o ano agrícola anterior, com uma escarificação até 0,30 m de profundidade, seguida de uma gradagem pesada e uma gradagem leve. O controle inicial de plantas infestantes nessas áreas de cultivo convencional foi realizado com a aplicação de trifluralina (0,445 kg L⁻¹) a 0,890 kg ha⁻¹, incorporada com uma gradagem leve. Já a dessecação das áreas submetidas ao sistema de semeadura direta foi realizada utilizando-se a associação de s-metolacoloro (0,960 kg L⁻¹) a 1,44 kg ha⁻¹ e glifosato (0,480 kg L⁻¹) a 0,96 kg ha⁻¹. Para o controle de pragas iniciais, realizou-se a aplicação de clorpirifós (0,480 kg L⁻¹) a 0,48 kg ha⁻¹, em área total.

No dia 17 de dezembro de 2009, foi semeado o milho (*Zea mays*), híbrido Impacto da empresa Syngenta, à 0,03 m de profundidade, 0,45 m de distância entrelinhas e uma população de 60 mil plantas por hectare. As adubações basearam-se

nos resultados das análises químicas do solo, com expectativa de alta produtividade, conforme RAIJ et al. (1997).

Os herbicidas usados na condução da cultura foram nicosulfuron ($0,04 \text{ kg L}^{-1}$) a $0,032 \text{ kg ha}^{-1}$ e atrazine ($0,5 \text{ kg L}^{-1}$) a 1 kg ha^{-1} . O controle de pragas foi realizado com clorpirifós ($0,480 \text{ kg L}^{-1}$) a $0,288 \text{ kg ha}^{-1}$.

A colheita do milho foi realizada no dia oito de maio de 2010.

Resistência do solo à penetração

Verificou-se a variação da resistência do solo à penetração em função do conteúdo de água no solo, nos diferentes tratamentos, durante o ciclo das culturas do milho e da soja, utilizando-se um penetrômetro de impacto.

A resistência do solo à penetração, obtida com o penetrômetro de impacto (modelo IAA/Planalsucar-Stolf, com ângulo de 30°), foi determinada segundo STOLF (1991). Essas avaliações foram realizadas conforme a variação do conteúdo de água no solo ao longo do ciclo das culturas, o qual foi monitorado por meio de um medidor eletrônico, composto pelo Profile Probe PR2 acoplado ao Moisture Meter HH2.

Atributos do solo: densidade, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, curva de retenção de água, índice S, densidade do solo máxima e densidade do solo relativa

Foram coletadas amostras indeformadas de solo, com cilindros de $0,03 \text{ m}$ de altura e $0,048 \text{ m}$ de diâmetro ($53,16 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$), as quais foram saturadas e submetidas às tensões de $0,001$; $0,003$; $0,006$; $0,01$; $0,033$; $0,06$; $0,1$ e $0,3 \text{ MPa}$, em câmaras de Richards com placa porosa (KLUTE, 1986).

Nessas amostras foram determinados o conteúdo de água retida em cada tensão (KLUTE, 1986), a densidade do solo (BLAKE & HARTGE, 1986), a microporosidade, por secagem (tensão de $0,006 \text{ MPa}$), a porosidade total, segundo DANIELSON & SUTHERLAND (1986), e a macroporosidade foi obtida por diferença entre a porosidade total e a microporosidade. As curvas de retenção de água foram ajustadas pela equação proposta por van GENUCHTHEN (1980). Dessa forma foi obtido o conteúdo

de água retida na capacidade de campo (tensão de 0,006 MPa) e no ponto de murcha permanente (tensão de 1,5 MPa).

O índice S (DEXTER, 2004a) foi determinado a partir dos parâmetros obtidos pelo ajuste do modelo de van GENUCHTEN (1980) aos dados da curva de retenção de água no solo

A densidade de referência ou densidade do solo máxima foi determinada em amostras deformadas coletadas nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m e passadas em peneira de 0,004 m. Para tal, foi utilizado o teste de Proctor normal com reutilização do material (NOGUEIRA, 1998). O grau de compactação ou densidade do solo relativa foi obtida pela divisão da densidade atual do solo pela densidade de referência (densidade do solo máxima) multiplicado por cem, sendo assim, o valor obtido em porcentagem, da seguinte forma:

$$Densidade\ do\ solo\ relativa = \frac{Densidade\ do\ solo}{Densidade\ do\ solo\ máxima} * 100 \quad (14)$$

Características agrônomicas das culturas da soja e do milho

No estágio R6 da cultura da soja (enchimento de grãos), na escala de FEHR et al. (1971), foram avaliadas a altura das plantas, a altura de inserção da primeira vagem, o número de vagens por planta e a massa seca das raízes, com um volume de solo de 0,001 m³. Para essa avaliação, foram coletadas amostras de solo de 0,10 m no sentido da linha e 0,10 m no sentido da entrelinha, ou seja, distanciadas 0,10 m do eixo principal das plantas de soja, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m em cada parcela, com um volume de solo coletado de 0,001 m³. Em seguida as raízes foram separadas do solo por lavagem em água corrente, utilizando peneira de abertura de malha de 0,001 m. Na sequência as mesmas foram secas em estufa a ± 65°C até a massa constante, para determinação da massa seca das raízes. Foi também determinada a produtividade da cultura, extrapolando-se a produção de grãos da parcela para hectare, considerando-se a umidade de 13%.

No estágio do pendoamento da cultura do milho, período no qual segundo MENGEL & BARBER (1974) o sistema radicular do milho alcança a máxima extensão,

foram coletadas amostras de solo para determinação da massa seca das raízes, conforme realizado para a cultura da soja.

Nesse estágio, foram também determinadas a altura das plantas, a altura de inserção da primeira espiga e a massa seca da parte aérea. Foi quantificada ainda a produtividade da cultura, extrapolando-se a produção de grãos da parcela para hectare, considerando-se a umidade de 13%.

Parcelas experimentais, delineamento e análises estatísticas

Todas as avaliações foram realizadas em cada tratamento e em cada parcela experimental, constituídas de cinco linhas de seis metros de comprimento cada, considerando-se área útil da parcela as três linhas centrais desprezando-se um metro e meio de cada extremidade, em dez repetições (Figura 4).

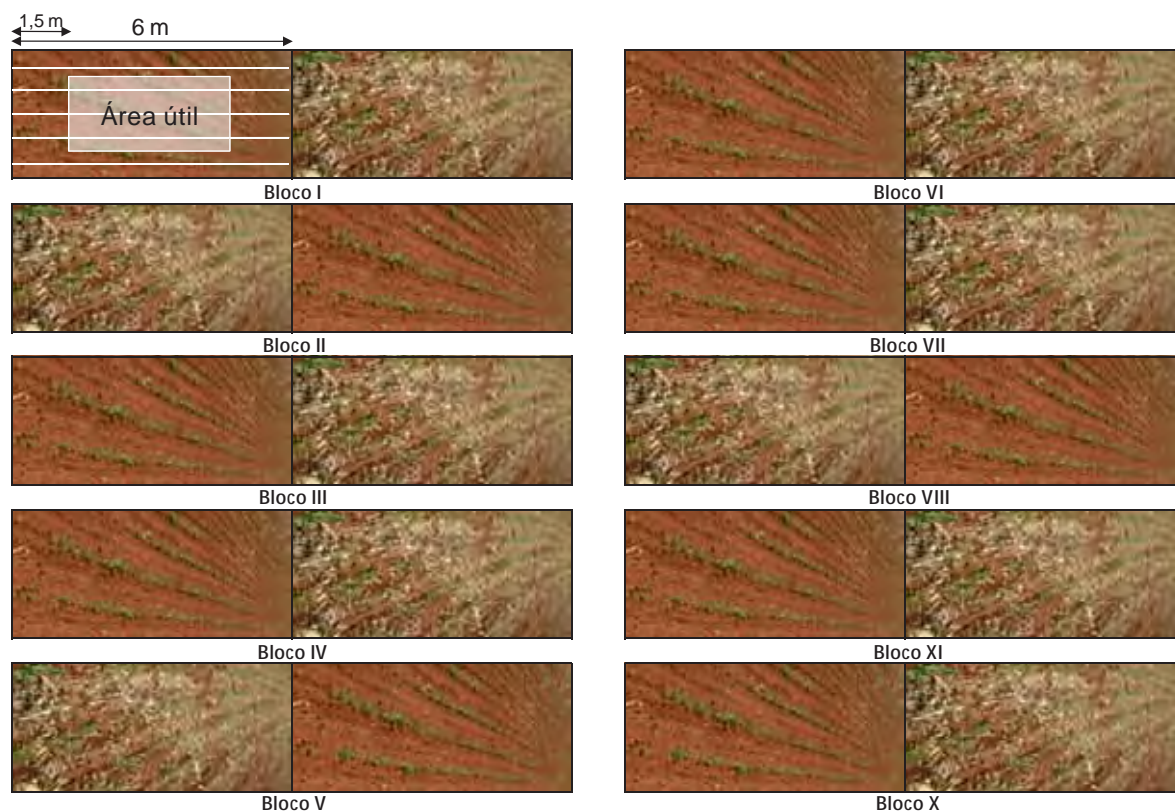


Figura 4. Esquema representando a disposição das unidades experimentais.

Os dados referentes à massa seca das raízes foram transformados em $\sqrt{x + 0,5}$ por não atenderem à hipótese estatística inicial de normalidade ($\alpha=0,05$). Assim, os

dados referentes aos atributos do solo e à massa seca das raízes das plantas foram submetidos à análise de variância, seguindo um esquema de parcelas subdivididas, tendo como parcelas os sistemas de manejo e as subparcelas as camadas de solo, em delineamento de blocos casualizados, com dez repetições. Os dados referentes às características agronômicas e à produtividade das culturas foram analisados seguindo o delineamento em blocos casualizados, com dez repetições. Quando houve diferença significativa pelo teste F, as médias das variáveis analisadas foram então comparadas pelo teste t, para grupos independentes, a 5% de probabilidade, utilizando-se o programa estatístico Sisvar (FERREIRA, 2003). Os resultados referentes aos indicadores de qualidade física do solo e também às características agronômicas das culturas foram submetidos à análise de correlação de Pearson ($\alpha=0,05$).

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Verificou-se grande variação do conteúdo de água no solo, ao longo do ciclo das culturas da soja e do milho (Figuras 5 e 6). Contudo, não houve diferença entre os tratamentos (semeadura direta e cultivo convencional) e entre as camadas analisadas em relação ao conteúdo de água no solo, nas duas áreas experimentais (LVd1 e LVd2), tanto para o ciclo da cultura da soja quanto para o ciclo da cultura do milho. Dessa forma, os valores médios do conteúdo de água no solo foram de $0,13 \text{ kg kg}^{-1}$ para o PD_{LVd1} e também para o CC_{LVd1} e, de $0,21 \text{ kg kg}^{-1}$ para o PD_{LVd2} e para o CC_{LVd2} , durante o ciclo da cultura da soja, e de $0,12$ e $0,14 \text{ kg kg}^{-1}$ para o PD_{LVd1} e CC_{LVd1} e, de $0,19$ e $0,20 \text{ kg kg}^{-1}$ para o PD_{LVd2} e CC_{LVd2} , respectivamente, durante o ciclo da cultura do milho.

Observou-se também grande variação nos valores de resistência do solo à penetração, conforme observado também por LAPEN et al. (2004). De acordo com ALMEIDA et al. (2008) a resistência do solo à penetração é fortemente influenciada pelo conteúdo de água no solo, segundo uma relação exponencial, e que, quanto maior é o conteúdo de água no solo menores são os valores de resistência do solo à penetração, o que pode explicar a variação desse atributo durante o ciclo das culturas da soja e do milho.

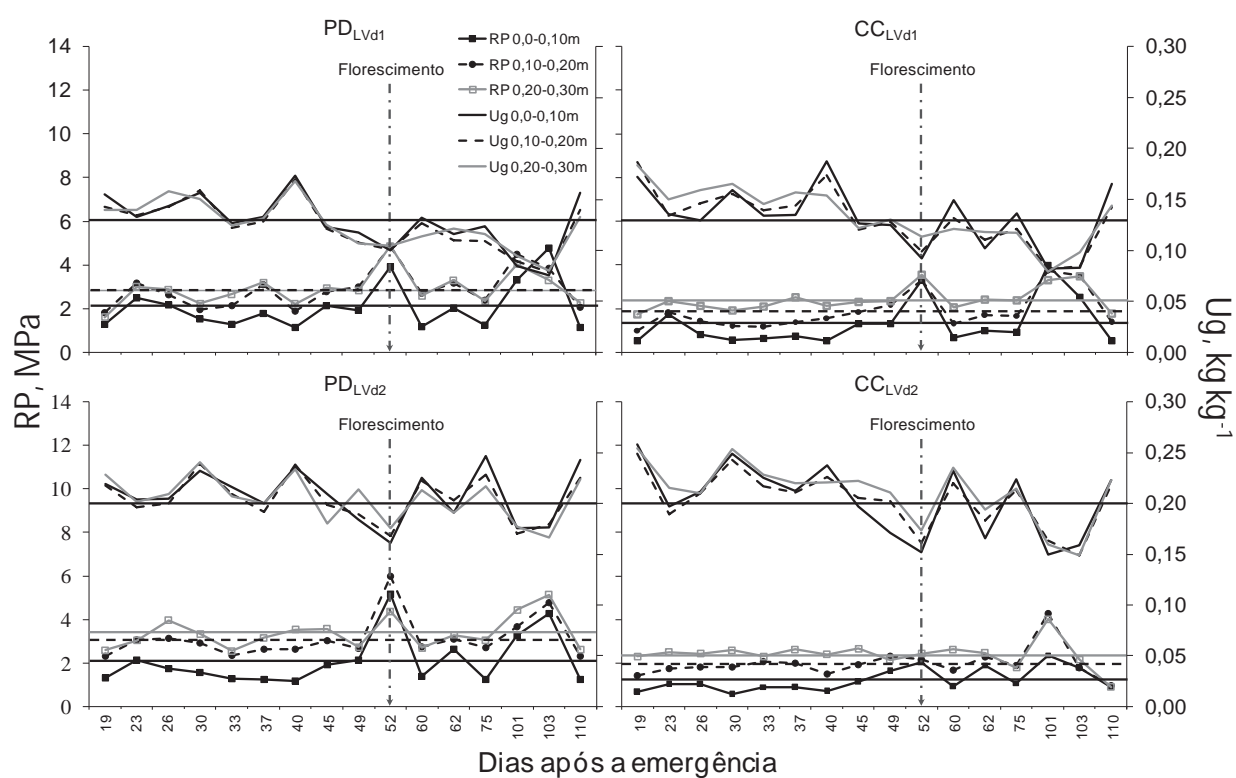


Figura 5. Conteúdo de água (Ug) e resistência do solo à penetração (RP) nas diferentes camadas do Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd), de textura média e na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa, sob sistema de semeadura direta (PD) e cultivo convencional (CC), ao longo do ciclo da cultura da soja. As linhas horizontais representam os valores médios em cada camada.

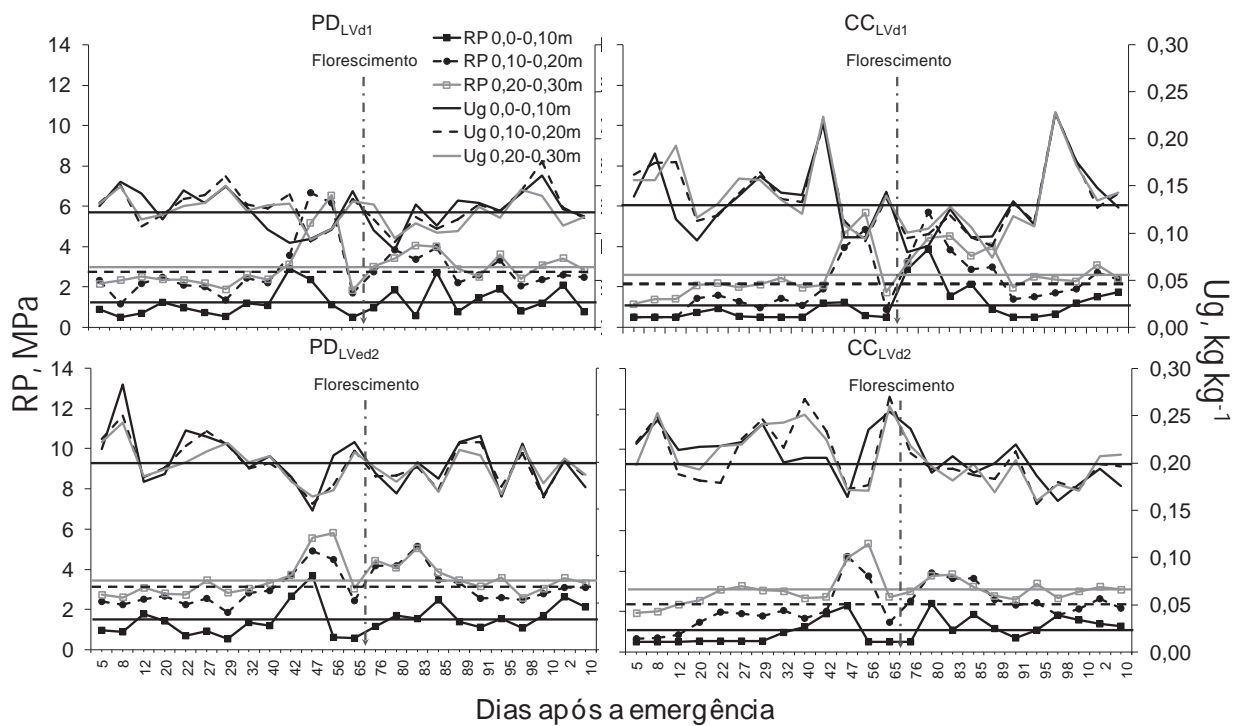


Figura 6. Conteúdo de água (Ug) e resistência do solo à penetração (RP) nas diferentes camadas do Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd), de textura média e na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa, sob sistema de semeadura direta (PD) e cultivo convencional (CC), ao longo do ciclo da cultura do milho. As linhas horizontais representam os valores médios em cada camada.

Assim, durante o ciclo da cultura da soja, na LVd1, a resistência do solo à penetração média foi de 2,09; 2,88 e 2,90 MPa, para o PD_{LVd1}, e de 1,32; 1,88 e 2,40 MPa, para o CC_{LVd1}, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, respectivamente. Houve diferença significativa entre os manejos, nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m. No PD_{LVd1}, a camada superficial (0-0,10 m) apresentou a menor resistência do solo à penetração em relação às demais, enquanto que no CC_{LVd1} houve diferença apenas entre as camadas de 0-0,10 e 0,20-0,30 m.

Na LVd2, os valores médios desse atributo foram iguais a 2,12; 3,13 e 3,38 MPa, para o PD_{LVd2}, e de 1,23; 1,98 e 2,40 MPa, para o CC_{LVd2}, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, respectivamente. Os menores valores de resistência do solo à penetração foram verificados na camada de 0-0,10 m, nos dois sistemas de manejo estudados, havendo diferença significativa em relação às outras camadas analisadas, e o solo sob PD_{LVd2}, apresentou maiores valores de resistência do solo à penetração que o CC_{LVd2}, corroborando os resultados obtidos por RALISCH et al. (2008), em um Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso, sob sistema de semeadura direta, preparo convencional, pastagem e floresta.

Segundo BEUTLER & CENTURION (2003) o nível crítico de resistência do solo à penetração, em relação à produção de grãos de soja, foi de 1,66 e 2,22 MPa, em um Latossolo Vermelho textura média, e de 3,05 e 2,81 MPa, em um Latossolo Vermelho textura argilosa, para o conteúdo de água retido nas tensões de 0,05 e 0,01 MPa, respectivamente. Ainda, segundo BEUTLER et al. (2007) a compactação excessiva do solo provocou decréscimo de produtividade da soja a partir da resistência do solo à penetração de 1,30 e 1,64 MPa, em cultivo de sequeiro e irrigado, respectivamente, em Latossolo Vermelho eutroférico, muito argiloso.

Durante o ciclo da cultura do milho, na LVd1, os valores médios de resistência do solo à penetração foram de 1,1; 2,1 e 2,7 MPa no CC_{LVd1} e de 1,3; 2,8 e 3,0 MPa no PD_{LVd1}, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, respectivamente. Dessa forma, observa-se que os menores valores de resistência do solo à penetração foram encontrados na camada de 0-0,10 m, que diferiu estatisticamente das demais. Em relação aos sistemas de manejo do solo, houve diferença significativa apenas na camada de 0,10-0,20 m, em que o CC_{LVd1} apresentou menor resistência do solo à penetração.

FREDDI et al. (2009), avaliando os efeitos da compactação e da variação do conteúdo de água sobre alguns atributos físicos de um Latossolo Vermelho, de textura argilosa, observaram, que a resistência do solo à penetração atingiu os seus maiores valores num intervalo entre 42 e 65 dias após a emergência da cultura do milho. Segundo esses pesquisadores, a resistência do solo à penetração pode atingir valores extremos, mesmo em solos preparados, e que dependendo do regime hídrico, assim como, dependendo do estágio de desenvolvimento da cultura, pode ocasionar sérios problemas no crescimento radicular e na absorção de água e nutrientes, refletindo em menor produtividade.

Já na LVd2, os valores de resistência do solo à penetração foram iguais à 1,0; 2,3 e 3,1 MPa sob CC_{LVd2} , e à 1,5; 3,2 e 3,5 MPa sob PD_{LVd2} , nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, respectivamente. Conforme verificado também na LVd1, os maiores valores de resistência do solo à penetração encontram-se na camada de 0-0,10 m e os sistemas de manejo também se diferiram apenas na camada de 0,10-0,20 m.

BEUTLER et al. (2001), estudando a resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distrófico típico, textura muito argilosa, sob diferentes sistemas de manejo, verificaram que, de modo geral, independentemente da profundidade, os maiores valores de resistência à penetração foram observados para o sistema de semeadura direta.

No primeiro ano de experimento (cultivo de soja), maiores valores de densidade do solo foram verificados no solo sob PD_{LVd1} , nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m (Tabela 9). Ao contrário, na LVd2 não houve diferença de densidade do solo entre os sistemas de manejo analisados (Tabela 10). Tanto na LVd1 quanto na LVd2, as maiores densidades do solo foram observadas nas camadas mais profundas (0,10-0,20 e 0,20-0,30 m). BEUTLER et al. (2007) verificaram decréscimo de produtividade da soja, sob cultivo de sequeiro e irrigado, a partir da densidade do solo de 1,26 e 1,29 $Mg\ m^{-3}$, respectivamente, em estudo realizado em um Latossolo Vermelho eutroférico, muito argiloso. Dessa forma, verifica-se que o solo sob PD_{LVd1} e CC_{LVd1} apresentaram, em algumas camadas, valores de densidade do solo superiores a esses valores críticos observados por esses pesquisadores.

Tabela 9. Densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, ao longo do ciclo da cultura da soja, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m

Camada (m)	PD _{LVd1}	CC _{LVd1}	Média
		Densidade do solo (Mg m ⁻³)	
0-0,10	1,43Ba	1,21Aa	1,32
0,10-0,20	1,57Bb	1,40Ab	1,47
0,20-0,30	1,49Aab	1,45Ab	1,48
<i>Média</i>	1,50	1,35	
		Porosidade Total (m ³ m ⁻³)	
0-0,10	0,35	0,42	0,38a
0,10-0,20	0,30	0,37	0,34b
0,20-0,30	0,31	0,34	0,33b
<i>Média</i>	0,32B	0,38A	
		Macroporosidade (m ³ m ⁻³)	
0-0,10	0,09Ba	0,20Aa	0,14
0,10-0,20	0,07Ba	0,13Ab	0,10
0,20-0,30	0,09Aa	0,08Ac	0,09
<i>Média</i>	0,08	0,14	
		Microporosidade (m ³ m ⁻³)	
0-0,10	0,26Aa	0,22Bb	0,24
0,10-0,20	0,23Aab	0,24Aab	0,24
0,20-0,30	0,22Bb	0,26Aa	0,24
<i>Média</i>	0,23	0,24	

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%; letras maiúsculas referem-se à comparação de tratamentos; minúsculas comparam camadas de um mesmo tratamento, maiúsculas em itálico referem-se à comparação das médias de tratamentos e minúsculas em itálico comparam as médias de camadas; ns= não significativo.

Tabela 10. Densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa, ao longo do ciclo da cultura da soja, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m

Camada (m)	PD _{LVd2}	CC _{LVd2}	Média
		Densidade do solo (Mg m ⁻³)	
0-0,10	1,12	1,17	1,14a
0,10-0,20	1,24	1,20	1,22b
0,20-0,30	1,31	1,28	1,29c
<i>Média</i>	1,22 ^{ns}	1,21 ^{ns}	
		Porosidade Total (m ³ m ⁻³)	
0-0,10	0,46	0,44	0,45a
0,10-0,20	0,42	0,43	0,42b
0,20-0,30	0,40	0,40	0,40b
<i>Média</i>	0,43 ^{ns}	0,43 ^{ns}	

Continua...

Tabela 10. Continuação

		Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	
0-0,10	0,16	0,13	0,15a
0,10-0,20	0,10	0,12	0,11ab
0,20-0,30	0,08	0,08	0,08b
<i>Média</i>	0,11 ^{ns}	0,11 ^{ns}	
		Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) ^{ns}	
0-0,10	0,30	0,31	0,31
0,10-0,20	0,31	0,31	0,31
0,20-0,30	0,32	0,32	0,32
<i>Média</i>	0,31	0,32	

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%; letras maiúsculas referem-se à comparação de tratamentos; minúsculas comparam camadas de um mesmo tratamento, maiúsculas em itálico referem-se à comparação das médias de tratamentos e minúsculas em itálico comparam as médias de camadas; ns= não significativo.

Em conformidade com os resultados obtidos para a densidade do solo, observou-se no PD_{LVd1} menor porosidade total, menor macroporosidade (camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m) e maior microporosidade (na camada de 0-0,10 m). Entretanto, não houve diferença entre os sistemas de manejo na LVd2, em relação à esses atributos. Em um estudo realizado por FREDDI et al. (2008), em um Latossolo Vermelho argiloso, constatou-se que a compactação do solo proporcionada pelo tráfego de tratores modificou os atributos físicos do solo, aumentando a microporosidade, a resistência do solo à penetração e a densidade do solo e diminuição da macroporosidade e porosidade total. Segundo esses pesquisadores, no processo de compactação ocorre a transformação de macro em microporos.

No segundo ano de experimento (cultivo de milho), não houve interação significativa entre os tratamentos e as camadas de solo analisadas, nas duas áreas experimentais (LVd1 e LVd2), para a densidade do solo, macroporosidade e microporosidade (Tabelas 11 e 12). Na LVd1, menor densidade do solo foi verificada no PD_{LVd1}, ao contrário da LVd2, em que não houve diferença entre os tratamentos em relação à esse atributo. Os sistemas de manejo também não diferiram em relação à macroporosidade e à microporosidade nas duas áreas experimentais. Na camada de 0-0,10 m, maior porosidade total foi verificada no PD_{LVd1} e no PD_{LVd2}, nas outras camadas avaliadas o PD_{LVd1} e o CC_{LVd1} não diferiram em relação à esse atributo, enquanto que o PD_{LVd2} apresentou menor porosidade que o CC_{LVd2}.

Em relação às camadas de solo analisadas, a camada de 0-0,10 m, tanto na LVd1 quanto na LVd2, apresentou menor densidade do solo, maior porosidade total e macroporosidade, enquanto que a microporosidade foi não significativa.

Tabela 11. Densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, ao longo do ciclo da cultura do milho, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m

Camada (m)	PD _{LVd1}	CC _{LVd1}	Média
	Densidade do solo (Mg m ⁻³)		
0-0,10	1,43	1,48	1,45a
0,10-0,20	1,60	1,63	1,60b
0,20-0,30	1,59	1,61	1,62b
<i>Média</i>	1,54A	1,57B	
	Porosidade Total (m ³ m ⁻³)		
0-0,10	0,43Aa	0,40Ba	0,42
0,10-0,20	0,35Ab	0,36Ab	0,35
0,20-0,30	0,36Ab	0,38Aab	0,37
<i>Média</i>	0,38	0,38	
	Macroporosidade (m ³ m ⁻³)		
0-0,10	0,17	0,13	0,15a
0,10-0,20	0,09	0,07	0,08b
0,20-0,30	0,09	0,09	0,09b
<i>Média</i>	0,12 ^{ns}	0,10 ^{ns}	
	Microporosidade (m ³ m ⁻³) ^{ns}		
0-0,10	0,27	0,27	0,27
0,10-0,20	0,26	0,29	0,27
0,20-0,30	0,27	0,30	0,28
<i>Média</i>	0,26	0,28	

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%; letras maiúsculas referem-se à comparação de tratamentos; minúsculas comparam camadas de um mesmo tratamento, maiúsculas em itálico referem-se à comparação das médias de tratamentos e minúsculas em itálico comparam as médias de camadas; ns= não significativo.

Tabela 12. Densidade, porosidade total, macroporosidade e microporosidade do Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa, ao longo do ciclo da cultura do milho, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m

Camada (m)	PD _{LVd2}	CC _{LVd2}	Média
	Densidade do solo (Mg m ⁻³)		
0-0,10	1,30	1,30	1,30a
0,10-0,20	1,49	1,41	1,45b
0,20-0,30	1,49	1,40	1,45b
<i>Média</i>	1,43 ^{ns}	1,37 ^{ns}	

Continua...

Tabela 12. Continuação

Porosidade Total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)			
0-0,10	0,49Aa	0,47Ba	0,48
0,10-0,20	0,44Bb	0,47Aa	0,45
0,20-0,30	0,43Bb	0,47Aa	0,45
<i>Média</i>	0,45	0,47	
Macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)			
0-0,10	0,12	0,11	0,12a
0,10-0,20	0,08	0,08	0,08b
0,20-0,30	0,06	0,07	0,07b
<i>Média</i>	0,09 ^{ns}	0,09 ^{ns}	
Microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) ^{ns}			
0-0,10	0,36	0,36	0,36
0,10-0,20	0,36	0,38	0,37
0,20-0,30	0,36	0,40	0,38
<i>Média</i>	0,36	0,38	

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%; letras maiúsculas referem-se à comparação de tratamentos; minúsculas comparam camadas de um mesmo tratamento, maiúsculas em itálico referem-se à comparação das médias de tratamentos e minúsculas em itálico comparam as médias de camadas; ns= não significativo.

Durante o ciclo da cultura da soja, maiores amplitudes nas curvas de retenção de água foram observadas no CC_{LVd1} , em todas as camadas e, dentre aquelas analisadas, a camada de 0-0,10 m foi a que apresentou maior retenção de água no solo (Figura 7). Contudo, na camada de 0-0,10 m, na LVd2, o PD_{LVd2} apresentou maior retenção de água no solo que o CC_{LVd2} (Figura 8). Ao contrário da camada de 0,10-0,20 m, em que o CC_{LVd2} , se sobressaiu em relação à retenção de água no solo.

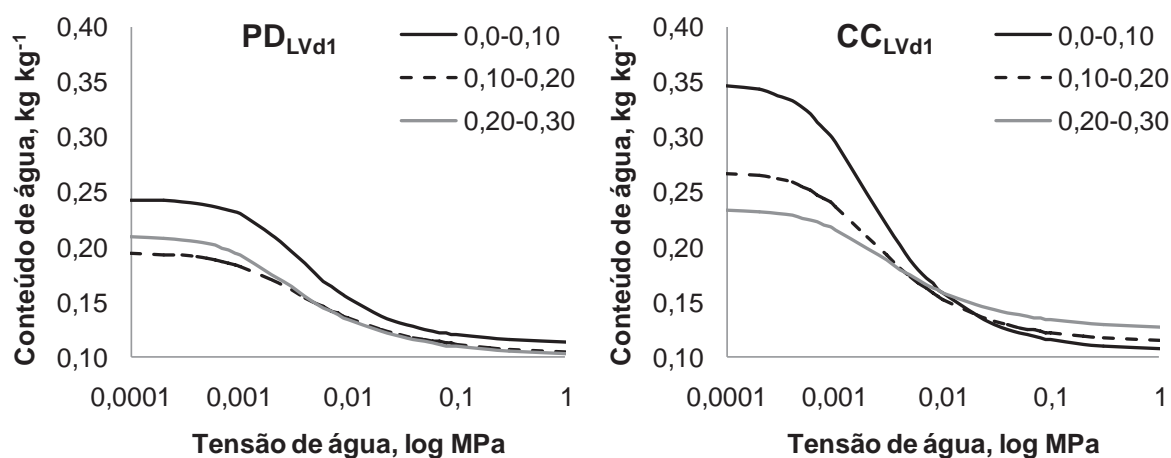


Figura 7. Curvas de retenção de água no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, sob cultivo convencional (CC_{LVd1}) e

sistema de semeadura direta (PD_{LVd1}) de soja, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

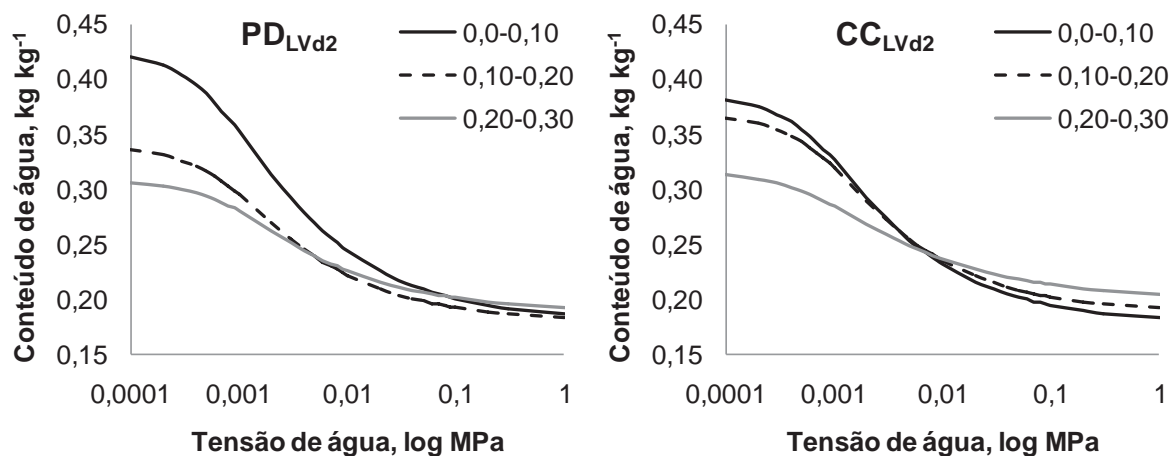


Figura 8. Curvas de retenção de água no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 2 ($LVd2$), de textura argilosa, sob cultivo convencional (CC_{LVd2}) e sistema de semeadura direta (PD_{LVd2}) de soja, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

No segundo ano de experimento (ciclo da cultura do milho), maior retenção de água foi verificada no PD_{LVd1} , na camada de 0-0,10 m (Figura 9). Menor amplitude das curvas foram constatadas no PD_{LVd2} , nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, em relação ao CC_{LVd2} (Figura 10). CENTURION & DEMATTÊ (1985) observaram que o sistema de semeadura direta propiciou ao solo maior homogeneidade estrutural, o que resultou em maior disponibilidade de água para as plantas. Também FIGUEIREDO et al. (2008) constataram que o solo sob sistema de semeadura direta apresentou melhores condições de armazenamento de água no solo em comparação à outros sistemas de uso e manejo, tais como cerrado nativo, cerrado recém-revolvido, pastagem reformada e pastagem degradada, em um Latossolo Vermelho argiloso. Esses pesquisadores concluíram que o revolvimento do solo causou diminuição do conteúdo de matéria orgânica e, conseqüentemente, da capacidade de armazenamento de água no solo, corroborando os resultados obtidos neste estudo.

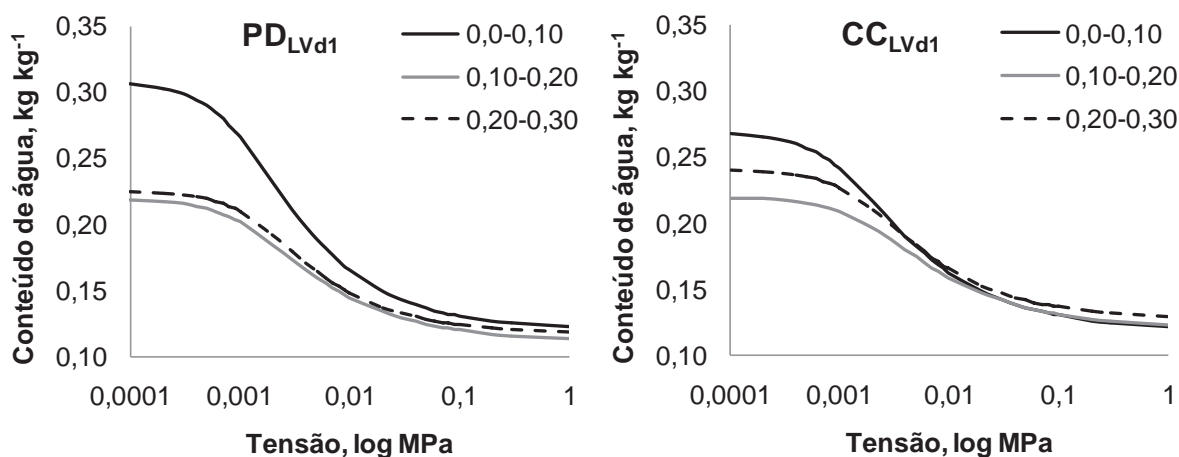


Figura 9. Curvas de retenção de água no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, sob cultivo convencional (CC_{LVd1}) e sistema de semeadura direta (PD_{LVd1}) de milho, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

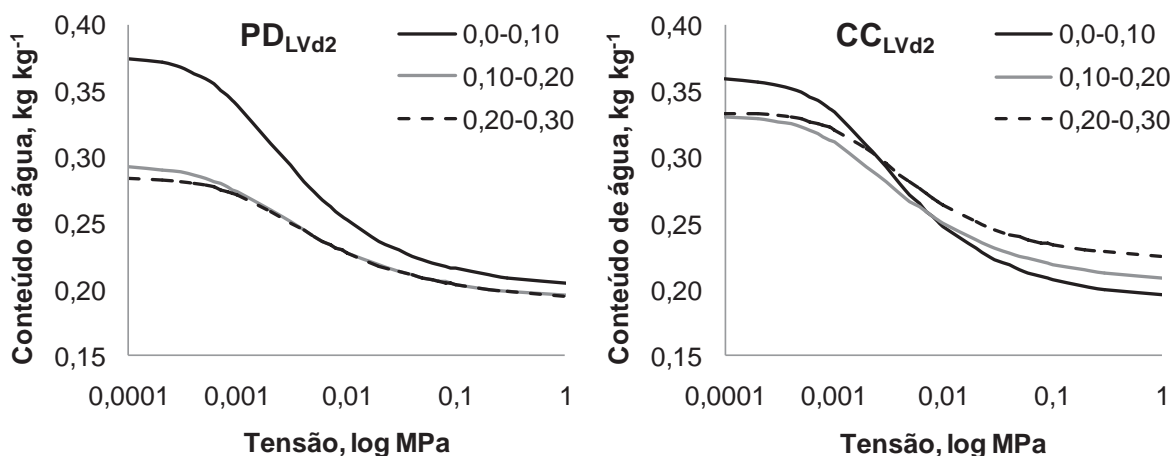


Figura 10. Curvas de retenção de água no Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd2), de textura argilosa, sob cultivo convencional (CC_{LVd2}) e sistema de semeadura direta (PD_{LVd2}) de milho, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

Com exceção da LVd1 (no primeiro ano de experimento), não houve diferença entre os sistemas de manejo em relação ao índice S (Tabelas 13, 14, 15 e 16). O maior índice S, apresentado pelo CC_{LVd1} , nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, deve estar relacionado à maior porosidade total e macroporosidade proporcionada pelo revolvimento do solo nesse sistema (Tabela 9).

Tabela 13. Índice S no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, cultivado com soja, sob cultivo convencional (CC_{LVd1}) e sistema de semeadura direta (PD_{LVd1}), nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m

Camada (m)	PD _{LVd1}	CC _{LVd1}	Média
0-0,10	0,040Ba	0,072Aa	0,056
0,10-0,20	0,023Bb	0,043Ab	0,033
0,20-0,30	0,030Aab	0,029Ac	0,029
<i>Média</i>	0,031	0,048	

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%; letras maiúsculas referem-se à comparação de tratamentos; minúsculas comparam camadas de um mesmo tratamento.

Tabela 14. Índice S no Latossolo Vermelho típico, na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa, cultivado com soja, sob cultivo convencional (CC_{LVd2}) e sistema de semeadura direta (PD_{LVd2}), nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m

Camada (m)	PD _{LVd2}	CC _{LVd2}	Média
0-0,10	0,058	0,049	0,053a
0,10-0,20	0,039	0,042	0,041b
0,20-0,30	0,028	0,024	0,026c
<i>Média</i>	0,042 ^{ns}	0,038 ^{ns}	

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%; letras minúsculas em itálico comparam as médias de camadas; ns= não significativo.

Tabela 15. Índice S no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, cultivado com milho, sob cultivo convencional (CC_{LVd1}) e sistema de semeadura direta (PD_{LVd1}), nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m

Camada (m)	PD _{LVd1}	CC _{LVd1}	Média
0-0,10	0,051	0,039	0,045a
0,10-0,20	0,028	0,025	0,026b
0,20-0,30	0,031	0,031	0,031b
<i>Média</i>	0,037A	0,032B	

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%; letras maiúsculas em itálico referem-se à comparação das médias de tratamentos e minúsculas em itálico comparam as médias de camadas; ns= não significativo.

Tabela 16. Índice S no Latossolo Vermelho eutrófico, típico, na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa, cultivado com milho, sob cultivo convencional (CC_{LVd2}) e sistema de semeadura direta (PD_{LVd2}), nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m

Camada (m)	PD _{LVd2}	CC _{LVd2}	Média
0-0,10	0,043	0,042	0,042a
0,10-0,20	0,022	0,030	0,026b
0,20-0,30	0,021	0,029	0,025b
<i>Média</i>	0,029 ^{ns}	0,034 ^{ns}	

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%; letras minúsculas em itálico comparam as médias de camadas; ns= não significativo.

Em relação às camadas de solo analisadas, maiores valores do índice S foram encontrados nas camadas superficiais (0-0,10 m) de todos os tratamentos (PD e CC), nas duas áreas experimentais (LVd1 e LVd2), e nos dois anos de cultivo (ciclo da soja e ciclo da cultura do milho). No entanto, verifica-se que, nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m de todos os tratamentos, com exceção das camadas de 0,10-0,20 m no CC_{LVd1} (ciclo da cultura da soja), no PD_{LVd2} e no CC_{LVd2} (durante o ciclo da cultura do milho), os valores de S foram inferiores à 0,035, valor esse estipulado como sendo o limite entre solos degradados e não degradados (DEXTER, 2004a b c). Ainda, segundo DEXTER (2004a b c), solos que apresentem valores do índice S inferiores a 0,020 são impeditivos ao desenvolvimento radicular das plantas. Contudo, não foram verificados esses valores nas áreas e camadas analisadas neste estudo.

No primeiro ano de experimento, tanto o PD_{LVd1} quanto o PD_{LVd2} foram os que apresentaram menores valores de densidade do solo máxima (Figura 11). Esse fato pode ser explicado pelo maior conteúdo de matéria orgânica proporcionado por esse sistema, principalmente na camada superior do solo (Tabela 8), pois, segundo KLEIN (2008), quanto maior é o conteúdo de matéria orgânica ou carbono orgânico no solo menor é a densidade do solo máxima, quer pelo efeito positivo na estabilidade estrutural do solo, quer pelo fato de o material orgânico apresentar baixa densidade, menor do que a dos sólidos do solo.

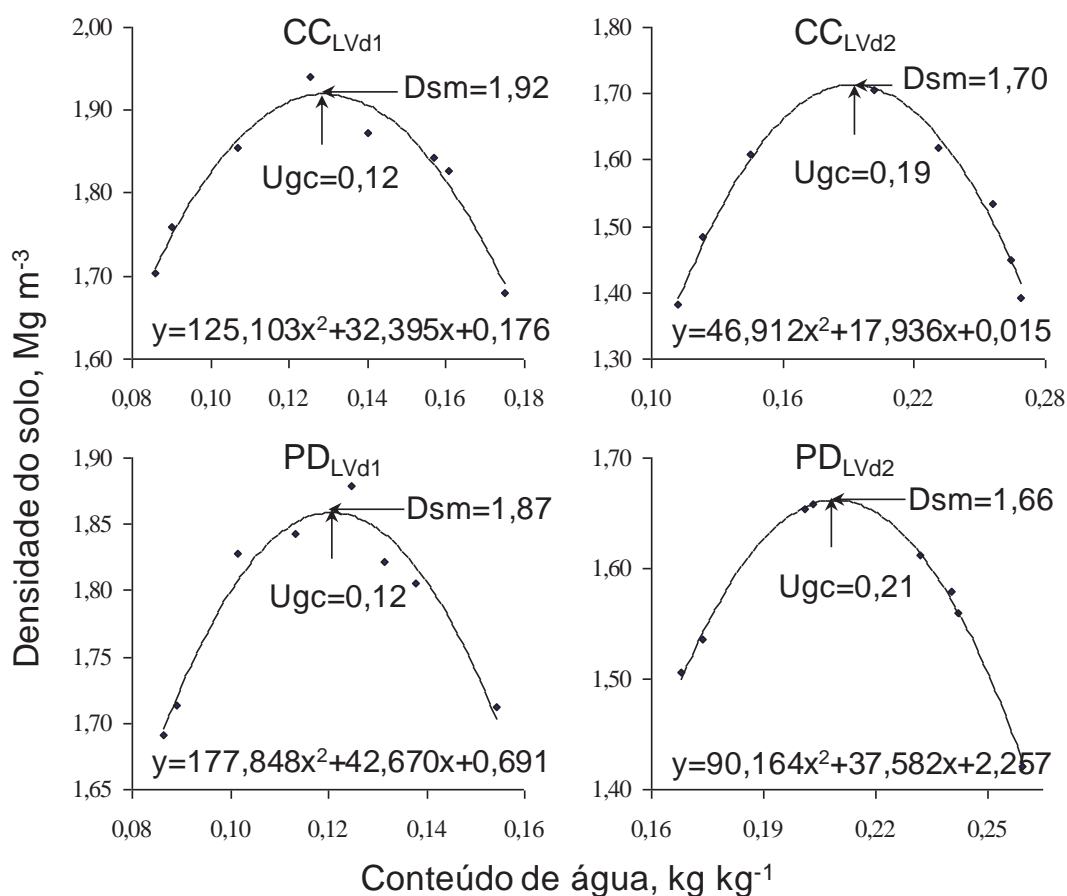


Figura 11. Densidade máxima do solo (Dsm) determinada pelo ensaio de Proctor nos solos cultivados com soja, sob cultivo convencional (CC_{LVd1} e CC_{LVd2}), e sistema de semeadura direta (PD_{LVd1} e PD_{LVd2}), no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média e na área experimental 2, de textura argilosa, respectivamente, na camada de 0-0,30 m. Ugc representa o conteúdo de água crítico em que ocorre a máxima compactação.

No segundo ano de experimento, também o PD_{LVd1} (camada de 0-0,10 e 0,10-0,20 m) e o PD_{LVd2} (camada de 0-0,10 m), apresentaram menores valores de densidade do solo máxima que o cultivo convencional (Figuras 12 e 13). Contudo nas camadas de 0,20-0,30 m do PD_{LVd1} e de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m do PD_{LVd2}, essa situação é revertida e menores valores de densidade do solo máxima são encontrados no CC_{LVd1} e no CC_{LVd2}.

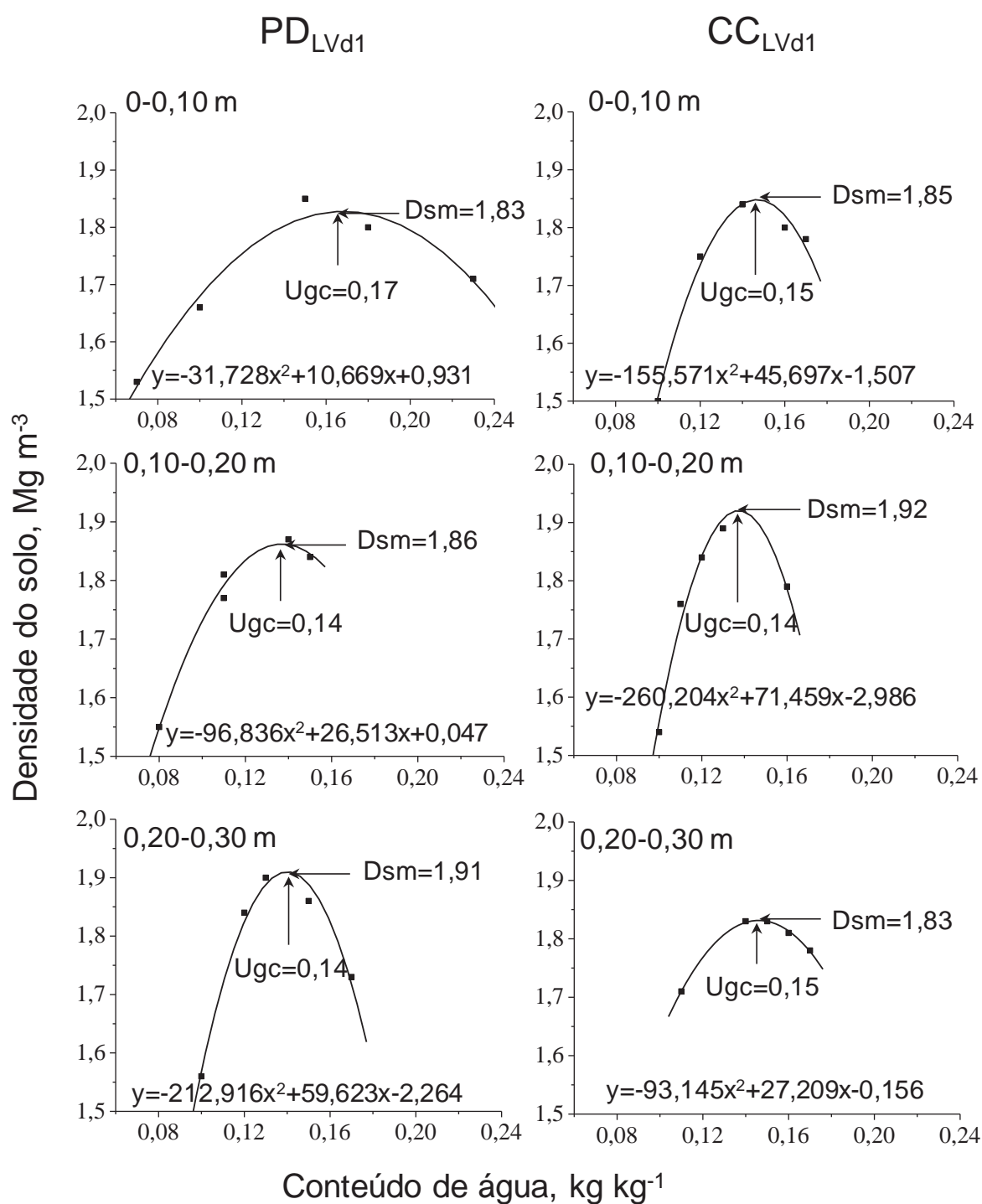


Figura 12. Densidade máxima do solo (Dsm) determinada pelo ensaio de Proctor nos solos cultivados com milho, sob cultivo convencional (CC_{LVd1}), e sistema de semeadura direta (PD_{LVd1}), no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. Ugc representa o conteúdo de água crítico em que ocorre a máxima compactação.

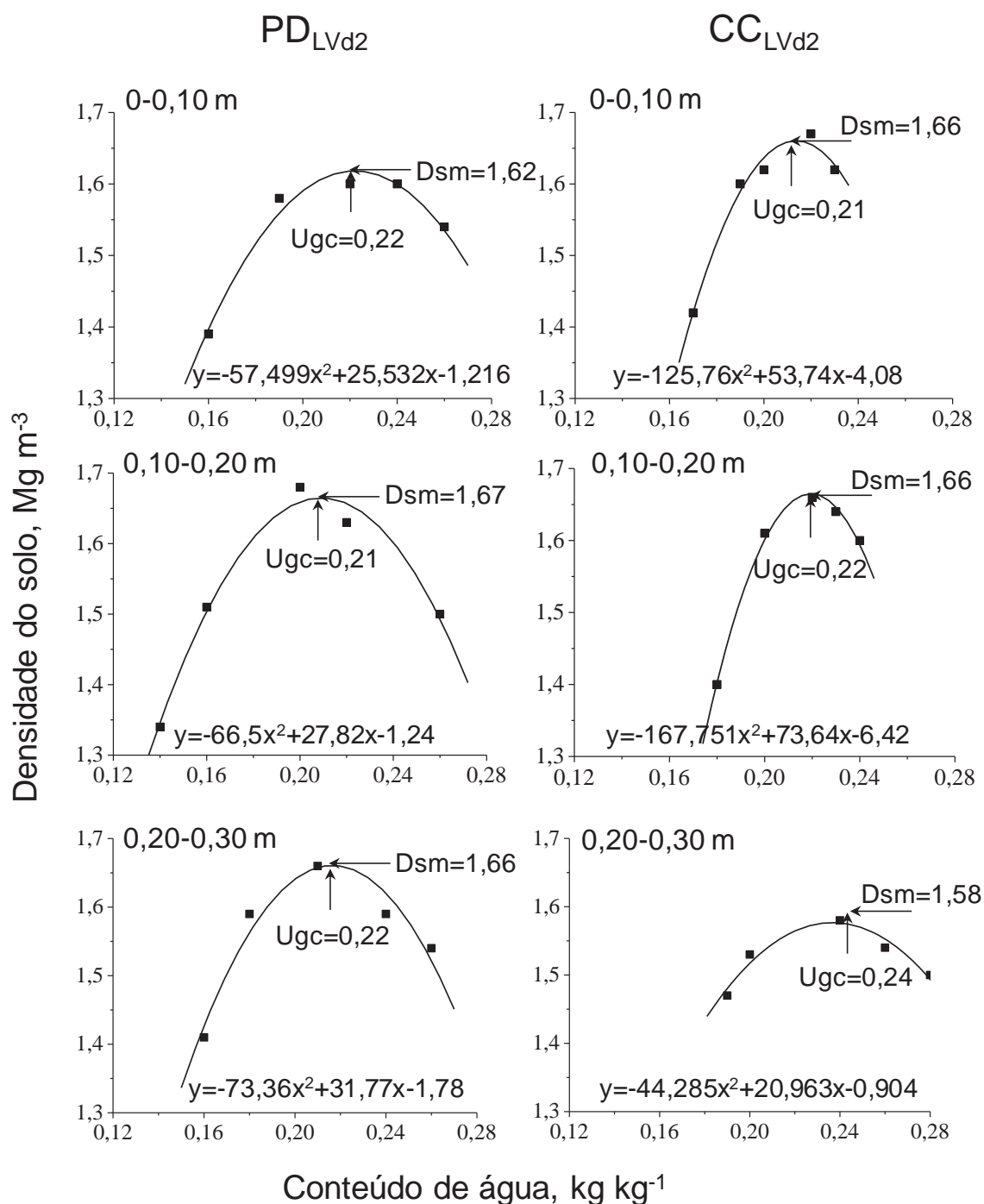


Figura 13. Densidade máxima do solo (D_{sm}) determinada pelo ensaio de Proctor nos solos cultivados com milho, sob cultivo convencional (CC_{LVd2}), e sistema de semeadura direta (PD_{LVd2}), no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa, nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. U_{gc} representa o conteúdo de água crítico em que ocorre a máxima compactação.

Com relação às camadas analisadas, no PD_{LVd1} e no PD_{LVd2} , menores valores de densidade do solo máxima foram verificadas na camada de 0-0,10 m e maiores valores foram encontrados nas camadas subjacentes. Ao contrário, no CC_{LVd1} e no CC_{LVd2} as menores densidades do solo máxima foram verificadas na camada de 0,20-0,30 m. Dessa forma, BRAIDA et al. (2006) avaliando a curva de compactação em um Argissolo Vermelho-Amarelo de textura franco-arenosa (155 g kg^{-1} de argila) e num Nitossolo Vermelho argiloso (787 g kg^{-1}), verificaram que o aumento do teor de carbono orgânico (de $9,3$ para $18,8 \text{ g kg}^{-1}$) reduz a densidade do solo máxima e aumenta a umidade necessária para atingi-la. O conteúdo de água crítico determina a umidade em que não se deve tráfegar o solo com máquinas agrícolas, pois é nessas condições em que ocorre a máxima compactação do solo. BRAIDA et al. (2006) observaram que a média dos valores do conteúdo de água crítico obtido a partir da variação do teor de carbono orgânico no solo foi de $0,28 \text{ kg kg}^{-1}$ para um Nitossolo Vermelho argiloso e de $0,11 \text{ kg kg}^{-1}$ para um Argissolo Vermelho-Amarelo de textura franco-arenosa.

Menores valores de densidade do solo relativa foram verificados no CC_{LVd1} , nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, no primeiro ano de cultivo (Tabela 17). Entretanto, não houve diferença entre os sistemas de manejo na LVd2, em relação à esse atributo (Tabela 18). Menores valores de densidade do solo relativa encontram-se nas camadas superiores, com exceção do PD_{LVd1} , em que o menor valor desse atributo se encontra na camada de 0,10-0,20 m. BEUTLER et al. (2005) verificaram que a densidade do solo relativa ótima para a produção de soja, em casa de vegetação, foi de 84%, em um Latossolo Vermelho eutroférico argiloso, e de 75% em um Latossolo Vermelho caulínico de textura média, e que, em campo, a densidade do solo relativa ótima para a soja foi de 80%, no Latossolo Vermelho eutroférico argiloso.

Tabela 17. Densidade do solo relativa (%) no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, cultivada com soja, sob cultivo convencional (CC_{LVd1}) e sistema de semeadura direta (PD_{LVd1}), nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m

Camada (m)	PD_{LVd1}	CC_{LVd1}	Média
0-0,10	76,61Bb	63,11Aa	69,86
0,10-0,20	83,63Ba	72,85Ab	78,24
0,20-0,30	79,57Aab	75,40Ab	77,48
Média	79,94	70,45	

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%; letras maiúsculas referem-se à comparação de tratamentos; minúsculas comparam camadas de um mesmo tratamento.

Tabela 18. Densidade do solo relativa (%) no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa, cultivada com soja, sob cultivo convencional (CC_{LVd2}) e sistema de semeadura direta (PD_{LVd2}), nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m

Camada (m)	PD _{LVd2}	CC _{LVd2}	<i>Média</i>
0-0,10	67,31	68,90	68,11 ^a
0,10-0,20	74,88	70,33	72,61 ^b
0,20-0,30	79,11	75,13	77,12 ^c
<i>Média</i>	73,77 ^{ns}	71,45 ^{ns}	

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%; letras minúsculas em itálico comparam as médias de camadas; ns= não significativo.

No segundo ano de cultivo, não houve diferença entre os sistemas de manejo, em relação à densidade do solo relativa, tanto na LVd1, quanto na LVd2 (Tabelas 19 e 20). Contudo, VIEIRA & KLEIN (2007) observaram que o sistema de semeadura direta escarificado apresentou menor densidade do solo relativa que o sistema de semeadura direta sem escarificação, em um Latossolo Vermelho distrófico típico, com 450 g kg⁻¹ de argila, 210 g kg⁻¹ de silte e 350 g kg⁻¹ de areia. Na LVd2, menores valores de densidade do solo relativa foram verificados nas camadas superficiais, ao contrário da LVd1, na qual não houve diferença entre as camadas estudadas.

Na LVd2, os valores de densidade do solo relativa estiveram muito próximo ao limite de 90%, sugerido por KLEIN (2008). Segundo esse pesquisador, solos que apresentam valores superiores a esse constituem uma condição extremamente preocupante, pois havendo qualquer adversidade climática (falta ou excesso de precipitação), o desenvolvimento das plantas será seriamente afetado.

Tabela 19. Densidade do solo relativa (%) no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, cultivada com milho, sob cultivo convencional (CC_{LVd1}) e sistema de semeadura direta (PD_{LVd1}), nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m

Camada (m)	PD _{LVd1}	CC _{LVd1}	<i>Média</i>
0-0,10	77,83	80,13	78,98 ^{ns}
0,10-0,20	86,17	84,90	85,53 ^{ns}
0,20-0,30	83,30	87,78	85,54 ^{ns}
<i>Média</i>	82,43 ^{ns}	84,27 ^{ns}	

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%; ns= não significativo.

Tabela 20. Densidade do solo relativa (%) no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa, cultivada com milho, sob cultivo convencional (CC_{LVd2}) e sistema de semeadura direta (PD_{LVd2}), nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m

Camada (m)	PD _{LVd2}	CC _{LVd2}	<i>Média</i>
0-0,10	80,16	78,49	79,33a
0,10-0,20	88,94	84,96	86,95ab
0,20-0,30	89,90	88,42	89,16b
<i>Média</i>	86,33 ^{ns}	83,96 ^{ns}	

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%; letras minúsculas em itálico comparam as médias de camadas; ns= não significativo.

Houve correlação linear significativa da resistência do solo à penetração apenas com a densidade do solo máxima, numa relação inversa (Tabela 21). A porosidade total obteve elevados coeficientes de correlação linear com a microporosidade, com a densidade do solo e com a densidade do solo máxima. Dessa forma, quanto maior é a porosidade total, maior é a microporosidade e menores são os valores de densidade e de densidade do solo máxima. Assim também, a macroporosidade relacionou-se linearmente à microporosidade, ao índice S, à densidade do solo e à densidade do solo relativa. Quanto maior é a macroporosidade, menor é a microporosidade, a densidade do solo e a densidade do solo relativa, ao contrário do índice S, que têm os seus valores elevados em função do aumento da macroporosidade do solo. A microporosidade apresentou coeficiente de correlação linear positivo não só com a porosidade total do solo, como também com a densidade do solo relativa, e negativos com a macroporosidade e com a densidade do solo máxima. Conforme os coeficientes de correlação linear, o aumento nos valores do índice S está relacionado à diminuição da densidade do solo, da densidade do solo relativa e ao aumento da macroporosidade do solo.

Tabela 21. Matriz de correlações de Pearson entre os indicadores de qualidade física do solo: resistência do solo à penetração (RP), porosidade total (PT), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), índice S (S), densidade do solo (Ds), densidade do solo máxima (Dsm) e densidade do solo relativa (Dsr)

	PT	Ma	Mi	S	Ds	Dsm	Dsr
RP	-0,03 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	0,04 ^{ns}	-0,13 ^{ns}	-0,22 ^{ns}	-0,31*	-0,01 ^{ns}
PT	1	0,20 ^{ns}	0,81**	0,20 ^{ns}	-0,57**	-0,80**	-0,14 ^{ns}
Ma		1	-0,41**	0,64**	-0,51**	0,16 ^{ns}	-0,70**
Mi			1	-0,20 ^{ns}	-0,23 ^{ns}	-0,84**	0,28*
S				1	-0,47**	0,00 ^{ns}	-0,73**
Ds					1	0,53**	0,73**
Dsm						1	-0,03 ^{ns}

^{ns} = não significativo; *e** Correlação significativa aos níveis de 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente.

A maior quantidade de raízes de soja foi verificada no PD_{LVd1}, na camada de 0-0,10 m, em comparação ao CC_{LVd1} (Tabela 22). Contudo, na LVd2, não houve diferença entre os sistemas de manejo em relação ao sistema radicular da soja, em todas as camadas avaliadas (Tabela 23). JORGE et al. (2004) observaram que as áreas sob sistema de semeadura direta e cultivo mínimo do solo foram as que apresentaram maior nodulação das raízes de soja.

Tabela 22. Massa seca das raízes de soja (g) nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m do Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, sob sistema de semeadura direta (PD_{LVd1}) e cultivo convencional (CC_{LVd1})

Camada (m)	PD _{LVd1}	CC _{LVd1}
0-0,10	0,96Aa	0,88Ba
0,10-0,20	0,80Ab	0,81Aa
0,20-0,30	0,73Ab	0,73Ab

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%; letras maiúsculas referem-se à comparação de tratamentos e minúsculas comparam camadas de um mesmo tratamento; ns= não significativo. Dados transformados em $\sqrt{x + 0,5}$.

Tabela 23. Massa seca das raízes de soja (g) nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m do Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa, sob sistema de semeadura direta (PD_{LVd2}) e sob cultivo convencional (CC_{LVd2})

Camada (m)	PD _{LVd2}	CC _{LVd2}
0-0,10	1,01Aa	0,94Aa
0,10-0,20	0,76Ab	0,74Ab
0,20-0,30	0,73Ab	0,73Ab

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%; letras maiúsculas referem-se à comparação de tratamentos e minúsculas comparam camadas de um mesmo tratamento; ns= não significativo. Dados transformados em $\sqrt{x + 0,5}$.

Em relação às camadas de solo analisadas, as camadas superficiais, tanto na LVd1 quanto na LVd2, apresentaram maiores valores de massa seca das raízes de soja. BEUTLER & CENTURION (2003) constataram que o aumento da compactação do solo aumenta a densidade, a superfície e a massa de matéria seca das raízes, nas camadas superficiais do solo. Esses pesquisadores observaram que um decréscimo do sistema radicular, na resistência à penetração de 0,85 MPa, pode ocasionar redução na produtividade da soja.

No segundo ano de experimento, na LVd1, o PD_{LVd1} diferiu do CC_{LVd1} apenas na camada de 0,10-0,20 m, apresentando menor massa seca das raízes de milho (Tabela 24).

Tabela 24. Massa seca das raízes de milho (g) nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m do Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, sob sistema de semeadura direta (PD_{LVd1}) e cultivo convencional (CC_{LVd1})

Camada (m)	PD _{LVd1}	CC _{LVd1}
0-0,10	0,77Aa	0,82Aa
0,10-0,20	0,74Ba	0,81Aa
0,20-0,30	0,73Ab	0,75Aa

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%; letras maiúsculas referem-se à comparação de tratamentos e minúsculas comparam camadas de um mesmo tratamento; ns= não significativo. Dados transformados em $\sqrt{x + 0,5}$.

Em relação às camadas analisadas, maiores valores da massa seca das raízes de milho foram verificados nas camadas superficiais (0-0,10 e 0,10-0,20 m) do PD_{LVd1}. Contudo, no CC_{LVd1} não houve diferenças entre as camadas analisadas. FREDDI et al. (2007) verificaram que valores de resistência à penetração variando entre 1,03 e 5,69

MPa provocaram alterações na morfologia do sistema radicular do milho, reduzindo a produtividade da cultura em 2,581 Mg ha⁻¹, mas não foram impeditivos ao enraizamento.

Na camada de 0-0,10 m, na LVd2, o PD_{LVd2} apresentou a maior massa seca das raízes diferindo-se do CC_{LVd2} (Tabela 25). Também maior massa seca das raízes de milho apresentou a camada superficial do PD_{LVd2} (0-0,10 m), sendo que no CC_{LVd2} não houve diferença entre as camadas analisadas. Segundo BERGAMIN et al. (2010) a compactação influencia negativamente o sistema radicular do milho, sendo a macroporosidade o indicador de qualidade do solo mais bem relacionado com o comprimento e a superfície radicular.

Tabela 25. Massa seca das raízes de milho (g) nas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m do Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa sob sistema de semeadura direta (PD_{LVd2}) e sob cultivo convencional (CC_{LVd2})

Camada (m)	PD _{LVd2}	CC _{LVd2}
0-0,10	0,86Aa	0,77Ba
0,10-0,20	0,73Ab	0,74Aa
0,20-0,30	0,73Ab	0,75Aa

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%; letras maiúsculas referem-se à comparação de tratamentos e minúsculas comparam camadas de um mesmo tratamento; ns= não significativo. Dados transformados em $\sqrt{x + 0,5}$.

Tanto na LVd1 quanto na LVd2, não houve diferença entre os sistema de manejo (PD e CC) em relação à altura das plantas, altura de inserção da primeira vagem, número de vagens por planta e, portanto, refletiu na produção das plantas de soja (Tabelas 26 e 27), o que mostra que o solo sob sistema de semeadura direta apresentou desempenho semelhante ao solo recém-revolvido (CC). Conforme CENTURION et al. (2006) a compactação até a densidade do solo de 1,60 Mg m⁻³ não foi prejudicial à produção de soja, em um Latossolo Vermelho de textura média, porém restringiu a altura de plantas, o comprimento de entrenós e o número de vagens por planta. Assim, embora o sistema de semeadura direta tenha apresentado alguns valores de densidade do solo superiores ao cultivo convencional (PD_{LVd1}, nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, Tabela 9), todas as áreas estudadas apresentaram valores de densidade do solo inferiores a esse (Tabelas 9 e 10), o que pode justificar a ausência

de diferença entre os sistemas de manejo em relação às características agronômicas da cultura da soja, nas duas áreas experimentais.

Tabela 26. Altura da planta (Alt), altura de inserção da primeira vagem (Ins), número de vagens por planta (Núm) e produção das plantas (Prod) de soja no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, sob sistema de semeadura direta (PD_{LVd1}) e cultivo convencional (CC_{LVd1})

Tratamento	Alt (m) ^{ns}	Ins (m) ^{ns}	Núm ^{ns}	Prod (Mg ha ⁻¹) ^{ns}
PD _{LVd1}	94,4	20,8	62,0	5,9
CC _{LVd1}	104,5	17,6	81,3	5,2

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%; ns= não significativo.

Tabela 27. Altura da planta (Alt), altura da inserção da primeira vagem (Ins), número de vagens por planta (Núm) e produção das plantas (Prod) das plantas de soja no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 2, de textura argilosa, sob sistema de semeadura direta (PD_{LVd2}) e sob cultivo convencional (CC_{LVd2})

Tratamento	Alt (m) ^{ns}	Ins (m) ^{ns}	Núm ^{ns}	Prod (Mg ha ⁻¹) ^{ns}
PD _{LVd2}	100,2	15,3	87,4	6,0
CC _{LVd2}	91,0	12,5	93,7	5,5

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%; ns= não significativo.

Ao contrário do primeiro ano de cultivo, o PD_{LVd1} se destacou em relação ao CC_{LVd1}, com maior produção de milho, embora o CC_{LVd1} tenha apresentado maior altura das plantas de milho e maior altura da inserção da primeira espiga (Tabela 28).

Tabela 28. Altura da planta (Alt), altura da inserção da primeira espiga (Ins), massa da parte aérea (Mas) e produção (Prod) das plantas de milho no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, sob sistema de semeadura direta (PD_{LVd1}) e cultivo convencional (CC_{LVd1})

Tratamento	Alt (m)	Ins (m)	Mas (g) ^{ns}	Prod (Mg ha ⁻¹)
PD _{LVd1}	2,402b	1,027b	747,800	9,7a
CC _{LVd1}	2,633a	1,188a	747,662	7,9b

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%; ns= não significativo.

Na LVd2, o CC_{LVd2} também se destacou em relação ao PD_{LVd2} quanto à altura das plantas de milho e à altura da inserção da primeira espiga (Tabela 29). No entanto, não houve diferença entre os tratamentos em relação à massa da parte aérea e também à produção de milho. FREDDI et al. (2008) constataram que valores de resistência do solo à penetração acima de 0,34 MPa, determinada na tensão de 0,01

MPa, restringiu o crescimento aéreo das plantas de milho assim como sua produtividade, também em um Latossolo Vermelho argiloso. Segundo BEUTLER et al. (2007) pode ocorrer decréscimo de produtividade das plantas em função da excessiva resistência do solo à penetração, que é desencadeado por diversas razões, entre as quais: redução do comprimento e da distribuição do sistema radicular; redução da absorção de água nutrientes pelas raízes; aumento da produção e concentração de ácido abscísico nas raízes e envio à parte aérea, induzindo a planta a diminuir seu crescimento; maior demanda de carboidratos pelas raízes resultando em menor alocação para a parte aérea.

Tabela 29. Altura da planta (Alt), altura da inserção da primeira espiga (Ins), massa da parte aérea (Mas) e produção (Prod) das plantas de milho no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa, sob sistema de semeadura direta (PD_{LVd2}) e sob cultivo convencional (CC_{LVd2})

Tratamento	Alt (m)	Ins (m)	Mas (g) ^{ns}	Prod (Mg ha ⁻¹) ^{ns}
PD _{LVd2}	2,512b	1,043b	803,638	8,8
CC _{LVd2}	2,607a	1,130a	747,967	10,2

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste t a 5%; ns= não significativo.

Não houve correlação linear entre a massa seca das raízes das plantas e os indicadores de qualidade física do solo avaliados (Tabela 30). Ao contrário, a altura das plantas esteve relacionada linearmente à menor resistência do solo à penetração, à menor densidade do solo, à menor densidade do solo relativa e à maior porosidade total, macroporosidade e microporosidade. A altura de inserção da primeira vagem/espiga relacionou-se negativamente à resistência do solo à penetração, à densidade do solo e à densidade do solo relativa, e positivamente à porosidade total e à microporosidade. A produção de grãos esteve relacionada à maior porosidade total, microporosidade e menor densidade do solo e densidade do solo relativa, como indica os coeficientes de correlação linear. FREDDI et al. (2008) também observaram que a densidade do solo e a resistência do solo à penetração correlacionaram-se negativamente, com a altura das plantas, altura de inserção da primeira espiga e com a produtividade.

Tabela 30. Matriz de correlações de Pearson entre os indicadores de qualidade física do solo: resistência do solo à penetração (RP), porosidade total (PT), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), índice S (S), densidade do solo (Ds), densidade do solo máxima (Dsm) e densidade do solo relativa (Dsr), e as características agronômicas das culturas: massa seca das raízes (Raiz), altura das plantas (Altura), altura de inserção da primeira vagem/espiga (Inserção) e produção das plantas (Produção)

	RP	VTP	Ma	Mi	S	Ds	Dsm	DSR
Raiz	-0,05 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,01 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	0,04 ^{ns}	-0,15 ^{ns}
Altura	-0,32*	0,31*	0,32*	0,48**	0,21 ^{ns}	-0,55**	0,15 ^{ns}	-0,62**
Inserção	-0,32*	0,45**	0,23 ^{ns}	0,56**	0,14 ^{ns}	-0,36**	0,25 ^{ns}	-0,49**
Produção	-0,22 ^{ns}	0,30*	0,24 ^{ns}	0,43**	0,14 ^{ns}	-0,39**	0,23 ^{ns}	-0,50**

^{ns} = não significativo; **e** Correlação significativa aos níveis de 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente.

3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas condições em que a pesquisa foi conduzida, os resultados permitem concluir que houve grande variação da resistência do solo à penetração ao longo do ciclo das culturas da soja e do milho, sendo que seus maiores valores foram constatados nas camadas superficiais. Dentre os sistemas de manejo, o sistema de semeadura direta apresentou maior resistência do solo à penetração.

Durante o ciclo da cultura da soja, na área experimental 1, foram verificados maiores valores de densidade do solo e menores valores de porosidade total, macroporosidade e microporosidade sob sistema de semeadura direta. Na área experimental 2, não houve diferença entre os sistemas de manejo em relação à esses indicadores. Durante o ciclo da cultura do milho, na área experimental 1, maior densidade do solo foi verificada sob cultivo convencional, enquanto que os sistemas de manejo não diferiram em relação à macroporosidade e à microporosidade. Na área experimental 2, não houve diferença entre os sistemas de manejo em relação à densidade do solo, à macroporosidade e também à microporosidade.

Maior retenção de água no solo foi verificada sob cultivo convencional, na área experimental 1, durante o ciclo da cultura da soja, ou seja, no primeiro ano de experimento. Contudo, no segundo ano agrícola, quase não houve diferença entre os sistemas de manejo em relação à retenção de água no solo.

No primeiro ano agrícola, foram verificados, em algumas camadas, maiores valores do índice S para o cultivo convencional, enquanto que, no segundo ano, maiores valores do índice S foram constatados sob sistema de semeadura direta, na área experimental 1. Na área experimental 2, os sistemas de manejo não diferiram em relação à esse indicador.

Maiores valores de densidade do solo máxima foram observados sob cultivo convencional, nas duas áreas experimentais, no primeiro ano agrícola, o que também ocorre para a área experimental 1, no segundo ano agrícola.

Em relação à densidade do solo relativa, os sistemas de manejo diferem apenas nas camadas superiores da área experimental 1, no primeiro ano agrícola, tendo o sistema de semeadura direta apresentado maiores valores desse indicador.

Não houve diferença entre os sistemas de manejo em relação à produção de soja. Maior produção de milho foi constatada sob sistema de semeadura direta, na área experimental 1.

A produção das culturas esteve relacionada aos maiores valores de porosidade total e microporosidade, e aos menores valores de densidade do solo e densidade do solo relativa.

3.5. CONCLUSÃO

Dentre os sistemas de manejo, embora o cultivo convencional tenha apresentado melhores resultados em relação aos indicadores de qualidade física do solo, o sistema de semeadura direta foi o que proporcionou maior produção de milho.

4. REFERÊNCIAS

ABREU, S.L.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 519-531, 2004.

AGGARWAL, P.; CHOUDHARY, K.K.; SINGH, A.K.; CHAKRABORTY, D. Variation in soil strength and rooting characteristics of wheat in relation to soil management. **Geoderma**, Amsterdam, v. 136, p. 353-363, 2006.

ALLISON, F.E. **Soil organic matter and its role in crop production**. Amsterdam, Elsevier, 1973. p. 315-345.

ALMEIDA, C.X.; CENTURION, J.F.; FREDDI, O.S.; JORGE, R.F.; BARBOSA, J.C. Funções de pedotransferência para a curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2235-2243, 2008.

ALMEIDA, C.X.; CENTURION, J.F.; JORGE, R.F.; ANDRIOLI, I.; VIDAL, A.A.; SERAFIM, R.S. Índice de floculação e agregação de um Latossolo Vermelho sob dois sistemas de colheita da cana-de-açúcar. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 25, p. 123-129, 2009.

ANDREOLA, F.; COSTA, L.M.; OLSZEWSKI, N. Influência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e, ou, mineral sobre as propriedades físicas de uma Terra Roxa Estruturada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 24, p. 857-865, 2000.

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, Brasília, 1999. **Anais...** Brasília, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999. p.1-4.

AYERS, P.D.; PERUMPRAL, J.V. Moisture and density effect on cone index. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 25, p. 1169-1172, 1982.

BAILEY, A.C.; JOHNSON, C.E.; SCHAFER, R.L. A model for agricultural soil compaction. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 33, p. 257-262, 1986.

BENGOUGH, A.G.; CAMPBELL, D.J.; O'SULLIVAN, M.F. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. In: DEKKEE, M. 2 ed. **Soil and Environment Analysis: Physical Methods**, 2001. p. 377-403.

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

BERGAMIN, A.C.; VITORINO, A.C.T.; FRANCHINI, J.C.; SOUZA, C.M.A.; SOUZA, F.R. Compactação em um Latossolo Vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 681-691, 2010.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C.; SILVA, A.P. Efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 787-794, 2006.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ROQUE, C.G.; FERRAZ, M.V. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 843-849, 2005.

BEUTLER, A.N.; FREDDI, O.S.; LEONEL, C.L.; CENTURION, J.F. Densidade do solo relativa e parâmetro "S" como indicadores da qualidade física para culturas anuais. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande, v. 8, p. 27-36, 2008.

BEUTLER, A.N.; SILVA, N.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; CRUZ, J.N.; PEREIRA FILHO, I.A. Resistência a 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. 167-177, 2001.

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.; CENTURION, M.A.P.C.; LEONEL, C.L.; SÃO JOÃO, A.C.G.; FREDDI, O.S. Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação e da qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1223-1232, 2007.

BEUTLER, J.F., BERTOL, I., VEIGA, M.; WILDNER, L.P. Perdas de solo e água num Latossolo Vermelho aluminoférrico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo sob chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 509-517, 2003.

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

BORGES, E.N.; LOMBARDI NETO, F.; CORRÊA, G.F.; BORGES, E.V.S. Alterações físicas introduzidas por diferentes níveis de compactação em Latossolo Vermelho Escuro textura média. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, p. 1663-1667, 1999.

BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. **Advances in Soil Science**, New York, v. 9, p. 177–213, 1989.

BRADY, N.C.; WEIL, R.P. **The nature and properties of soils**. New Jersey, Ed. Prentice Hall, 2002. 1000p.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M.; REINERT, D.J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio de Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 605-614, 2006.

BUDIMAN, M.; MCBRATNEY, A.; MENDONÇA-SANTOS, M.L.; SANTOS, H.G. **Revisão sobre funções de pedotransferência (PTFs) e novos métodos de predição de classes e atributos do solo**. Rio de Janeiro, 2003. 50p (Doc. 45).

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flatipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v. 33, p. 519-523, 1990.

BUSSCHER, W.J.; BAUER, P.J.; CAMP, C.R.; SOJKA, R.E. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 43, p. 205-217, 1997.

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

CARVALHO, R.; GOEDERT, W.J.; ARMANDO, M.S. Atributos físicos da qualidade de um solo sob sistema agroflorestal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 1153-1155, 2004.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PADANOSCHI, A.L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 527-538, 1998.

CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C.; BEUTLER, A.N.; ROSSINI, L.A.; FREDDI, O.S.; SOUZA NETO, E.L. Compactação do solo no desenvolvimento e na produção de cultivares de soja. **Científica**, Jaboticabal, v.34, p. 203-209, 2006.

CENTURION, J.F.; DEMATTÊ, J.L. Efeitos de preparo nas propriedades físicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 9, p. 263-266, 1985.

CERQUETANI, G.E.; MARTINS FILHO, M.V. Rotina computacional e equação simplificada para modelar o transporte de sedimentos num Latossolo Vermelho distrófico. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, p. 617-626, 2006.

CUNHA, J.P.A.R.; VIEIRA, L.B.; MAGALHÃES, A.C. Resistência do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 10, p. 1-4, 2002.

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.

DERPSCH, R. SIDIRAS, N.; HEINZMANN, F.X. Manejo do solo com coberturas verdes de inverno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 20, p. 671-773, 1985.

DEXTER, A.R.; YOUNGS, I. M. Soil physics toward 2000. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 24, p. 101- 106, 1992.

DEXTER, A.R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 201-214, 2004a.

DEXTER, A.R. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tilth and hard-setting. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. :215-225, 2004b.

DEXTER, A.R. Soil physical quality. Part III: Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 227-239, 2004c.

DEXTER, A.R.; CZYŻ, E.A.; GATE, O.P. A method for prediction of soil penetration resistance. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 93, p. 412-419, 2007.

DIAS JÚNIOR, M.S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. (eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p. 55–94, 2000.

DORAN, J.W.; PARKING, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W., COLEMAN, D.C., BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (eds.) **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison, Soil Science Society of America, 1994. p.3-21. (Special publication, 35).

DORAN, J.W., ZEISS, M.R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. **Applied Soil Ecology**, Dublin, v. 15, p. 3–11, 2000.

DUFRANC, G.; DECHEN, S.C.F.; FREITAS, S.S.; CAMARGO, O.A. Atributos físicos, químicos e biológicos relacionados com a estabilidade de agregados de dois latossolos em plantio direto no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 505-517, 2004.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, 1997. 212p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, Brasília, Sistema de Produção de Informação, 2006. 306p.

FARIAS, J.R.B., ALMEIDA, I.R., GARCIA, A. **Zoneamento agroclimático da cultura da soja para o estado do Paraná**. Londrina: Embrapa-Soja, 1997. 84p. (Documentos, 102).

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.

FERREIRA, D.F. **Sisvar** 4.3. 2003. Disponível em: <http://www.dex.ufla.br/danielff/sisvar>>. Acesso em 10 jan. 2009.

FIGUEIREDO, C.C.; RAMOS, M.L.G.; TOSTES, R. Propriedades físicas e matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob sistemas de manejo e cerrado nativo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 24, p. 24-30, 2008.

FIGUEIREDO, L.H.A.; DIAS JUNIOR, M.S.; FERREIRA, M.M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 487-493, 2000.

FOLONI, J.S.S.; CALONEGO, J.C.; LIMA, S.L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, p. 947-953, 2003.

FREDDI, O.S.; CARVALHO, M.P.; VERONESI JÚNIOR, V.; CARVALHO, G.J. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. **Engenharia agrícola**, Jaboticabal, v. 26, p. 113-121, 2006.

FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; ALMEIDA, C.X. Compactação de um Latossolo Vermelho de textura argilosa afetando o sistema radicular e a produtividade do milho. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 56, p. 654-665, 2009.

FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; BEUTLER, A.N.; ARATANI, R.G.; LEONEL, C.L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 627-636, 2007.

FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; ARATANI, R.G.; BEUTLER, A.N. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo no crescimento da parte aérea e produtividade da cultura do milho. **Irriga**, Botucatu, v.13, p. 272-287, 2008.

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

GREGORICH, E.G. Quality. In: LAL, R. (ed.). **Encyclopedia of soil science**. Marcel Dekker, Inc., New York, p.1058-1061, 2002.

GREGORY, P.J. **Plant roots: growth, activity and interaction with soils.** Oxford: Blackwell Publishing, 2006. 318 p.

GRUNWALD, S.; MCSWEENEY, K.; ROONEY, D.J.; LOWERY, B. Soil layer models created with profile cone penetrometer data. **Geoderma**, Amsterdam, v. 103, p. 181–201, 2001.

HAIR JUNIOR, J.F.; ANDERSON, R.E.; BLACK, W.C. **Análise Multivariada de Dados.** 5.ed. Porto Alegre, Bookman, 2005. 593p.

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

JORGE, R.F.; PASSOS, R.R.; BORGES, E.N.; CORREA, G.F.; GONTIJO, I. Efeito de sistemas de preparo no rendimento, nutrição e características agronômicas da soja cultivada em solo de cerrado. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 20, p. 187-196, 2004.

KARLEN, D.L.; STOTT, D.E. **A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality.** In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (eds.) *Defining soil quality for a sustainable environment.* SSSA, Madison, 1994, p.53-72. (Special publication, 35).

KLEIN, V.A. Densidade relativa - um indicador de qualidade física de um Latossolo Vermelho. **Revista Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 5, p. 26-32, 2006.

KLEIN, V.A. **Física do solo.** Passo Fundo: Editora da Universidade de Passo Fundo, 2008. 212 p.

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

KLUTHCOUSKI, J.; FANCELLI, A.L.; DOURADO-NETO, D.; RIBEIRO, C.M.; FERRARO, L. A. Manejo do solo e o rendimento de soja, milho, feijão e arroz em plantio direto. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, p. 97-104, 2000.

LAL, R.; GREENLAND, B.J. **Soil physical properties and crop production in tropics**. Chichester, John Wiley, 1979. p. 7-85.

LAPEN, Q.R.; TOPP, G.C.; EDWARDS, M.E.; GREGORICH, E.G.; CURNOE, W.E. Combination cone penetration resistance/water content instrumentation to evaluate cone penetration-water content relationships in tillage research. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, p. 51-62, 2004

LARSON, W.E.; PIERCE, F.J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (eds.) **Defining soil quality for a sustainable environment**. Soil Science Society of America: American Society of Agronomy, 1994. p. 37-51.

LEGATES, D.R.; MCCABE JÚNIOR, G.J. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Science and Research**, Washington, v. 35, p. 233-241, 1999.

LEITE, D.; BERTOL, I., GUADAGNIN, J.C.; SANTOS, E.J.; RITTER, S.R. Erosão hídrica em um Nitossolo Háplico submetido a diferentes sistemas de manejo sob chuva simulada. I – Perdas de solo e água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 1033-1044, 2004.

LIMA, C.L.R.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; LEÃO, T.P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 217-223, 2006.

LIMA, H.V.; LIMA, C.L.R.; LEÃO, T.P.; COOPER, M.; SILVA, A.P.; ROMERO, R.E. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 677-684, 2005.

LINS E SILVA, M.L. **Influência da densidade e do teor de água do solo no índice de cone de um Latossolo Vermelho Escuro**. 1994. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

MARTINS FILHO, M.V. **Modelagem do processo de erosão entressulcos em Latossolos de Jaboticabal**. 1999. 140f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1999.

MCBRATNEY, A.B.; MINASNY, B.; CATTLE, S.R.; VERVOORT, R.W. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, Amsterdam, v. 109, p. 41-73, 2002.

MELLO, G.; BUENO, C.R.P.; PEREIRA, G.I. Variabilidade espacial das propriedades físicas e químicas do solo em áreas intensamente cultivadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, p. 294-305, 2006.

MENGEL, D.B.; BARBER, S.A. Development and distribution of the corn root under field conditions. **Agronomy Journal**, Madison, v. 66, p. 341-344, 1974.

MIELKE, L.N., POWERS, W.L., BADRI, S.; JONES, A.J. Estimating soil water content from soil strength, **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 31, p. 199-209, 1994.

MINASNY, B. Predicting soil properties. **Journal Ilmu Tanah dan Lingkungan**, Bogor, v. 7, p. 54-67, 2007.

NEIRO, E.S.; MATA, J.D.V.; TORMENA, C.A.; GONÇALVES, A.C.A.; PINTRO, J.C.; COSTA, J.M. Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho distroférico, com rotação e sucessão de culturas, sob plantio direto. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 25, p. 19-25, 2003.

NETTO, A.A.; FERNANDES, E.J.; CENTURION, J.F. Propriedades físicas e indicador de qualidade de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Irriga**, Botucatu, v. 12, p. 27-37, 2007.

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

OHU, J.O., RAGHAVAN, G.S.V., MCKYES, E. Cone index prediction of compacted soils. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 31, p. 306-310, 1988.

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S.; CURI, N. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, p. 291-299, 2003.

PASSIOURA, J.B. Soil conditions and plant growth. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 25, p. 311-318, 2002.

PRADO, R.M., ROQUE, C.G., SOUZA, Z.M. Sistema de preparo e resistência à penetração e densidade de um Latossolo Vermelho eutrófico em cultivo intensivo e pousio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, p. 1795-1801, 2002.

RAIJ, B.VAN; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C., eds. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas, Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1997. 285p. (Boletim Técnico, 100).

RAIJ, B.Van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A., eds. **Análise química para a avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agronômico, 2001. 285p.

RALISCH, R.; MIRANDA, T.M.; OKUMURA, R.S.; BARBOSA, G.M.C.; GUIMARÃES, M.F.; SCOPE, E.; BALBINO, L.C. Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho Amarelo do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.12, p. 381-384, 2008.

REZENDE, J.O. 2000. **Solos coesos dos tabuleiros costeiros**: limitações agrícolas e manejo. Salvador: SEAGRI-SPA. 117 p.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O.R.; LLANILLO, R.F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina**, Londrina, v. 26, p. 321-344, 2005.

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.

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

SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; FIDASLKI, J.; IMHOFF, S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32:1-10, 2008.

SILVA, R.B., DIAS, M.S., SILVA, F.A.M.; FOLE, S.M. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo dos Cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27:973-983, 2003.

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

SOJKA, R.E.; BUSSCHER, W.J.; LEHRSCHE, G.A. In situ strength, bulk density and water content relationships of a Durinodic Xeric Haplocalcid soil. **Soil Science**, Baltimore, v. 166, p. 520-529, 2001.

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**, Viçosa, v. 15, p. 229-235, 1991.

STONE, L.F., MOREIRA, J.A.A. Efeitos de sistema de preparo do solo no uso da água e na produtividade do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, p. 835-841, 2000.

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

STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 395-401, 2001.

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G.M.C.; GUIMARÃES, M.F.; FONSECA, I.C.B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays* L.) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 725 –730, 2001.

TAYLOR, H.M.; ROBERTSON, G.M.; PARKER, J.J. Soil strength root penetration for medium to coarse textured soil materials. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 102, p. 18-22, 1966.

TEDESCHI, L.O. Assessment of the adequacy of mathematical models. **Agricultural Systems**, Barking, v. 89, p. 225-247, 2006.

TISDALL, J.M.; OADES, L.M. Organic matter and water-stable aggregates in soil. **Journal of Soil Science**, London, v. 33, p. 141-163, 1982.

TO, J.; KAY, B.D. Variation in penetrometer resistance with soil properties: the contribution of effective stress and implications for pedotransfer functions. **Geoderma**, Amsterdam, v. 126, p. 261-276, 2005.

TOPP, G.C.; REYNOLDS, F.J.; COOK, J.M.; KIRBY, J.M.; CARTER, M.R. Physical attributes of soil quality. In: GREGORICH, E.G.; CARTER, M.R. (eds.) **Soil quality for crop production and ecosystem health**. Developments in Soil Science, Amsterdam, p. 21-58, 1997.

TORMENA, C.A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J.C.; COSTA, A.C.S.; FIDALSKI, J. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 1023-1031, 2004.

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.; IMHOFF, S.D.; DEXTER, A.R. Quantificação da qualidade física de um Latossolo utilizando o índice S. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 65, p. 56-60, 2008.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. 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.

TORRES, E.; SARAIVA, O.F. **Estudo das causas da compactação do solo e do seu efeito sobre a soja**. Resultados de pesquisa da Embrapa Soja. Embrapa, Londrina, 1998. p. 177-181.

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

VIEIRA, M.L.; KLEIN, V.An. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1271-1280, 2007.

WALCZAK, R.T., F. MORENO, C. SŁAWIŃSKI, E. FERNANDEZ, AND J.L. ARRUE. Modeling of soil water retention curve using soil solid phase parameters. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 329, p. 527–533, 2006.

WHALLEY, W.R.; LEEDS-HARRISON, P.B.; CLARK, L.J.; GOWING, D.J.G. Use of effective stress to predict the penetrometer resistance of unsaturated agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 84, p.18-27, 2005.

WOHLENBERG, E.V.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BLUME, E. Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p.891-900, 2004.

APÊNDICES

Apêndice A

Tabela 31A. Resultados dos testes de normalidade e homocedasticidade da variância dos erros do ajuste das Equações 1, 2, 3, 4 e 8 aos dados obtidos com o penetrômetro eletrônico (Eletrônico) e com o penetrômetro de impacto (Impacto) no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, e na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa

Teste	LVd1			
	Penetrômetro			
	Eletrônico		Impacto	
	K-S	Levene	K-S	Levene
	<i>Equação 1</i>			
Valor do teste	0,0888	1,2571	0,0510	0,8194
Valor-p	> 0,15	0,30	> 0,15	0,67
	<i>Equação 2</i>			
Valor do teste	0,0812	0,7464	0,0721	0,7604
Valor-p	> 0,15	0,65	> 0,15	0,73
	<i>Equação 3</i>			
Valor do teste	0,0661	0,5625	0,0775	0,7303
Valor-p	> 0,15	0,80	> 0,15	0,76
	<i>Equação 4</i>			
Valor do teste	0,0657	0,5852	0,0721	0,7337
Valor-p	> 0,15	0,78	> 0,15	0,76
	<i>Equação 8</i>			
Valor do teste	0,0558	0,7377	0,0543	0,7826
Valor-p	> 0,15	0,66	> 0,15	0,71
	LVd2			
	<i>Equação 1</i>			
Valor do teste	0,0965	1,1087	0,0603	0,4840
Valor-p	> 0,15	0,39	> 0,15	0,95
	<i>Equação 2</i>			
Valor do teste	0,0977	0,7014	0,0777	0,5202
Valor-p	> 0,15	0,73	> 0,15	0,93
	<i>Equação 3</i>			
Valor do teste	0,0665	0,7661	0,0567	0,5204
Valor-p	> 0,15	0,67	> 0,15	0,93
	<i>Equação 4</i>			
Valor do teste	0,0790	0,7506	0,0648	0,5240
Valor-p	> 0,15	0,68	> 0,15	0,93

Continua...

Tabela 31A. Continuação

	<i>Equação 8</i>			
Valor do teste	0,0869	0,7506	0,0661	0,5271
Valor-p	> 0,15	0,68	> 0,15	0,93

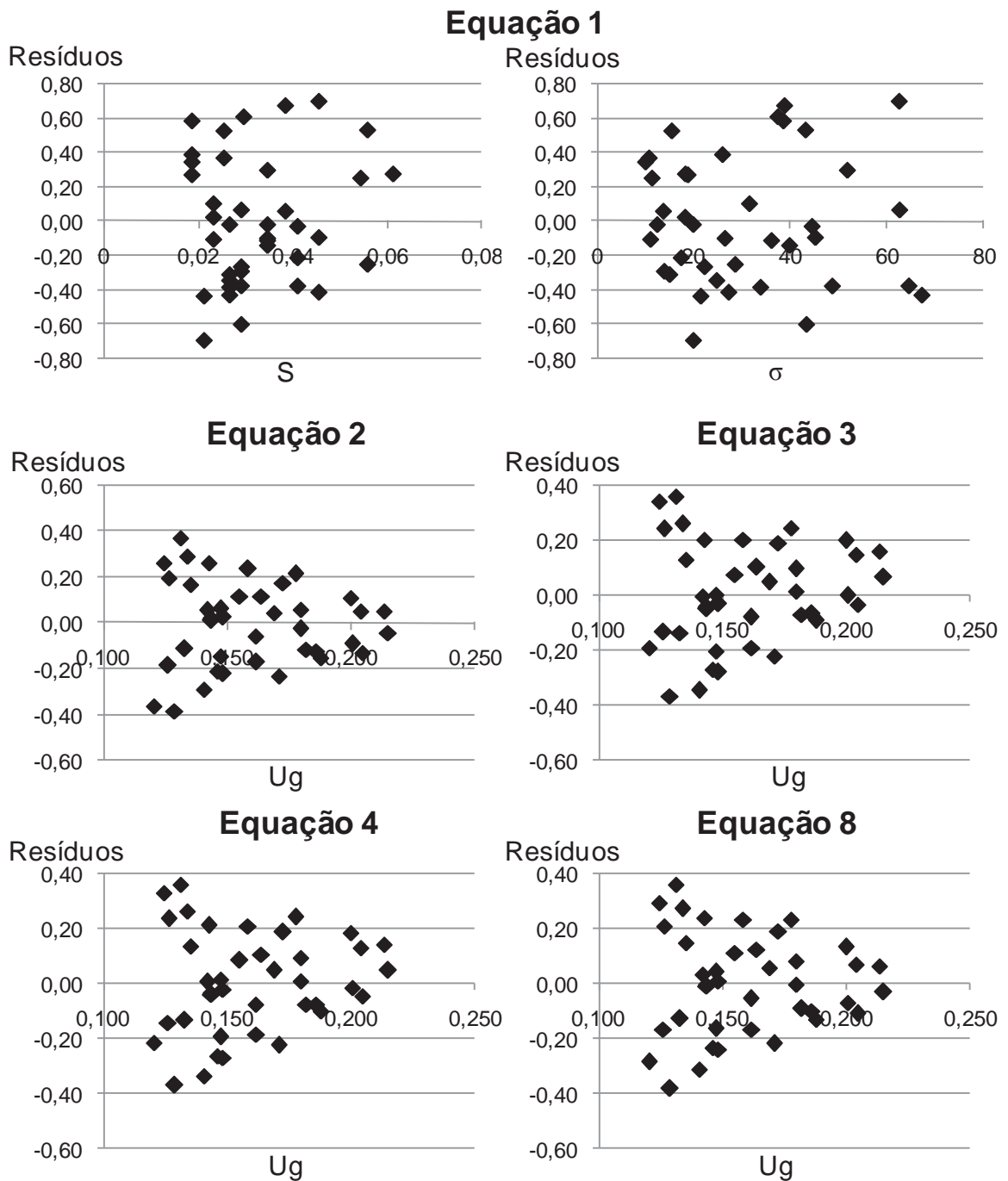


Figura 14A. Resíduos das Equações 1, 2, 3, 4 e 8 ajustadas aos dados do penetrômetro eletrônico obtidos no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1, de textura média, em função das variáveis independentes: índice S (S), estresse efetivo (σ) e conteúdo de água no solo (U_g).

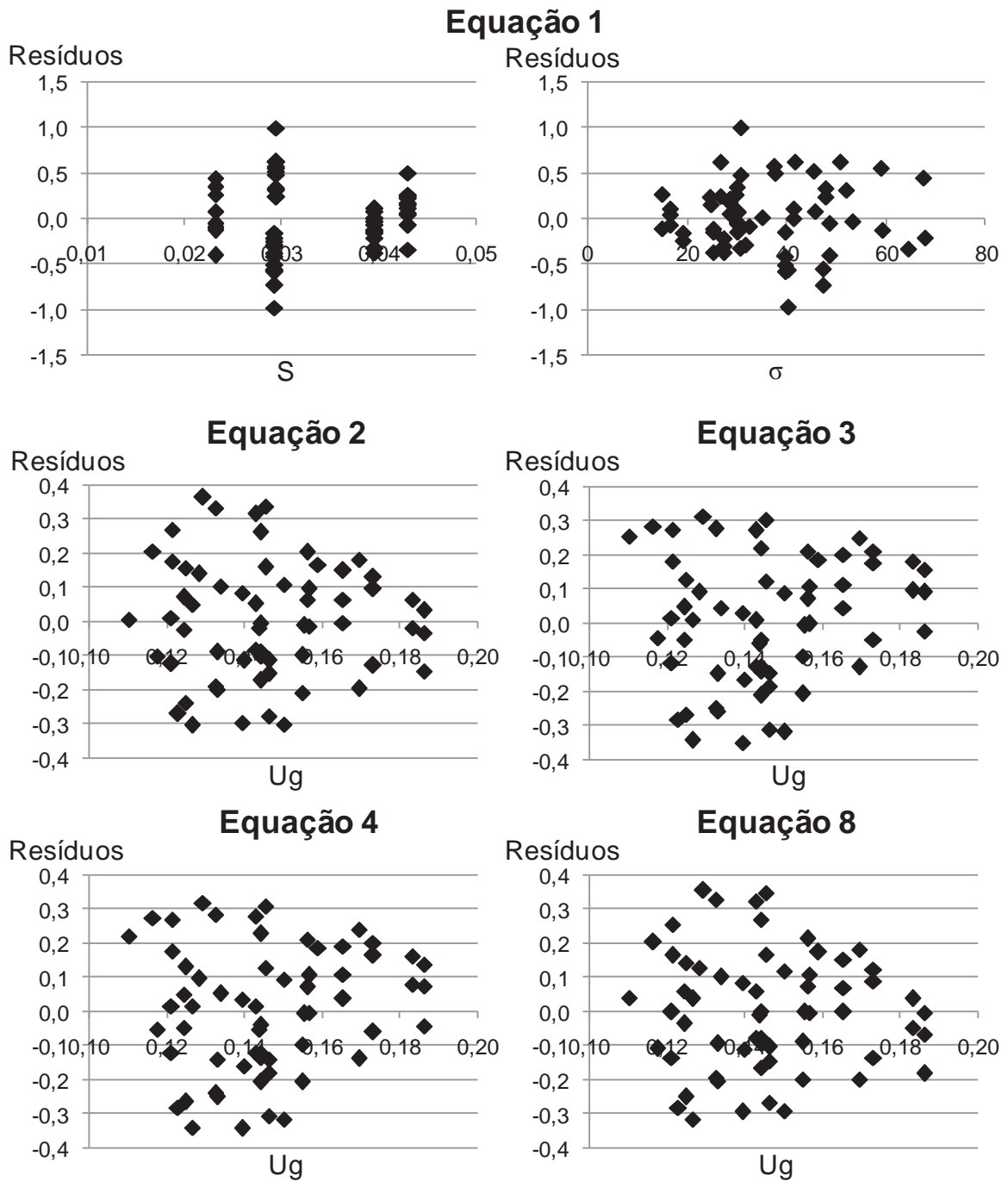


Figura 15A. Resíduos das Equações 1, 2, 3, 4 e 8 ajustadas aos dados do penetrômetro de impacto obtidos no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1, de textura média, em função das variáveis independentes: índice S (S), estresse efetivo (σ) e conteúdo de água no solo (U_g).

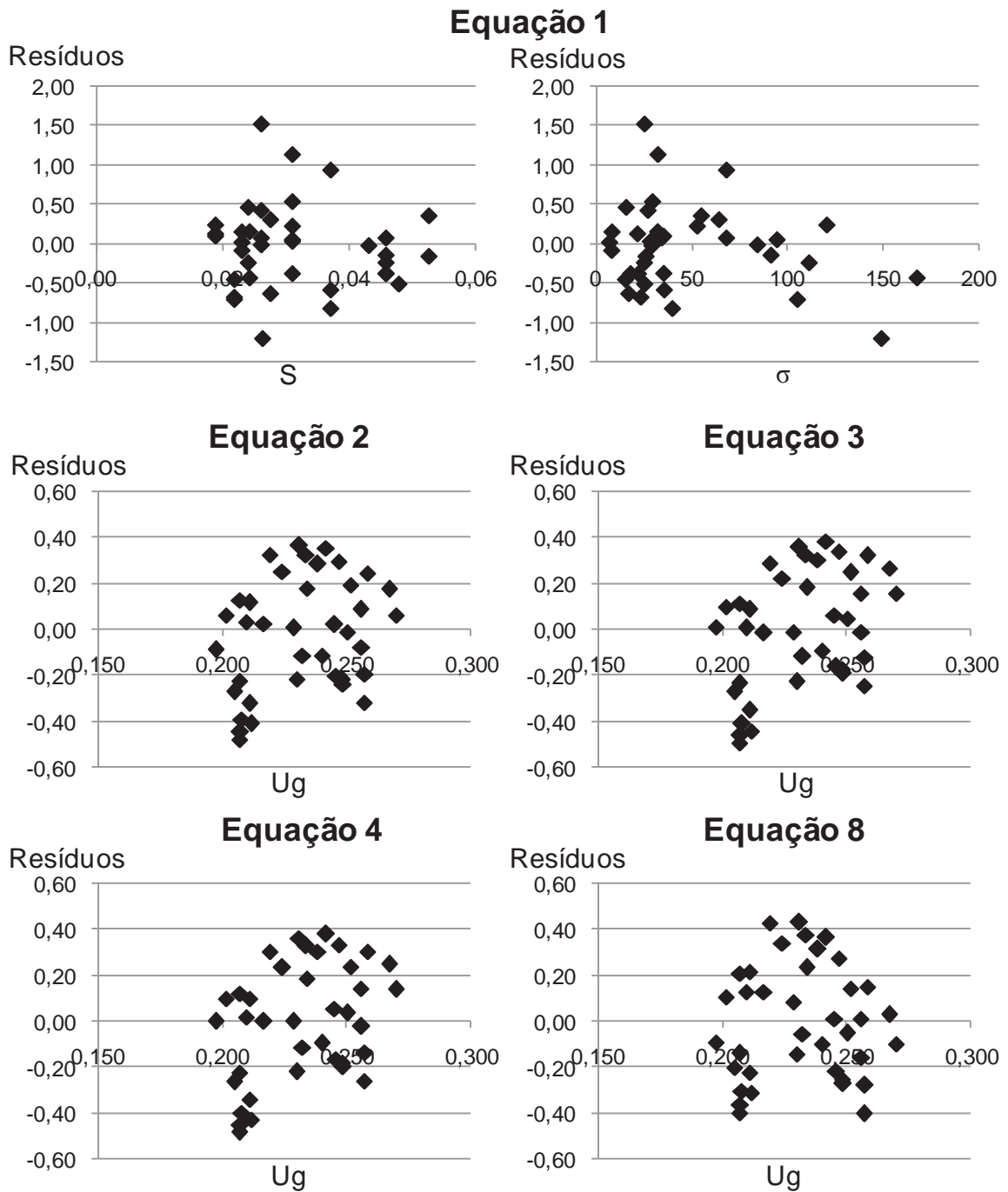


Figura 16A. Resíduos das Equações 1, 2, 3, 4 e 8 ajustadas aos dados do penetrômetro eletrônico obtidos no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 2, de textura argilosa, em função das variáveis independentes: índice S (S), estresse efetivo (σ) e conteúdo de água no solo (U_g)

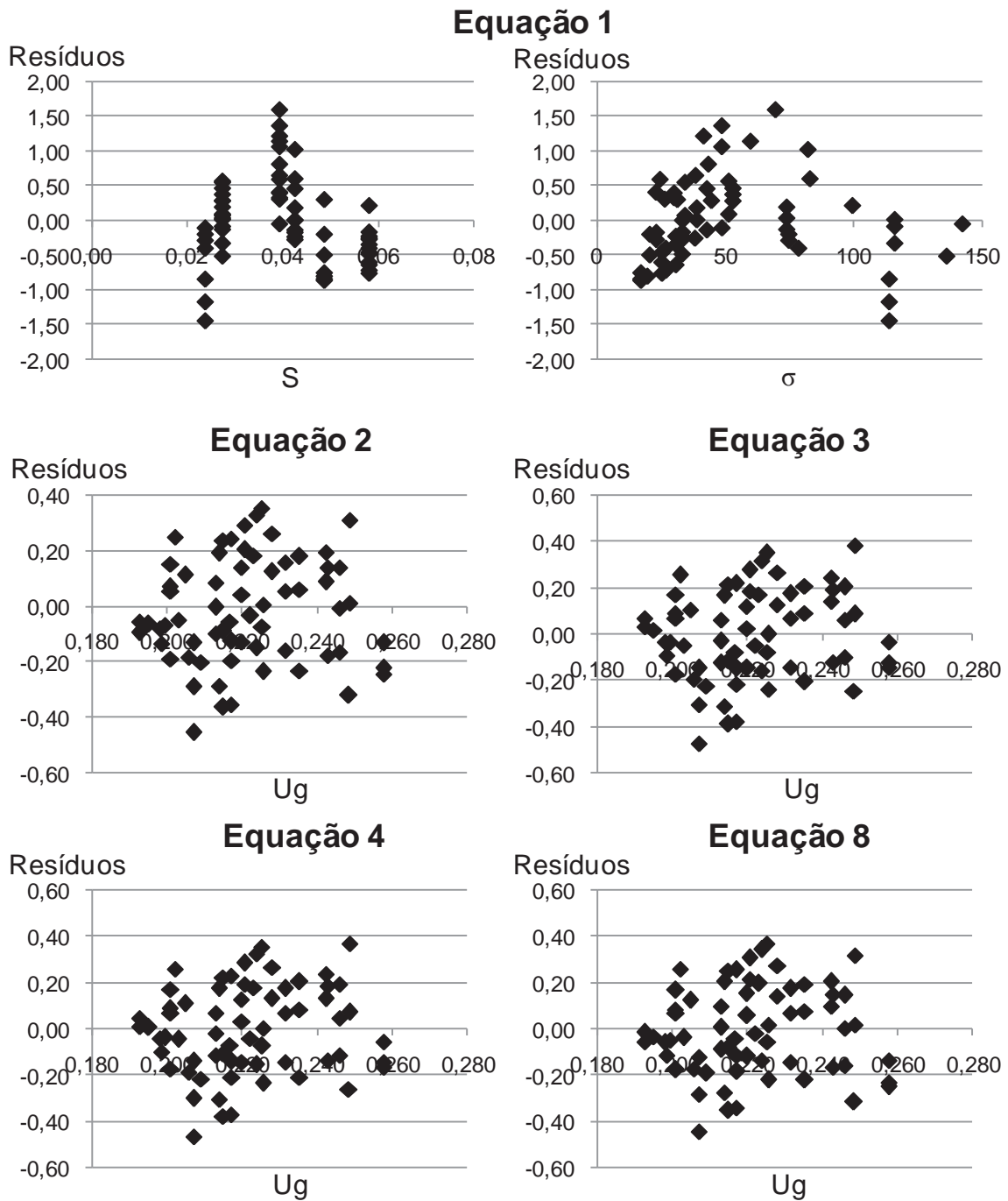


Figura 17A. Resíduos das Equações 1, 2, 3, 4 e 8 ajustadas aos dados do penetrômetro de impacto obtidos no Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 2, de textura argilosa, em função das variáveis independentes: índice S (S), estresse efetivo (σ) e conteúdo de água no solo (U_g).

Apêndice B

Tabela 32B. Resultados dos testes de normalidade e homocedasticidade da variância dos erros do ajuste das Equações 1, 2, 3, 4 e 8 aos dados do Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1 (LVd1), de textura média, e na área experimental 2 (LVd2), de textura argilosa

Teste	Áreas			
	LVd1		LVd2	
	K-S	Levene	K-S	Levene
		<i>Equação 1</i>		
Valor do teste	0,0593	0,8334	0,0542	1,1901
Valor-p	> 0,15	0,69	> 0,15	0,27
		<i>Equação 2</i>		
Valor do teste	0,062	1,1122	0,0843	1,0305
Valor-p	> 0,15	0,35	0,05 <= p <= 0,1	0,43
		<i>Equação 3</i>		
Valor do teste	0,0631	0,8202	0,0583	1,0125
Valor-p	> 0,15	0,70	> 0,15	0,45
		<i>Equação 4</i>		
Valor do teste	0,0544	0,8499	0,0665	1,0194
Valor-p	> 0,15	0,67	> 0,15	0,45
		<i>Equação 8</i>		
Valor do teste	0,064	1,0403	0,0773	1,1484
Valor-p	> 0,15	0,43	0,1 <= p <= 0,15	0,32

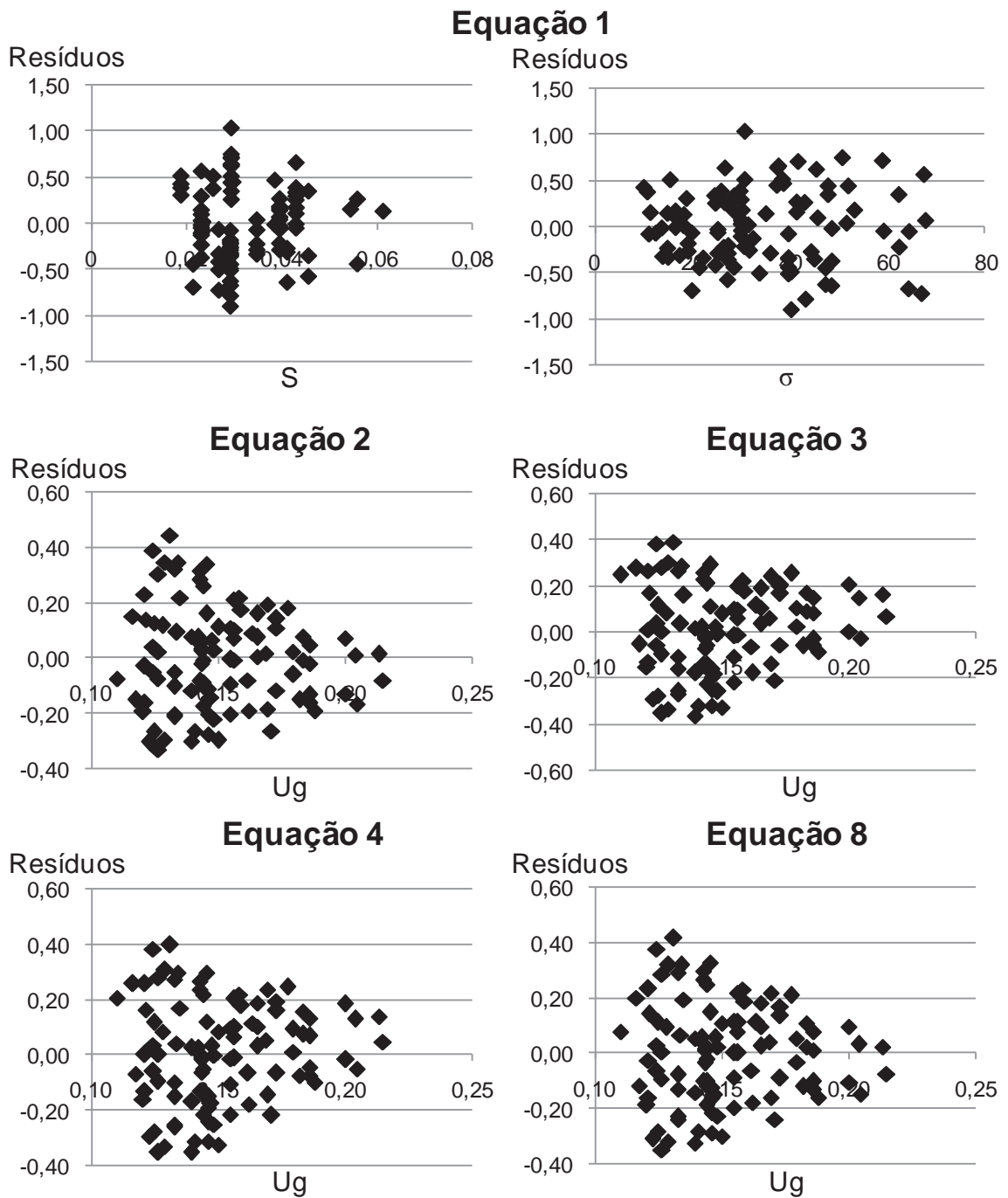


Figura 18B. Resíduos das Equações 1, 2, 3, 4 e 8 ajustadas aos dados do Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 1, de textura média, em função das variáveis independentes: índice S (S), estresse efetivo (σ) e conteúdo de água no solo (U_g).

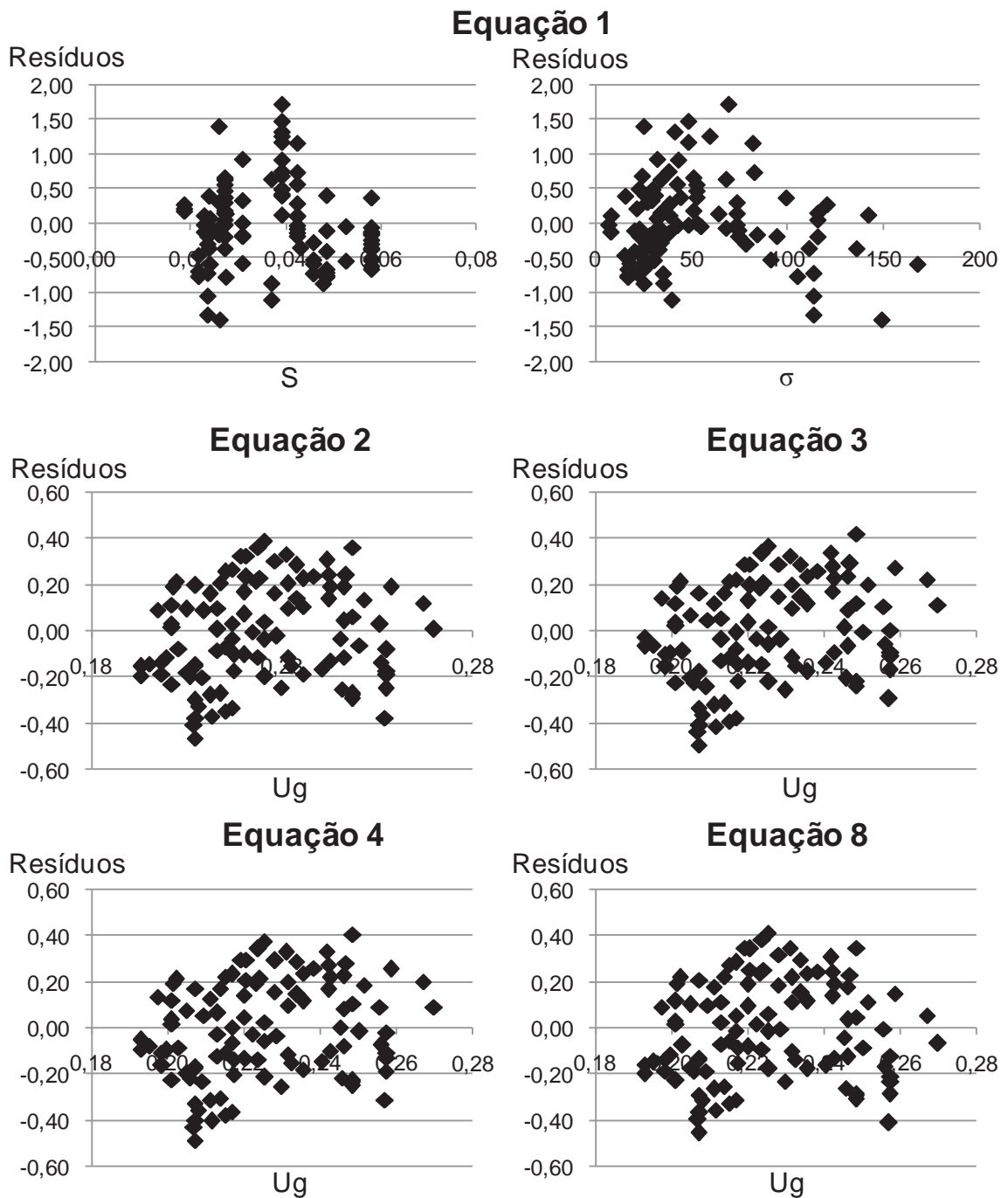


Figura 19B. Resíduos das Equações 1, 2, 3, 4 e 8 ajustadas aos dados do Latossolo Vermelho distrófico típico, na área experimental 2, de textura argilosa, em função das variáveis independentes: índice S (S), estresse efetivo (σ) e conteúdo de água no solo (U_g).