

Sistemas de preparo do solo: trinta anos de pesquisas na Embrapa Soja



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Soja
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

Documentos 342

Sistemas de preparo do solo: trinta anos de pesquisas na Embrapa Soja

Henrique Debiasi

Julio Cezar Franchini

Osmar Conte

Alvadi Antonio Balbinot Junior

Eleno Torres

Odilon Ferreira Saraiva

Maria Cristina Neves de Oliveira

Autores

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Soja

Rodovia Carlos João Strass, acesso Orlando Amaral, Distrito de Warta
Caixa Postal 231, CEP 86001-970, Londrina, PR

Fone: (43) 3371 6000

Fax: (43) 3371 6100

www.cnpso.embrapa.br

cnpso.sac@embrapa.br

Comitê de Publicações da Embrapa Soja

Presidente: *Ricardo Vilela Abdelnoor*

Secretário-Executivo: *Regina Maria Villas Bôas de Campos Leite*

Membros: *Adeney de Freitas Bueno, Adônis Moreira, Alvadi Antonio Balbinot Junior, Claudio Guilherme Portela de Carvalho, Decio Luiz Gazzoni, Francismar Correa Marcelino-Guimarães, Fernando Augusto Henning e Norman Neumaier.*

Supervisão editorial: *Vanessa Fuzinatto Dall'Agnol*

Normalização bibliográfica: *Ademir Benedito Alves de Lima*

Editoração eletrônica: *Marisa Yuri Horikawa*

Capa: *Marisa Yuri Horikawa*

Foto: *Adair V. Carneiro*

1ª edição

On line (2013)

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Soja

Sistemas de preparo do solo: trinta anos de pesquisas na Embrapa Soja /
Henrique Debiasi ... [et al.] – Londrina: Embrapa Soja, 2013.

72 p. : il. – (Documentos / Embrapa Soja, ISSN 2176-2937; n. 342)

1. Manejo do solo. I. Debiasi, Henrique. II. Franchini, Julio Cesar. III. Conte, Osmar.
IV. Balbinot Junior, Alvadi Antonio. V. Torres, Eleno. VI. Saraiva, Odilon Ferreira. VII.
Oliveira, Maria Cristina Neves de. VIII. Título. IX. Série.

631.4 (21.ed.)

© Embrapa 2013

Autores

Henrique Debiasi

Engenheiro Agrônomo, Dr.
Manejo do solo e da cultura
Embrapa Soja
Londrina – PR
henrique.debiasi@embrapa.br

Julio Cezar Franchini

Engenheiro Agrônomo, Dr.
Manejo do solo e da cultura
Embrapa Soja
Londrina – PR
julio.franchini@embrapa.br

Osmar Conte

Engenheiro Agrônomo, Dr.
Transferência de Tecnologias
Embrapa Soja
Londrina – PR
osmar.conte@embrapa.br

Alvadi Antonio Balbinot Junior

Engenheiro Agrônomo, Dr.
Manejo do solo e da cultura
Embrapa Soja
Londrina – PR
alvadi.balbinot@embrapa.br

Eleno Torres

Engenheiro Agrônomo, Msc.
Pesquisador aposentado da Embrapa Soja
Londrina – PR
elenotorres@sercomtel.com.br

Odilon Ferreira Saraiva

Engenheiro Agrônomo, Dr.
Pesquisador aposentado da Embrapa Soja
Londrina – PR

Maria Cristina Neves de Oliveira

Licenciada em Matemática, Dr.
Biometria
Embrapa Soja
Londrina – PR
mcristina.oliveira@embrapa.br

Apresentação

Atualmente, o principal desafio da agricultura é a produção de alimentos, energia, fibras e outros bens para a humanidade com menor impacto ambiental, associado ao reduzido consumo de insumos que apresentam reservas finitas no planeta, como fósforo, potássio e petróleo. Adicionalmente, é necessário que a agricultura seja um vetor de desenvolvimento social. Nesse contexto, é fundamental a geração e o uso de tecnologias que permitam que a agricultura seja sustentável no longo prazo.

Os sistemas de preparo do solo podem afetar os seus atributos químicos, físicos e biológicos e, conseqüentemente, a viabilidade dos sistemas de produção. Nas últimas décadas, o sistema plantio direto (SPD) tem sido fundamental para a conciliação de aspectos econômicos, ambientais e sociais, por isso tem contribuído significativamente para a sustentabilidade da agricultura brasileira. O SPD tem proporcionado maior conservação do solo e da água, manutenção da biodiversidade do solo, menor gasto com combustíveis, aumento da produtividade, e facilitado os processos de semeadura, tratamentos culturais e colheita, tornando o trabalho rural menos árduo.

A presente publicação visa apresentar de forma objetiva e sistematizada os principais resultados referentes às alterações na qualidade do solo, base da produção vegetal, e na produtividade das culturas de soja e trigo, em função de diferentes sistemas de preparo do solo, ao longo de três décadas de pesquisa. Nesse contexto, espera-se que essa obra subsidie as decisões sobre as práticas de preparo do solo por parte de técnicos e agricultores.

Ricardo Vilela Abdelnoor

Chefe-Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento
Embrapa Soja

Sumário

1. Introdução	11
2. Protocolo experimental	16
2.1. Histórico e caracterização da área experimental.....	16
2.2. Delineamento experimental, tratamentos e condução das culturas	17
2.3. Avaliações.....	21
2.3.1. Atributos químicos de solo	21
2.3.2. Atributos físicos de solo.....	21
2.3.3. Produtividade de grãos.....	24
2.4. Métodos estatísticos.....	25
3. Resultados	25
3.1. Impactos dos sistemas de preparo sobre o solo	25
3.1.1. Atributos químicos	25
3.1.2. Atributos físicos.....	33
3.2. Impactos dos sistemas de preparo sobre a produtividade de grãos de soja e trigo.....	52
4. Considerações finais	63
5. Agradecimentos	64
6. Referências	65

Sistemas de preparo do solo: trinta anos de pesquisas na Embrapa Soja

Henrique Debiasi

Julio Cezar Franchini

Osmar Conte

Alvadi Antonio Balbinot Junior

Eleno Torres

Odilon Ferreira Saraiva

Maria Cristina Neves de Oliveira

1. Introdução

A soja é a principal cultura produzida no Brasil, ocupando o primeiro lugar na produção de grãos. Segundo a Conab (2013), a produção brasileira de soja na safra 2012/2013 foi estimada em 81,5 milhões de toneladas, em uma área cultivada pouco superior a 27,5 milhões de hectares, o que torna o país o segundo maior produtor mundial desta oleaginosa. Dados históricos evidenciam grandes avanços na produtividade da cultura desde o início das primeiras explorações em escala comercial no Rio Grande do Sul, passando de uma média de aproximadamente 1.500 kg ha⁻¹ no final da década de 70, para cerca de 3.000 kg ha⁻¹ na safra 2012/2013 (Conab, 2013). Grande parte dos ganhos pode ser atribuída à melhoria genética, por meio da obtenção de cultivares adaptadas às condições edafoclimáticas das diferentes regiões brasileiras, bem como ao desenvolvimento de novas tecnologias para o manejo da cultura. Além disso, não há como desvincular esse salto de produtividade dos avanços científicos e tecnológicos no que se refere ao manejo e conservação do solo.

Durante as décadas de 70 e 80, o manejo inadequado do solo se constituía em um dos principais problemas relacionados à produção de soja no Brasil, especialmente na Região Sul. Naquela época, a produção de soja no Brasil era baseada exclusivamente na utilização de sistemas de

preparo do solo desenvolvidos para regiões de clima temperado. Esses sistemas envolviam o revolvimento intensivo e profundo do solo, por meio do emprego de arados e grades, o que, sob as condições climáticas das regiões temperadas, tinha como principal argumento favorável a exposição do solo aos raios solares durante a primavera visando o seu degelo e aquecimento, requisito importante para o desenvolvimento das culturas de verão. Em regiões temperadas, os principais problemas associados ao revolvimento excessivo do solo – perda de água e solo por erosão e degradação da matéria orgânica do solo (MOS) – são minimizados em decorrência da baixa intensidade das chuvas e das temperaturas amenas.

Contudo, quando sistemas de manejo caracterizados pelo preparo intensivo do solo (conhecidos atualmente como sistemas de preparo convencional - SPC) são utilizados de modo indiscriminado em regiões de clima subtropical e tropical, como é o caso do Brasil, os reflexos sobre a produção agrícola e sobre o ambiente são desastrosos. Nos anos 70 e 80, a falta de cobertura e a desagregação excessiva do solo, provocadas pelo preparo intensivo, resultaram no aumento da intensidade dos processos erosivos. No Paraná, por exemplo, a perda média de solo por erosão em áreas terraceadas e manejadas sob SPC (aração + duas gradagens) era estimada em quase $20 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Mondardo & Biscaia, 1981).

Além de representar uma grande ameaça à manutenção da produtividade da soja e de outras culturas, a erosão hídrica resulta em impactos negativos sobre o ambiente, particularmente sobre as fontes superficiais de água. O solo erodido de áreas de lavoura acumula-se nos mananciais superficiais de água, assoreando-os. A água e o solo perdido por erosão carregam consigo nutrientes e moléculas de agroquímicos que, além de resultar em prejuízos financeiros ao produtor, constituem-se em importantes poluentes da água. Em trabalho conduzido sobre um Latossolo Vermelho distroférrico com $0,03 \text{ m m}^{-1}$ de declividade durante sete anos, Hernani et al. (1999) encontraram que, no SPC (aração + duas gradagens), as perdas médias anuais de P, K, Ca e Mg foram de $0,84 \text{ kg ha}^{-1}$, $7,80 \text{ kg ha}^{-1}$, $19,20 \text{ kg ha}^{-1}$ e $1,70 \text{ kg ha}^{-1}$, res-

pectivamente. Na soma dos sete anos, as perdas de P e K equivaleram a cerca de 70 kg ha⁻¹ de superfosfato simples e 105 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio, respectivamente.

Outro efeito negativo associado à mobilização excessiva do solo no SPC é o aumento da taxa de decomposição dos resíduos vegetais (Gonçalves et al., 2010) e de mineralização da MOS (Franchini et al., 2007). A redução do teor de MOS, por sua vez, é um dos principais fatores que comprometem a qualidade do solo (Mielniczuk, 1999), aqui entendida como sendo a capacidade que o mesmo apresenta em funcionar dentro dos limites de ecossistemas naturais ou manejados, de forma a sustentar a produtividade biológica, manter ou melhorar a qualidade do ar e da água e promover a saúde das plantas e dos animais (Doran & Parkin, 1994). Além disso, a mineralização da MOS implica na perda de carbono do solo para a atmosfera, na forma de CO₂, um dos gases responsáveis pelo aquecimento global.

Diante desse cenário, a manutenção do potencial produtivo do solo passava, necessariamente, pela adoção de sistemas de manejo adaptados às condições de clima tropical e subtropical do Brasil, focados na redução da intensidade de revolvimento e na manutenção da cobertura do solo. Foi assim que uma tecnologia baseada na implantação das culturas sem preparo prévio do solo, sobre os restos culturais da lavoura anterior, denominada inicialmente de plantio direto (PD), começou a ser utilizada no Brasil. Os primeiros estudos sobre o PD foram realizados na Estação Experimental de Rothamsted, na Inglaterra, na década de 40, quando se constatou que o preparo do solo era dispensável, desde que não houvesse competição de plantas daninhas. Em condição experimental, a primeira tentativa de implantar uma cultura sem preparo do solo no Brasil, mobilizando apenas a linha de semeadura, ocorreu no município de Matão/SP, no ano de 1966 (Landers, 2005). No entanto, conforme o mesmo autor, somente em 1972 o PD passou a ser utilizado em escala comercial, na Fazenda Renânia, de propriedade de Herbert Bartz, em Rolândia/PR, município localizado a cerca de 20 km de Londrina. Nessa época, quase 500 mil hectares já eram conduzidos em plantio direto nos Estados Unidos.

É importante destacar que, até o início da década de 80, o plantio direto era entendido como simples método alternativo de preparo do solo, altamente eficiente no controle da erosão hídrica (Denardin et al., 2005a). Conforme os mesmos autores, a partir daquela época, as experiências práticas e conhecimento científico acumulado conduziram à percepção de que o plantio direto, para ser técnica, econômica e ambientalmente viável, deveria ser tratado com um sistema de produção agrícola, composto por um complexo de processos inter-relacionados, complementares e interdependentes. Assim, o PD passou a ser enfocado, tanto em escala de pesquisa quanto de lavoura, como sistema plantio direto (SPD), fundamentado na diversificação de espécies vegetais, na cobertura permanente do solo e na mínima mobilização do solo, restrita apenas à linha de semeadura.

Desde as primeiras experiências, o SPD mostrou-se uma tecnologia altamente eficiente no controle da erosão hídrica. Biscaia (1977), em trabalho realizado sobre um Latossolo Vermelho argiloso, em Ponta Grossa/PR, constatou que o SPD reduziu em 78% as perdas de solo por erosão hídrica em relação ao SPC com aração + duas gradagens. Já Hernani et al. (1999), em experimento conduzido sobre Latossolo durante sete anos, encontraram que o SPD reduziu as perdas médias anuais de solo e água em 92% e 87%, respectivamente, em relação ao SPC com aração + duas gradagens. A redução da intensidade dos processos erosivos pelo SPD é fundamentada em dois princípios (Denardin et al., 2005b): 1) Dissipação da energia cinética decorrente do impacto da gota de chuva sobre o solo, agente causador da erosão em entressulcos ou salpicamento; e 2) Redução do volume e intensidade da enxurrada, agente responsável pela erosão em sulcos. Além disso, a ausência de revolvimento resulta na consolidação da superfície do solo, o que reduz as perdas de solo por erosão em razão do aumento da resistência deste à desagregação pela enxurrada (Volk et al., 2004). No entanto, Kochmann et al. (2005) ressaltam que a cobertura do solo por plantas vivas ou por resíduos culturais tem potencial para reduzir em até 100% a erosão em entressulcos, mas não manifesta essa mesma eficácia para controlar a erosão em sulcos, de modo que práticas mecâ-

nicas de controle da enxurrada, como o terraceamento e o cultivo em nível, sempre foram imprescindíveis, mesmo no SPD.

Muitas eram as dificuldades enfrentadas pelos produtores brasileiros que se “aventuravam” a adotar o SPD como alternativa para controlar o acelerado processo de depauperamento do solo ocasionado, principalmente, pela erosão hídrica. Os principais problemas enfrentados pelos pioneiros estavam relacionados à baixa eficiência e custo elevado das semeadoras adaptadas à semeadura direta e, também, à dificuldade de controle de plantas daninhas, devido à oferta restrita de herbicidas e à baixa eficiência dos mesmos no SPD. Havia também preocupações relacionadas à compactação do solo, à correção da acidez do solo em uma condição onde não se podia mais revolver o solo, e ao comportamento da produtividade das culturas no novo sistema.

Com o objetivo de contribuir para a solução dos problemas e dificuldades enfrentadas pelos produtores e, assim, consolidar o SPD como ferramenta para o manejo sustentável da cultura da soja, foi implantado, no ano de 1981, um experimento de longa duração na Fazenda Experimental da Embrapa Soja, em Londrina/PR, o qual continua sendo conduzido até os dias atuais. O estudo tem como objetivo comparar o SPD com o SPC realizado com arado de discos ou grade aradora, bem como com o preparo reduzido por meio da utilização de escarificadores, levando-se em consideração os impactos desses sistemas sobre a produtividade das culturas e a qualidade do solo.

Durante os trinta anos de condução deste experimento, a produtividade da soja e do trigo foi determinada anualmente. Concomitantemente, atributos químicos e físicos do solo foram periodicamente monitorados. Nesse contexto, o objetivo dessa publicação é **disponibilizar os resultados** obtidos durante os trinta anos de condução experimental de uma forma agrupada e organizada, proporcionando o entendimento de como a produtividade das culturas e a qualidade do solo no SPD evoluem ao longo do tempo, em comparação a outros sistemas de preparo do solo.

2. Protocolo experimental

2.1. Histórico e caracterização da área experimental

O experimento vem sendo conduzido desde a safra 1981/1982 na Fazenda Experimental da Embrapa Soja, em Londrina/PR (23° 12' S, 51° 11' W, e 585 m de altitude), em um Latossolo Vermelho distroférico. O clima da região é subtropical úmido (Cfa, conforme a classificação de Köppen), com temperaturas médias máximas e mínimas de 28,5°C em fevereiro e 13,3°C em julho, respectivamente, e precipitação média anual de 1.651 mm, sendo, na média histórica, janeiro o mês mais úmido (217 mm) e agosto o mais seco (60 mm). Antes do início do ensaio, a área experimental foi ocupada por uma plantação de café por aproximadamente quarenta anos até 1973, quando então passou a ser explorada com culturas anuais de grãos (soja no verão e trigo no inverno), em preparo convencional de solo (arações e gradagens), uso este que permaneceu até a implantação do experimento (1981/1982). Alguns atributos químicos e físicos do solo da área experimental, determinados antes da aplicação dos tratamentos, são apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 1. Valores de pH do solo em água e teores médios de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) trocáveis, alumínio (Al), fósforo disponível (P) e carbono orgânico (C), obtidos da camada de 0-20 cm de um Latossolo Vermelho distroférico, antes da implantação do experimento. Embrapa Soja, Londrina/PR, 1980.

pH H ₂ O	Ca	Mg	K	Al	P	C
	----- cmol _c dm ⁻³ -----				-- mg dm ⁻³ --	-- g kg ⁻¹ --
5,8	6,51	2,02	0,42	0,00	21,3	12,5

Tabela 2. Valores médios de densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macroporosidade (MA), microporosidade (MI) e capacidade de armazenamento de água disponível (CAD), obtidos em diferentes camadas de um Latossolo Vermelho distroférico, antes da implantação do experimento. Embrapa Soja, Londrina/PR, 1980.

Camada	Ds	Pt	MA	MI	CAD
----- cm -----	--- Mg m ⁻³ ---	----- m ³ m ⁻³ -----			
0-14	1,09	0,62	0,22	0,40	0,12
14-25	1,13	0,62	0,19	0,43	0,11
25-40	1,08	0,62	0,19	0,43	0,11
40-60	1,04	0,64	0,21	0,43	0,11

Tabela 3. Teores médios de argila, silte e areia, obtidos em diferentes camadas de um Latossolo Vermelho distroférico, antes da implantação do experimento. Embrapa Soja, Londrina/PR, 1980.

Camada	Argila	Silte	Areia
----- cm -----	----- g kg ⁻¹ -----		
0-10	776	164	60
10-20	788	154	58
20-30	809	142	49
30-40	830	118	52
40-60	837	121	42
60-80	846	98	56
80-100	825	113	62

2.2. Delineamento experimental, tratamentos e condução das culturas

O delineamento experimental é em blocos completamente casualizados, com quatro repetições. As parcelas medem 8 x 50 m, totalizando uma área de 400 m². Desde a implantação, o experimento vem sendo cultivado com a sucessão trigo no inverno e soja no verão. Os tratamentos envolvem quatro sistemas de preparo do solo, realizados anualmente

antes da implantação da soja: 1) SPD - sistema plantio direto; 2) AD - sistema preparo convencional com uma aração (arado de discos de 26 polegadas, trabalhando a uma profundidade média de 22 cm) + duas gradagens leves; 3) GP - sistema preparo convencional com uma gradagem pesada (grade pesada equipada com discos de 24 polegadas, atuando a uma profundidade média de 12 cm) + uma gradagem leve; e 4) ESC – sistema preparo reduzido com uma escarificação (escarificador de cinco hastes, espaçadas de 35 cm, trabalhando a uma profundidade média de 22 cm) + uma gradagem leve. A Figura 1 mostra o aspecto da superfície do solo após a realização da escarificação (a), da aração com arado de discos (b) e da gradagem pesada (c), em comparação ao SPD (d). No inverno, antes da semeadura do trigo, todos os tratamentos, à exceção do SPD, são preparados com uma gradagem pesada seguida de uma gradagem leve.

A calagem vem sendo realizada a cada quatro anos, com a aplicação, em média, de 2 t ha⁻¹ de calcário dolomítico em todos os tratamentos, visando alcançar 60% de saturação de bases e aumentar o pH em água para aproximadamente 5,5. No SPD, o calcário é aplicado em superfície, enquanto que, nos demais tratamentos, o corretivo é incorporado pelo implemento que caracteriza o respectivo sistema de preparo. As datas de semeadura e colheita, assim como a adubação e as cultivares utilizadas, são apresentadas na Tabela 4 (trigo) e na Tabela 5 (soja). Na semeadura do trigo, vem sendo utilizada uma semeadora-adubadora tratorizada, equipada com sulcadores para adubo e semente do tipo disco duplo desencontrado, com linhas espaçadas por 17 cm. A semeadura da soja foi realizada por meio de uma semeadora-adubadora tratorizada, equipada com hastes sulcadoras (até 1999/2000) ou sistema guilhotina (da safra 2000/2001 em diante), e sulcadores para semente do tipo disco duplo desencontrado, com espaçamento de 45 cm entrelinhas. A implantação e o manejo das culturas, assim como os tratamentos fitossanitários e demais tratamentos culturais, sempre foram realizados de acordo com as indicações técnicas para a soja e o trigo no Estado do Paraná, vigentes em cada safra avaliada. No caso do SPD, em todas as safras, as parcelas foram dessecadas após a colheita do trigo e da soja, mediante a aplicação de herbicidas não seletivos.

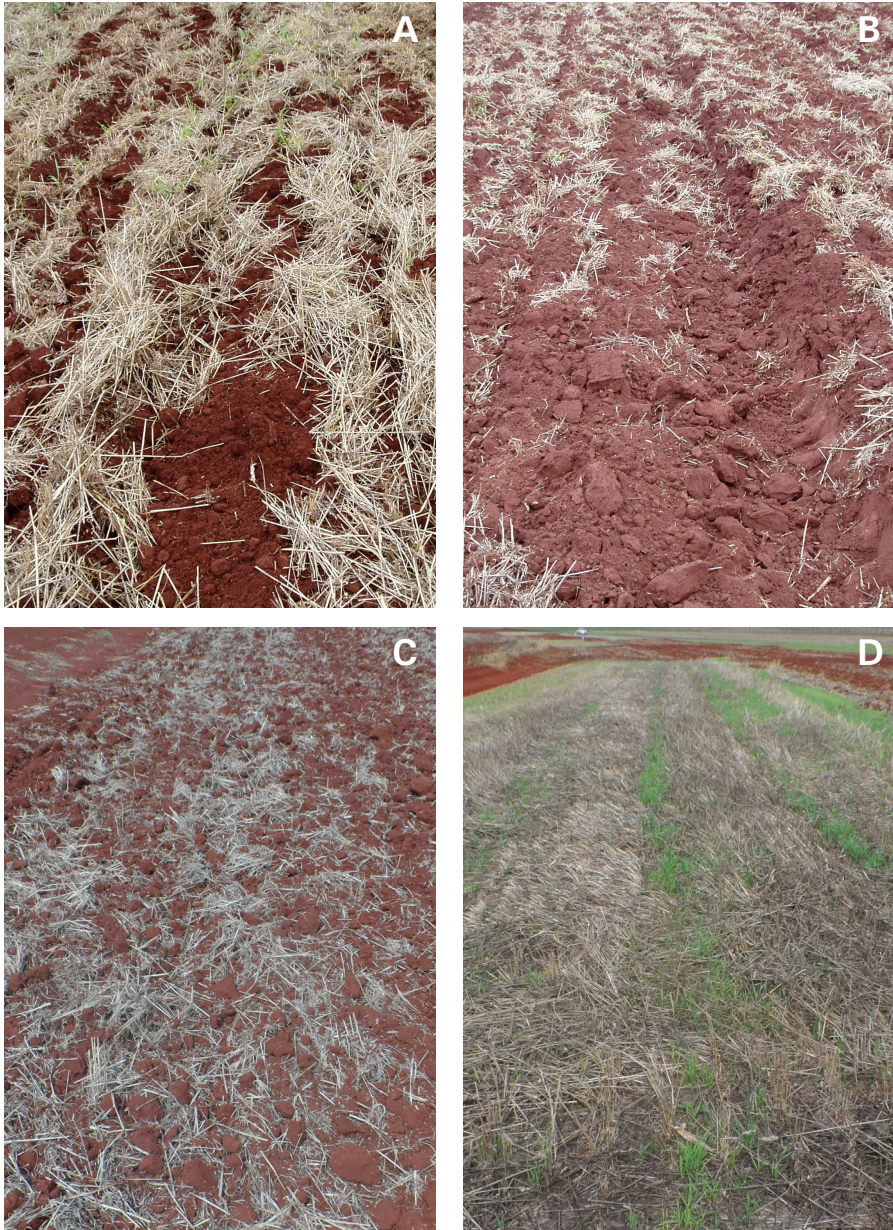


Figura 1. Aspecto visual da superfície do solo após o preparo do solo por meio de escarificação (a), aração com arado de discos (b) e gradagem pesada (c), em comparação ao SPD (d), em outubro de 2005.

Tabela 4. Datas de semeadura e colheita, cultivares utilizadas e quantidade de macronutrientes aplicados via adubação de base na cultura do trigo, nas diferentes safras avaliadas. Embrapa Soja, Londrina/PR, 2013.

Safr ⁽¹⁾	Cultivar	Data de semeadura	Data de colheita	Adubação ⁽²⁾		
				N	P ₂ O ₅	K ₂ O
----- Kg ha ⁻¹ -----						
1989	(3)	16/05/1989	14/09/1989	12,8	48,0	24,0
1990	(3)	14/05/1990	12/09/1990	12,8	48,0	24,0
1991	(3)	24/04/1991	27/08/1991	12,8	48,0	24,0
1992	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)
1993	BR 23	22/04/1993	02/09/1993	12,8	48,0	24,0
1994	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)	(4)
1995	BR 18	23/04/1995	22/08/1995	12,8	48,0	24,0
1996	Ocepar 16	17/05/1996	20/09/1996	12,8	48,0	24,0
1997	BR 18	20/05/1997	18/09/1997	12,8	44,8	25,6
1998	BR 18	08/05/1998	17/09/1998	14,4	50,4	28,8
1999	BR 18	12/05/1999	08/09/1999	16,0	56,0	32,0
2000	BR 18	23/05/2000	29/09/2000	12,8	44,8	25,6
2001	BRS 193	05/05/2001	03/09/2001	16,0	56,0	32,0
2002	BRS 193	23/05/2002	25/09/2002	20,0	70,0	40,0
2003	BRS 208	30/04/2003	15/09/2003	16,0	56,0	32,0
2004	BRS 208	11/05/2004	15/09/2004	20,0	70,0	40,0
2005	BRS 208	13/05/2005	08/09/2005	16,0	56,0	32,0
2006	BRS 239	13/05/2006	22/09/2006	14,4	50,4	28,8
2007	BRS 208	21/04/2007	25/08/2007	16,0	56,0	32,0
2008	BRS 208	06/05/2008	08/09/2008	0,0	40,0	40,0
2009	BRS 208	05/05/2009	26/09/2009	20,0	60,0	37,5
2010	BRS 208	06/05/2010	02/09/2010	13,5	67,5	40,5

⁽¹⁾ As informações referentes às safras de 1982 a 1988 não foram recuperadas. ⁽²⁾ Não foi aplicado fertilizante nitrogenado em cobertura em nenhuma das safras avaliadas. ⁽³⁾ Sem informação. ⁽⁴⁾ Perda total de produção devido à ocorrência de seca.

Tabela 5. Datas de semeadura e colheita, cultivares utilizadas e quantidade de macronutrientes aplicados via adubação de base na cultura da soja, nas diferentes safras avaliadas. Embrapa Soja, Londrina/PR, 2013.

Safr ⁽¹⁾	Cultivar	Data de semeadura	Data de colheita	Adubação ^(2,3)	
				P ₂ O ₅	K ₂ O
-----Kg ha ⁻¹ -----					
1987/1988	Paraná	25/11/1987	17/03/1988	48,0	24,0
1988/1989	Paraná	23/11/1988	16/03/1989	48,0	24,0
1989/1990	Paraná	25/11/1989	20/03/1990	48,0	24,0
1990/1991	Paraná	27/11/1990	18/03/1991	48,0	24,0
1991/1992	Paraná	29/11/1991	19/03/1992	48,0	24,0
1992/1993	Paraná	27/11/1992	17/03/1993	48,0	24,0
1993/1994	Paraná	24/11/1993	22/03/1994	48,0	24,0
1994/1995	BR 37	14/11/1994	21/03/1995	48,0	24,0
1995/1996	BR 37	12/11/1995	18/03/1996	48,0	24,0
1996/1997	BR 37	04/11/1996	17/03/1997	0,0	0,0
1997/1998	Embrapa 48	14/11/1997	26/03/1998	48,0	24,0
1998/1999	BR 37	11/11/1998	25/03/1999	0,0	0,0
1999/2000	Embrapa 48	07/11/1999	25/03/2000	34,0	34,0
2000/2001	BRS 133	14/11/2000	25/03/2001	0,0	0,0
2001/2002	BRS 133	09/11/2001	26/03/2002	60,0	60,0
2002/2003	BRS 156	12/11/2002	22/03/2003	40,0	40,0
2003/2004	BRS 156	14/11/2003	31/03/2004	56,0	40,0
2004/2005	BRS 184	14/11/2004	24/03/2005	40,0	40,0
2005/2006	BRS 232	20/11/2005	31/03/2006	50,0	50,0
2006/2007	BRS 232	27/11/2006	29/03/2007	40,0	40,0
2007/2008	BRS 232	06/11/2007	22/03/2008	50,0	50,0
2008/2009	BRS 184	25/10/2008	16/03/2009	50,0	50,0
2009/2010	BRS 255RR	29/10/2009	08/03/2010	50,0	50,0
2010/2011	BRS 295RR	27/10/2010	15/03/2011	52,0	52,0

⁽¹⁾ As informações referentes às safras 1981/1982 a 1986/1987 não foram recuperadas. ⁽²⁾ Não foi aplicado fertilizante nitrogenado em nenhuma das safras avaliadas, sendo as sementes de soja sempre inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* e *B. elkanii*. ⁽³⁾ Desde a safra 1998/1999, vem sendo aplicado nas sementes de soja 20 g ha⁻¹ de molibdênio na forma da molibdato de sódio e 2 g ha⁻¹ de cobalto (cloreto de cobalto).

2.3. Avaliações

2.3.1. Atributos químicos de solo

Amostras de solo para análises químicas foram coletadas nas camadas de 0-8 cm, 8-16 cm e 16-24 cm em 1991, 1994 e 2004. As amostragens foram realizadas em todos os tratamentos, após a colheita da soja e antes das operações de preparo do solo que antecedem a semeadura do trigo. Foram determinadas as seguintes variáveis: pH em CaCl_2 , fósforo (P) e potássio (K) disponíveis (Mehlich 1), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e Al (alumínio) trocáveis, saturação por bases (V) e carbono orgânico (C), de acordo com os métodos descritos em Embrapa (1979) e Embrapa (1997).

Em julho de 2010, durante o ciclo do trigo, foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0-8 cm, 8-16 cm e 16-24 cm dos tratamentos SPD e AD para quantificação do teor de C orgânico do solo, pelo método da combustão via seca, utilizando o analisador elementar de C do solo. Esses dados, em conjunto com os valores de densidade do solo determinados em amostras coletadas na mesma oportunidade (item 2.3.2), foram utilizados para o cálculo dos estoques de C orgânico do solo. A comparação dos estoques de C foi feita com base em uma mesma massa de solo, sendo a correção realizada por meio da metodologia proposta por Sisti et al. (2004).

2.3.2. Atributos físicos de solo

Amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas em anéis de aço (100 cm^3) inseridos horizontalmente no centro de cada camada avaliada, por meio de um macaco hidráulico, na parede de trincheiras abertas em cada parcela. Nos anos de 1986, 1991, 1994, 1998, 1999 e 2004, as amostragens foram realizadas após a colheita da soja e antes das operações de preparo do solo previstas para o inverno, em todos os tratamentos e em três camadas: 5,5-8,5 cm; 13,5-18,5 cm; e 21,5-26,5 cm. Em 2010, os anéis foram coletados durante o ciclo do trigo (julho/2010), somente nos tratamentos SPD e AD, nas camadas de: 5,5-8,5 cm; 13,5-18,5 cm; 21,5-26,5 cm; 32,5-37,5 cm; 47,5-52,5 cm; 67,5-72,5 cm; e 87,5-92,5 cm. Em laboratório, essas amos-

tras foram utilizadas para a quantificação da densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade, conforme metodologia descrita em Embrapa (1979) e Embrapa (1997).

A resistência mecânica do solo à penetração (RP) foi determinada até 60 cm de profundidade, nos anos de 1986, 1991, 1994 e 1999, sempre entre a colheita da soja e as operações de preparo do solo para o inverno, empregando-se o penetrômetro de impacto (modelo IAA/Plana-sucar-Stolf), conforme metodologia descrita por Stolf et al. (1983). As leituras, espaçadas 10 cm entre si, foram realizadas sobre um transecto disposto transversalmente às linhas de semeadura, medindo dois metros de comprimento. Junto a cada transecto, foram coletadas amostras deformadas de solo para determinação do conteúdo de água do solo nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-30 cm.

Para a avaliação da estabilidade de agregados em água, foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0-10 e 10-20 cm, também no período entre a colheita da soja e o preparo do solo antecedendo à cultura do trigo, nos anos de 1986, 1991, 1994, 1998 e 1999. A partir dessas amostras, foram obtidos agregados com diâmetro de 4,00-6,35 mm por meio de peneiramento. Após **pré-umedecimento lento dos agregados**, por capilaridade, a estabilidade de agregados foi quantificada em triplicata por meio do tamisamento a úmido, conforme o método de Yoder (1936). O diâmetro médio ponderado (DMP) foi calculado de acordo com a equação (1):

$$DMP = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot w_i) \quad (1)$$

Em que,

- w_i = proporção de cada classe em relação ao total;
- x_i = diâmetro médio das classes (mm).

2.3.3. Produtividade de grãos

A produtividade de grãos foi determinada por meio da colheita mecanizada de 50 m das 9 (soja) ou 28 (trigo) linhas centrais de cada parcela. Posteriormente, os grãos foram limpos e pesados, sendo os valores corrigidos para 13% de umidade.

A produtividade de grãos da soja foi relacionada à disponibilidade hídrica durante o estágio reprodutivo da cultura, expressa por meio do índice de satisfação das necessidades de água (ISNA). Para isso, foram considerados os valores de produtividade da soja obtidos a partir da safra 1994/1995, quando o SPD já se encontrava estabilizado e, ao mesmo tempo, a cultivar Paraná foi substituída por outra com maior potencial produtivo, a BR 37 (Tabela 5). O ISNA corresponde à relação entre a evapotranspiração real (ET_r) e a evapotranspiração máxima (ET_m) da cultura. Quando as necessidades de água para o cultivo estão sendo plenamente atendidas, o ISNA é igual a 1 (ET_r = ET_m). Por outro lado, quando ET_r < ET_m (0 < ISNA < 1), a demanda hídrica da cultura não está sendo completamente atendida e, abaixo de um determinado valor de ISNA, a produtividade pode ser limitada pela falta de água. Neste trabalho, o ISNA foi calculado para o período reprodutivo da cultura (estádios R1 a R6), que é considerado o mais crítico para a definição da produtividade da soja.

Os valores de ET_r e ET_m foram determinados para cada safra pelo modelo BIPZON de simulação do balanço hídrico da cultura (Forest, 1984). Esse modelo utiliza como variáveis de entrada dados climáticos (precipitação pluvial diária e evapotranspiração potencial decenal média), da cultura (coeficiente de cultura – K_c e duração das fases fenológicas) e de solo (capacidade de água disponível em função da profundidade do sistema radicular). Foram empregados os coeficientes de K_c ajustados por Farias et al. (2001). A capacidade de água disponível no solo utilizada foi de 75 mm (0,125 m³ m⁻³ de conteúdo de água disponível no solo e sistema radicular com profundidade efetiva de 60 cm).

2.4. Métodos estatísticos

Para a análise estatística dos dados de produtividade da soja e do trigo e dos atributos químicos e físicos do solo, foram utilizados os métodos exploratórios univariados para verificar as pressuposições da análise de variância (ANOVA), o teste de comparações múltiplas de médias por Tukey ($p \leq 0,05$) e a ANOVA para diferentes sistemas de preparo de solo, anos e profundidades, seguindo o delineamento em blocos completamente casualizados. No caso dos atributos físicos do solo, foi aplicada também a análise multivariada pelo método da árvore de regressão para os anos de condução experimental, sistemas de preparo e camadas. Além destes métodos, foi realizada a análise de regressão não linear para a evolução temporal da produtividade da soja no período de 30 anos para os sistemas SPD e AD, análise de regressão linear entre a produtividade de grãos da soja e o índice de satisfação das necessidades de água durante o período reprodutivo da cultura (ISNA R1-R6) em cada sistema de preparo do solo, bem como a regressão linear entre a produtividade de grãos de trigo e anos de condução experimental (24) nos sistemas SPD e AD.

3. Resultados

3.1. Impactos dos sistemas de preparo sobre o solo

3.1.1. Atributos químicos

Na sequência, são apresentados os resultados das análises químicas do solo, realizadas a partir das amostras obtidas nos anos de 1991, 1994 e 2004 (Tabelas 6 a 8), onde foram analisados os seguintes atributos: pH, P, K, Ca, Mg, Al e C, calculando-se a saturação por bases (V) no complexo de troca catiônico, para sucessivas camadas do solo nos diferentes tratamentos abordados.

De modo geral, as diferenças entre os tratamentos no que se refere ao pH do solo foram pequenas. Nas amostragens realizadas em 1991 (Tabela 6) e 1994 (Tabela 7), o pH do solo medido em CaCl_2 não apresentou diferença significativa entre os tratamentos em nenhuma

das camadas de solo avaliadas. Na avaliação de 2004 (Tabela 8), o pH do solo foi maior para o SPD na camada de 0-8 cm, o que pode ser atribuído principalmente à aplicação superficial de calcário. Por outro lado, em 2004, o pH do solo na camada de 8-16 cm foi maior no AD em relação ao SPD, sendo que ambos não diferiram dos tratamentos GP e ESC. Nessa mesma avaliação, os valores de pH no AD foram superiores aos demais sistemas de preparo na camada de 16-24 cm. Provavelmente, os valores mais elevados de pH no AD nas camadas de 8-16 cm e 16-24 cm estão associados à incorporação do calcário pelo arado. Os resultados mostram ainda que os valores de pH aumentaram ao longo do tempo, independentemente do sistema de preparo e da ca-

Tabela 6. Atributos químicos de um Latossolo Vermelho distroférrico submetido a diferentes sistemas de preparo do solo, em três profundidades, determinados em 1991. Embrapa Soja, Londrina/PR, 2013.

Sistema ⁽¹⁾	pH	P	K	Ca	Mg	Al ⁽²⁾	V	C
	CaCl ₂	mg dm ⁻³	-----	cmol _c dm ⁻³	-----	-- % --	- g kg ⁻¹ -	
----- 0-8 cm -----								
SPD	4,72 a	73,5 a	0,89 a	4,30 a	1,30 a	0,08 a	49 a	20,1 a
AD	4,82 a	23,7 b	0,60 a	4,15 a	1,24 a	0,05 a	52 a	16,2 b
GP	4,68 a	26,1 b	0,82 a	4,04 a	1,26 a	0,11 a	49 a	19,7 ab
ESC	4,70 a	23,9 b	0,67 a	3,98 a	1,22 a	0,09 a	50 a	19,8 ab
----- 8-16 cm -----								
SPD	4,54 a	13,0 a	0,70 a	3,72 a	0,95 a	0,18 a	44 a	17,1 a
AD	4,70 a	15,9 a	0,31 a	3,99 a	1,18 a	0,09 a	50 a	16,2 a
GP	4,62 a	12,8 a	0,38 a	3,72 a	1,14 a	0,20 a	46 a	16,8 a
ESC	4,58 a	14,6 a	0,32 a	3,35 a	1,00 a	0,16 a	43 a	14,7 a
----- 16-24 cm -----								
SPD	4,54 a	4,2 a	0,30 a	2,91 a	0,82 b	0,20 a	42 a	10,9 a
AD	4,77 a	9,6 a	0,19 a	3,90 a	1,13 a	0,09 a	50 a	13,4 a
GP	4,59 a	4,2 a	0,22 a	3,11 a	0,98 ab	0,24 a	44 a	12,6 a
ESC	4,61 a	11,0 a	0,50 a	3,50 a	1,02 ab	0,17 a	45 a	14,0 a

⁽¹⁾ SPD = Sistema plantio direto; AD = preparo convencional com arado de discos + grade leve no verão e grade pesada + grade leve no inverno; GP = preparo convencional com grade pesada + grade leve no verão e no inverno; ESC = preparo mínimo (escarificador + grade leve) no verão e grade pesada + grade leve no inverno. ⁽²⁾ Para a análise estatística, o teor de Al foi submetido à transformação (Al + 1)^{0,5}. Médias seguidas pela mesma letra nas colunas, dentro de cada camada, não diferem significativamente pelo teste de Tukey (p < 0,05).

mada avaliada (Tabelas 6, 7 e 8). Na camada de 0-8 cm, o aumento do pH ao longo do tempo foi mais acentuado para o SPD, ao passo que, nas camadas mais profundas, o AD foi o tratamento que resultou no maior incremento do pH de 1991 a 2004. É importante ressaltar que a tendência de aumento do pH nas camadas de 8-16 cm e 16-24 cm foi também observada para o SPD, mesmo com a ausência de incorporação do calcário neste tratamento.

Tabela 7. Atributos químicos de um Latossolo Vermelho distroférrico submetido a diferentes sistemas de preparo do solo, em três profundidades, determinados em 1994. Embrapa Soja, Londrina/PR, 2013.

Sistema ⁽¹⁾	pH	P	K	Ca	Mg	Al ⁽²⁾	V	C
	CaCl ₂	mg dm ⁻³	-----	cmol _c dm ⁻³	-----	--- % ---		g kg ⁻¹
----- 0-8 cm -----								
SPD	5,08 a	57,3 a	0,76 a	5,19 a	1,68 a	0,02 a	59 a	21,6 a
AD	4,97 a	23,2 b	0,63 a	4,03 b	1,31 b	0,02 a	54 a	15,7 b
GP	4,87 a	30,8 b	0,65 a	4,11 b	1,30 b	0,05 a	52 a	16,9 b
ESC	4,09 a	25,9 b	0,62 a	4,07 b	1,27 b	0,04 a	52 a	16,8 b
----- 8-16 cm -----								
SPD	4,87 a	16,9 a	0,53 a	4,57 a	1,20 a	0,04 a	53 a	16,6 a
AD	4,84 a	20,4 a	0,48 a	4,22 a	1,22 a	0,04 a	53 a	14,5 a
GP	4,82 a	17,1 a	0,48 a	4,24 a	1,22 a	0,06 a	50 a	15,7 a
ESC	4,78 a	18,1 a	0,44 a	4,35 a	1,24 a	0,05 a	51 a	16,4 a
----- 16-24 cm -----								
SPD	4,84 a	9,2 a	0,38 a	3,87 a	1,04 a	0,03 a	49 a	13,4 a
AD	4,83 a	10,9 a	0,33 a	3,84 a	1,14 a	0,04 a	50 a	12,8 a
GP	4,78 a	8,5 a	0,28 a	3,56 a	1,04 a	0,05 a	47 a	11,4 a
ESC	4,82 a	9,0 a	0,29 a	3,80 a	1,07 a	0,04 a	48 a	12,2 a

⁽¹⁾ SPD = Sistema plantio direto; AD = preparo convencional com arado de discos + grade leve no verão e grade pesada + grade leve no inverno; GP = preparo convencional com grade pesada + grade leve no verão e no inverno; ESC = preparo mínimo (escarificador + grade leve) no verão e grade pesada + grade leve no inverno. ⁽²⁾ Para a análise estatística, o teor de Al foi submetido à transformação (Al + 1)^{0,5}. Médias seguidas pela mesma letra nas colunas, dentro de cada camada, não diferem significativamente pelo teste de Tukey (p < 0,05).

A exemplo do observado para o pH, a saturação por bases e os teores de Ca, Mg e Al foram pouco influenciados pelo sistemas de preparo em todas as avaliações realizadas. Os teores de Ca e Al e a saturação por bases não diferiram em função dos tratamentos na avaliação de 1991, em todas as camadas (Tabela 6). No caso do Mg em 1991, foram observadas diferenças significativas apenas na camada de 16-24 cm,

sendo os valores maiores no AD em relação ao SPD. Na avaliação de 1994, os teores de Ca e Mg foram maiores no SPD, comparativamente aos demais sistemas de preparo na camada de 0-8 cm (Tabela 7). Entretanto, não houve diferenças entre os tratamentos para os teores de Ca e Mg nas camadas de 8-16 cm e 16-24 cm. Apesar dos maiores teores de Ca e Mg na camada superficial do SPD, a saturação por bases e os teores de Al em 1994 não foram afetados pelos sistemas de preparo do solo, independentemente da profundidade considerada. Em 2004, os teores de Ca e Mg e a saturação por bases foram mais elevados no SPD na camada de 0-8 cm (Tabela 8). Nessa amostragem, o Ca, o Mg e a saturação por bases nas camadas de 8-16 cm e 16-24 cm, assim como o Al em todas as profundidades avaliadas, não foram influenciados pelos tratamentos. Os maiores valores de Ca e Mg na camada superficial do SPD em 1994 e 2004, assim como de saturação por bases em 2004, podem ser atribuídos à aplicação superficial de calcário e, também, a maior capacidade de troca de cátions (CTC) associada aos teores mais elevados de C orgânico na camada superficial do SPD.

Em todas as profundidades e em todos os tratamentos avaliados, os valores de saturação por bases e os teores de Mg aumentaram ao longo do tempo, enquanto que a concentração de Al diminuiu (Tabelas 6, 7 e 8). Na camada de 0-8 cm, o aumento da saturação por bases e do teor de Mg de 1991 a 2004 foi mais acentuado no SPD, o que mais uma vez pode ser justificado pela calagem superficial, pela menor intensidade dos processos erosivos e pelos teores mais elevados de C orgânico, o que aumenta a capacidade de retenção dos nutrientes no solo. Por outro lado, o teor de Ca na camada de 0-8 cm dos tratamentos AD, ESC e GP foi pouco influenciado pelo ano de amostragem, enquanto que, no SPD, essa variável aumentou ao longo do tempo (Tabelas 6, 7 e 8). Nas camadas entre 8 e 24 cm, o teor de Ca foi similar entre as épocas de avaliação. É importante destacar que houve tendência de aumento da saturação por bases e do teor de Mg, de redução do Al e de manutenção do teor de Ca nas camadas de 8-16 e 16-24 cm no SPD, mesmo com a aplicação do calcário a lanço em superfície neste sistema.

Tabela 8. Atributos químicos de um Latossolo Vermelho distroférrico submetido a diferentes sistemas de preparo do solo, em três profundidades, determinados em 2004. Embrapa Soja, Londrina/PR, 2013.

Sistema ⁽¹⁾	pH	P	K	Ca	Mg	Al ⁽²⁾	V	C
	CaCl ₂	mg dm ⁻³		cmol _c dm ⁻³			-- % --	g kg ⁻¹
----- 0-8 cm -----								
SPD	5,58 a	58,6 a	0,70 a	5,06 a	2,51 a	0,01 a	69 a	24,1 a
AD	5,28 b	21,3 b	0,56 b	3,84 b	1,68 b	0,00 a	59 b	19,4 b
GP	5,16 b	23,5 b	0,54 b	3,59 b	1,64 b	0,02 a	57 b	20,4 b
ESC	5,28 b	22,7 b	0,57 b	3,75 b	1,77 b	0,01 a	59 b	20,8 b
----- 8-16 cm -----								
SPD	4,86 b	12,4 b	0,38 a	3,27 a	1,28 a	0,10 a	54 a	16,7 b
AD	5,18 a	16,7 ab	0,38 a	3,92 a	1,57 a	0,00 a	58 a	18,8 a
GP	4,96 ab	14,8 ab	0,32 a	3,48 a	1,46 a	0,04 a	54 a	15,6 b
ESC	5,10 ab	19,6 a	0,35 a	3,56 a	1,57 a	0,01 a	59 a	19,2 a
----- 16-24 cm -----								
SPD	4,88 b	5,5 b	0,22 b	3,22 a	1,03 a	0,07 a	50 a	13,4 bc
AD	5,11 a	11,6 a	0,32 a	3,23 a	1,28 a	0,00 a	53 a	17,4 a
GP	4,83 b	4,8 b	0,17 b	2,94 a	1,09 a	0,10 a	49 a	13,0 c
ESC	4,87 b	7,5 b	0,21 b	3,05 a	1,24 a	0,05 a	52 a	15,7 ab

⁽¹⁾ SPD = Sistema plantio direto; AD = preparo convencional com arado de discos + grade leve no verão e grade pesada + grade leve no inverno; GP = preparo convencional com grade pesada + grade leve no verão e no inverno; ESC = preparo mínimo (escarificador + grade leve) no verão e grade pesada + grade leve no inverno. ⁽²⁾ Para a análise estatística, o teor de Al foi submetido à transformação $(Al + 1)^{0,5}$. Médias seguidas pela mesma letra nas colunas, dentro de cada camada, não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

De modo geral, os resultados obtidos entre 1991 e 2004 demonstraram que os valores de pH, Ca, Mg e saturação por bases foram geralmente maiores no SPD na camada superficial do solo, e similares entre os tratamentos nas camadas mais profundas. Os sistemas de preparo não diferiram em função do teor de Al, independentemente da profundidade de amostragem, mesmo após 24 anos de condução experimental. Da mesma forma, os valores destes atributos foram próximos aos considerados adequados para as culturas da soja e do trigo em todas as avaliações. O conjunto dessas informações revela que as calagens realizadas na superfície do solo no SPD foram suficientes para manter um ambiente quimicamente favorável ao crescimento das raízes da soja

e do trigo em profundidade ao longo do tempo, assim como demonstrado por Cassol (2003) e Flores (2008). Essa constatação é reforçada pelo aumento da saturação por bases, do pH e do teor de Mg, pela diminuição da concentração de Al, e pela manutenção do teor de Ca ao longo do tempo nas camadas de 8-16 e 16-24 cm do SPD (Tabelas 6, 7 e 8).

Em todas as avaliações, o teor de P no solo foi maior no SPD em relação aos demais tratamentos na camada de 0-8 cm (Tabelas 6, 7 e 8). Maiores concentrações de P na superfície do solo (0-10 cm) sob SPD também foram observadas por Rheinheimer et al. (1998) e Costa et al. (2010). Como se trata de um nutriente com baixa mobilidade no solo (Eltz, et al., 1989), os maiores teores de P nas camadas superficiais do solo no SPD podem ser atribuídos à ausência de revolvimento e à aplicação superficial e localizada dos fertilizantes fosfatados pelos mecanismos sulcadores de adubo das semeadoras-adubadoras, o que também reduz o contato dos fertilizantes com sítios de adsorção e, assim, diminui a imobilização do nutriente. Adicionalmente, o aumento do teor de C orgânico nas camadas superficiais do SPD é associado à redução do potencial de imobilização de P pelos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio e argilominerais (Oliveira Junior et al., 2010). A ciclagem pelas plantas e as menores perdas por erosão são outros fatores envolvidos no aumento da disponibilidade de P na superfície de solos manejados sob SPD (Rheinheimer et al., 1998). Por outro lado, o AD apresentou teores mais altos de P do que o SPD nas camadas entre 8-24 cm em 2004 (Tabela 8), o que pode ser atribuído ao P liberado na decomposição dos restos culturais incorporados pelo preparo de solo.

Os teores de K não foram influenciados pelos tratamentos nas avaliações realizadas em 1991 e 1994, em todas as camadas amostradas (Tabelas 6 e 7). No entanto, em 2004, o SPD resultou em maiores teores de K na camada de 0-8 cm comparativamente aos demais sistemas de preparo (Tabela 8), o que pode ser justificado em função da manutenção dos restos culturais na superfície, da aplicação superficial de fertilizantes potássicos e da redução das perdas do nutriente por erosão no SPD. Além disso, o aumento do teor de C orgânico na

superfície do solo manejado sob SPD resulta em maior CTC e, assim, em menor migração de K para camadas mais profundas. Por outro lado, o AD apresentou maiores teores de K em relação aos demais tratamentos na camada de 16 a 24 cm, em 2004 (Tabela 8), o que pode ser associado, em parte, à incorporação dos restos vegetais e mistura da camada superficial com as demais em função do revolvimento do solo. Em todas as avaliações, os teores de K diminuíram com o aumento da profundidade de amostragem, o que foi mais evidente no SPD (Tabelas 6 a 8). Menores teores de K em profundidade, formando gradientes acentuados a partir da superfície do solo, é uma característica comum em SPD consolidado e ocorre paralelamente ao gradiente de C e da capacidade de troca de cátions, conforme Mielniczuk (2005) e Anghinoni (2007).

Na avaliação realizada no ano de 1991 (Tabela 6), o SPD resultou em teores mais elevados de C orgânico na camada superficial do solo (0-8 cm) quando comparado ao AD. Nessa mesma camada, os tratamentos ESC e GP apresentaram valores intermediários de C orgânico, não diferindo entre si e em relação ao SPD e ao AD. Nas amostragens de 1994 (Tabela 7) e 2004 (Tabela 8), o teor de C na camada de 0-8 cm foi mais alto no SPD em relação aos demais tratamentos, que não diferiram entre si. Nas demais profundidades avaliadas em 1991 (Tabela 6) e 1994 (Tabela 7), o teor de C orgânico do solo não variou significativamente entre os sistemas de preparo. Em contrapartida, na avaliação de 2004, o AD apresentou teores mais elevados de C orgânico, comparativamente ao SPD e à GP, nas camadas entre 8 e 24 cm.

Na Figura 2, são apresentados os estoques de C determinados em 2010 nos sistemas AD e SPD. Na camada de 0 a 24 cm de profundidade, os estoques de C foram de 56 e 64 t ha⁻¹ para o AD e o SPD, respectivamente. Desta forma, o SPD, durante o período de 29 anos desde o início do experimento, acumulou 8,0 t ha⁻¹ de C a mais do que o sistema AD. A principal parcela desse ganho ficou concentrada na camada superficial (0-8 cm), concordando com os dados referentes aos teores de C nas avaliações realizadas em 1991, 1994 e 2004 (Tabelas 6, 7 e 8). A relação entre o C acumulado e o tempo de duração do es-

tudo indica que o SPD apresentou uma taxa média de acúmulo de 276 kg ha⁻¹ ano⁻¹ em relação ao AD. Esses dados estão um pouco abaixo das estimativas médias de 350 a 480 kg ha⁻¹ ano⁻¹ realizadas por Bayer et al (2006), para condições tropicais e subtropicais, respectivamente. Essas menores taxas indicam que a capacidade de acúmulo de C pode ter atingido o nível de equilíbrio estabelecido para a produção de resíduos vegetais no sistema de sucessão soja/trigo no Norte do Paraná. Desta forma, o acúmulo máximo no SPD e a perda máxima no AD já teriam sido atingidos, fazendo com que a diferença no estoque de C entre esses sistemas se mantenha aproximadamente constante com o passar do tempo, resultando na redução da taxa nominal de acúmulo de C ao longo dos anos.

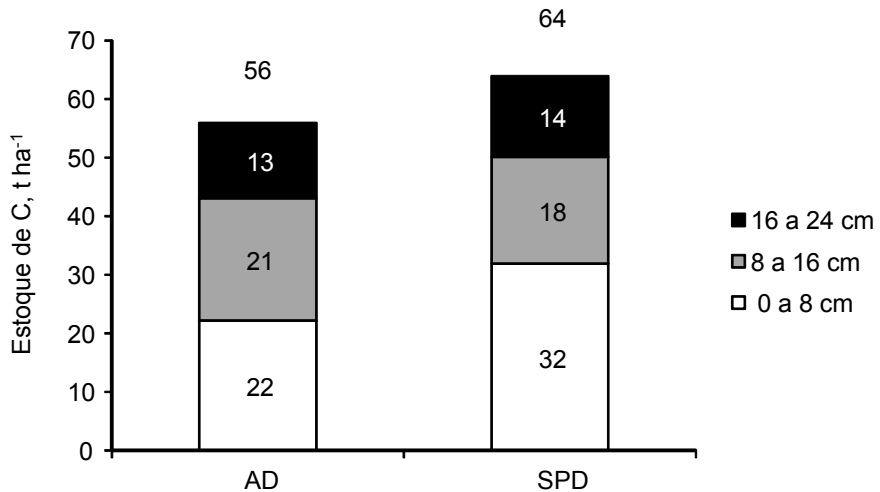


Figura 2. Estoques de carbono orgânico em camadas de solo no sistema de preparo convencional com arado de discos (AD) e no sistema plantio direto (SPD) após 29 anos. Embrapa Soja, Londrina/PR, 2013.

Considerando o conjunto das quatro avaliações realizadas (1991, 1994, 2004 e 2010), os dados indicaram que o SPD, na maioria dos casos, apresentou maior acúmulo de C orgânico na camada superficial do solo (0-8 cm) em relação ao preparo convencional com arado de discos, concordando com Diekow et al. (2005), Babujia et al. (2010) e Boddey et al. (2010). O maior teor de C no SPD pode ser atribuído prin-

principalmente à manutenção dos restos culturais na superfície do solo e à proteção física dos compostos orgânicos contra o ataque microbiano, exercida pelos agregados do solo (Diekow et al., 2005), cuja formação e estabilidade são favorecidas em condições de menor intensidade de revolvimento do solo (Goldchin et al., 1997). Além disso, o revolvimento do solo aumenta a disponibilidade de O_2 aos micro-organismos, o que também aumenta a taxa de mineralização dos compostos orgânicos. O aumento do teor de C orgânico do solo, observado no SPD, proporciona diversos benefícios ao sistema de produção agrícola, tais como a formação e a estabilização de agregados de solo, a disponibilização e retenção de nutrientes, a complexação de elementos tóxicos e micronutrientes, e o aumento da biomassa e da atividade microbiana (Bayer & Mielniczuk, 1999). Sob o ponto de vista ambiental, o acúmulo de C orgânico resulta na retirada de CO_2 da atmosfera e/ou conservação do mesmo no solo, contribuindo para a mitigação do aquecimento global. Neste sentido, nas condições deste experimento, a utilização do SPD em substituição ao preparo convencional com arado de discos proporcionou, ao longo de 29 anos, uma redução na emissão de CO_2 do solo para a atmosfera da ordem de $29,4 \text{ t ha}^{-1}$, o que corresponde à queima de aproximadamente 10.500 L de diesel.

3.1.2. Atributos físicos

A compactação do solo sempre se constituiu em um dos principais receios dos produtores em relação ao SPD, o que durante muito tempo limitou a expansão do uso desta tecnologia, especialmente em áreas de textura argilosa. Além de aumentar a resistência do solo à penetração das raízes, o que limita a profundidade e o volume de solo explorado pelas mesmas em busca de água e nutrientes, a compactação do solo reduz a porosidade total, macroporosidade, capacidade de infiltração de água, aeração e condutividade hidráulica (Dias Junior & Pierce, 1996). Essas modificações podem diminuir a produtividade das culturas, especialmente em anos secos ou com excesso de chuvas (Torres & Saraiva, 1999), bem como aumentar as perdas de nutrientes, as emissões de gases causadores do efeito estufa e a poluição dos recursos hídricos (Lipiec et al., 2003), prejudicando ainda o desempenho das máquinas agrícolas (Tullberg, 2000). Além disso, aumentos na incidên-

cia e severidade de algumas doenças radiculares da soja causadas por fungos têm sido relacionados à existência de camadas compactadas de solo (Torres et al., 2010). Assim, com o objetivo de avaliar os efeitos do SPD e outros sistemas de preparo sobre o estado de compactação do solo, alguns atributos físicos vêm sendo monitorados ao longo do tempo neste experimento.

A evolução da densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade em função dos sistemas de preparo, no período entre 1986 e 2004, é apresentada nas Tabelas de 9 a 12. Na camada de 5,5-10,5 cm, o SPD apresentou, em média e na maioria das avaliações, um maior nível de compactação em relação aos demais sistemas de preparo, expresso pelos maiores valores de densidade (Tabela 9) e microporosidade (Tabela 12), e pela menor porosidade total (Tabela 10) e macroporosidade (Tabela 11). Tendência semelhante foi observada para a camada de 13,5-18,5 cm, porém as diferenças foram menores. Nessa camada, os valores de densidade do solo e a porosidade total no SPD foram similares aos demais sistemas de preparo, porém a macroporosidade foi menor e a microporosidade maior, comparativamente ao AD e ao ESC. É importante destacar que o tratamento GP resultou em menores valores de porosidade total e macroporosidade, e em maiores valores de microporosidade em relação ao AD e ESC, demonstrando a formação de uma camada compactada (pé-de-grade) a 13,5-18,5 cm de profundidade. Na camada de 21,5-26,5 cm, em média e na maioria das avaliações, a densidade do solo foi maior para o AD, enquanto que a porosidade total, macroporosidade e microporosidade não foram influenciadas pelos sistemas de preparo. Esses dados revelam que o preparo do solo por meio da aração, realizado sempre na mesma profundidade (22 cm), resultou na formação de uma camada mais compactada (pé-de-arado).

Em 2010, somente os tratamentos SPD e AD foram avaliados, com amostragem realizada durante o ciclo do trigo (ou seja, após o preparo do solo de inverno), até a camada de 87,5-92,5 cm. Embora as diferenças nos valores de porosidade total, macroporosidade e microporosidade tenham sido pequenas, a densidade do solo foi significativamente

maior no AD do que no SPD até a camada de 21,5-26,5 cm (Figura 3). A maior compactação no AD em relação ao SPD nesta avaliação pode ser atribuída às gradagens pesada e leve realizadas antes da semeadura do trigo e que, em 2010, foram efetuadas sob condições de elevado conteúdo de água no solo. Isso resultou na fragmentação excessiva da estrutura do solo na camada de 5,5-10,5 cm e na formação de um pé-de-grade na camada de 13,5-18,5 cm. Já a maior compactação no AD na camada de 21,5-26,5 cm é coerente com o pé-de-arado detectado nas avaliações anteriores.

Tabela 9. Densidade do solo de um Latossolo Vermelho distroférico submetido a diferentes sistemas de preparo do solo, em função da profundidade e do ano de amostragem. Embrapa Soja, Londrina/PR, 2013.

Sistema de preparo ⁽¹⁾	Ano						Média
	1986	1991	1994	1998	1999	2004	
----- Mg m ⁻³ -----							
----- 5,5-10,5 cm -----							
SPD	1,22 a	1,22 a	1,17 a	1,30 a	1,29 a	1,23 a	1,24 a
AD	1,27 a	1,12 b	1,09 b	1,28 a	1,21 bc	1,05 b	1,17 b
GP	1,09 b	1,24 a	1,19 a	1,25 a	1,29 ab	1,01 b	1,18 b
ESC	1,20 a	1,19 ab	1,16 ab	1,28 a	1,19 c	1,06 b	1,18 b
----- 13,5-18,5 cm -----							
SPD	n.d. ⁽²⁾	1,23 a	1,24 ab	1,29 a	1,29 a	1,24 ab	1,26 a
AD	n.d.	1,26 a	1,20 b	1,29 a	1,32 a	1,19 b	1,25 a
GP	n.d.	1,30 a	1,30 a	1,30 a	1,29 a	1,28 a	1,29 a
ESC	n.d.	1,24 a	1,22 ab	1,25 a	1,24 a	1,21 ab	1,23 a
----- 21,5-26,5 cm -----							
SPD	1,22 a	1,23 b	1,18 b	1,24 b	1,20 b	1,18 b	1,21 b
AD	1,28 a	1,34 a	1,32 a	1,35 a	1,28 a	1,28 a	1,31 a
GP	1,29 a	1,24 b	1,24 b	1,24 b	1,28 a	1,22 ab	1,25 b
ESC	1,21 a	1,29 ab	1,24 b	1,24 b	1,22 ab	1,17 b	1,23 b

⁽¹⁾ SPD = Sistema plantio direto; AD = preparo convencional com arado de discos + grade leve no verão e grade pesada + grade leve no inverno; GP = preparo convencional com grade pesada + grade leve no verão e no inverno; ESC = preparo mínimo (escarificador + grade leve) no verão e grade pesada + grade leve no inverno. ⁽²⁾ n.d. = não determinado. Médias seguidas pela mesma letra nas colunas, dentro de cada ano e profundidade, não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Tabela 10. Porosidade total de um Latossolo Vermelho distroférico submetido a diferentes sistemas de preparo do solo, em função da profundidade e do ano de amostragem. Embrapa Soja, Londrina/PR, 2013.

Sistema de preparo ⁽¹⁾	Ano						Média
	1986	1991	1994	1998	1999	2004	
----- m ³ m ⁻³ -----							
----- 5,5-10,5 cm -----							
SPD	0,52 b	0,53 b	0,56 b	0,50 a	0,50 b	0,51 c	0,52 b
AD	0,52 b	0,59 a	0,59 a	0,51 a	0,54 a	0,57 a	0,55 a
GP	0,57 a	0,53 b	0,56 b	0,52 a	0,51 b	0,53 bc	0,54 ab
ESC	0,54 b	0,56 a	0,57 ab	0,51 a	0,55 a	0,55 ab	0,55 a
----- 13,5-18,5 cm -----							
SPD	n.d. ⁽²⁾	0,52 a	0,53 ab	0,49 a	0,49 ab	0,50 b	0,51 ab
AD	n.d.	0,53 a	0,55 a	0,49 a	0,48 b	0,53 a	0,52 a
GP	n.d.	0,51 a	0,51 b	0,49 a	0,49 ab	0,49 b	0,50 b
ESC	n.d.	0,53 a	0,53 ab	0,51 a	0,51 a	0,51 ab	0,52 a
----- 21,5-26,5 cm -----							
SPD	0,52 a	0,52 a	0,53 a	0,50 a	0,52 a	0,51 a	0,52 a
AD	0,51 a	0,50 a	0,51 a	0,49 a	0,50 a	0,50 a	0,50 a
GP	0,51 a	0,52 a	0,52 a	0,50 a	0,50 a	0,50 a	0,51 a
ESC	0,53 a	0,50 a	0,53 a	0,50 a	0,51 a	0,51 a	0,51 a

⁽¹⁾ SPD = Sistema plantio direto; AD = preparo convencional com arado de discos + grade leve no verão e grade pesada + grade leve no inverno; GP = preparo convencional com grade pesada + grade leve no verão e no inverno; ESC = preparo mínimo (escarificador + grade leve) no verão e grade pesada + grade leve no inverno. ⁽²⁾ n.d. = não determinado. Médias seguidas pela mesma letra nas colunas, dentro de cada ano e profundidade, não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Tabela 11. Macroporosidade de um Latossolo Vermelho distroférico submetido a diferentes sistemas de preparo do solo, em função da profundidade e do ano de amostragem. Embrapa Soja, Londrina/PR, 2013.

Sistema de preparo ⁽¹⁾	Ano						Média
	1986	1991	1994	1998	1999	2004	
----- m ³ m ⁻³ -----							
----- 5,5-10,5 cm -----							
SPD	0,09 b	0,10 c	0,10 c	0,06 a	0,06 b	0,09 c	0,08 b
AD	0,09 b	0,19 a	0,21 a	0,07 a	0,14 a	0,20 a	0,15 a
GP	0,17 a	0,11 bc	0,14 bc	0,08 a	0,06 b	0,16 b	0,12 b
ESC	0,10 b	0,15 b	0,16 b	0,08 a	0,17 a	0,18 ab	0,14 a
----- 13,5-18,5 cm -----							
SPD	n.d. ⁽²⁾	0,07 b	0,08 b	0,04 a	0,04 a	0,05 b	0,06 b
AD	n.d.	0,10 a	0,13 a	0,05 a	0,04 a	0,10 a	0,09 a
GP	n.d.	0,06 b	0,06 b	0,04 a	0,05 a	0,05 b	0,05 b
ESC	n.d.	0,10 a	0,09 ab	0,07 a	0,08 a	0,13 a	0,09 a
----- 21,5-26,5 cm -----							
SPD	0,07 a	0,05 a	0,09 a	0,04 a	0,06 a	0,07 a	0,06 a
AD	0,06 a	0,03 a	0,04 b	0,02 a	0,03 b	0,06 a	0,04 a
GP	0,06 a	0,05 a	0,06 ab	0,05 a	0,04 b	0,06 a	0,05 a
ESC	0,08 a	0,04 a	0,08 a	0,05 a	0,08 a	0,09 a	0,07 a

⁽¹⁾ SPD = Sistema plantio direto; AD = preparo convencional com arado de discos + grade leve no verão e grade pesada + grade leve no inverno; GP = preparo convencional com grade pesada + grade leve no verão e no inverno; ESC = preparo mínimo (escarificador + grade leve) no verão e grade pesada + grade leve no inverno. ⁽²⁾ n.d. = não determinado. Médias seguidas pela mesma letra nas colunas, dentro de cada ano e profundidade, não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Tabela 12. Microporosidade de um Latossolo Vermelho distroférico submetido a diferentes sistemas de preparo do solo, em função da profundidade e do ano de amostragem. Embrapa Soja, Londrina/PR, 2013.

Sistema de preparo ⁽¹⁾	Ano						Média
	1986	1991	1994	1998	1999	2004	
----- m ³ m ⁻³ -----							
----- 5,5-10,5 cm -----							
SPD	0,43 a	0,43 a	0,43 a	0,44 a	0,44 a	0,42 a	0,43 a
AD	0,44 a	0,39 b	0,38 c	0,44 a	0,41 b	0,36 b	0,40 c
GP	0,40 b	0,43 a	0,41 b	0,43 a	0,44 a	0,36 b	0,41 b
ESC	0,43 a	0,42 a	0,41 b	0,43 a	0,41 b	0,37 b	0,41 b
----- 13,5-18,5 cm -----							
SPD	n.d. ⁽²⁾	0,45 a	0,45 a	0,45 a	0,45 a	0,44 a	0,45 a
AD	n.d.	0,43 a	0,42 b	0,44 a	0,44 a	0,40 c	0,43 b
GP	n.d.	0,45 a	0,44 a	0,45 a	0,44 a	0,43 ab	0,44 ab
ESC	n.d.	0,43 a	0,45 a	0,44 a	0,43 a	0,42 bc	0,43 b
----- 21,5-26,5 cm -----							
SPD	0,44 a	0,47 a	0,44 b	0,46 a	0,46 a	0,44 a	0,45 ab
AD	0,45 a	0,47 a	0,47 a	0,47 a	0,46 a	0,44 a	0,46 a
GP	0,45 a	0,47 a	0,46 ab	0,45 a	0,46 a	0,44 a	0,46 a
ESC	0,44 a	0,46 a	0,45 b	0,45 a	0,43 b	0,42 b	0,44 b

⁽¹⁾ SPD = Sistema plantio direto; AD = preparo convencional com arado de discos + grade leve no verão e grade pesada + grade leve no inverno; GP = preparo convencional com grade pesada + grade leve no verão e no inverno; ESC = preparo mínimo (escarificador + grade leve) no verão e grade pesada + grade leve no inverno. ⁽²⁾ n.d. = não determinado. Médias seguidas pela mesma letra nas colunas, dentro de cada ano e profundidade, não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

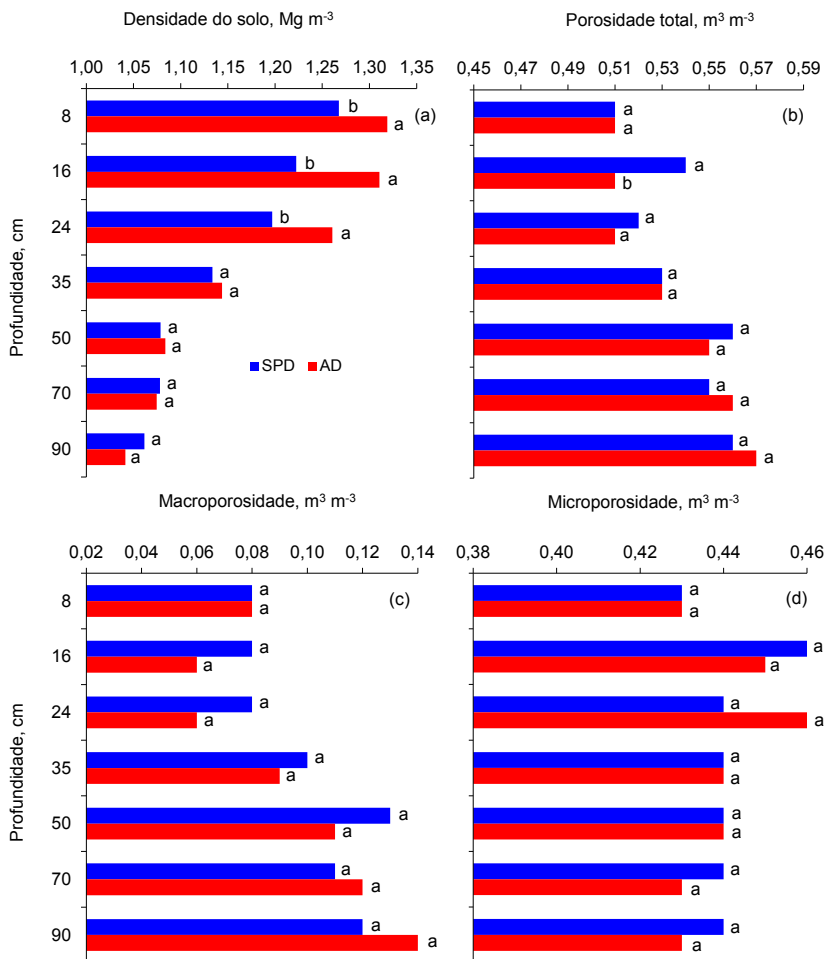


Figura 3. Densidade do solo (a), porosidade total (b), macroporosidade (c) e microporosidade (d) de um Latossolo Vermelho distroférrico submetido a diferentes sistemas de preparo do solo, em avaliação realizada em 2010, em diferentes profundidades na camada de 0-90 cm. Embrapa Soja, Londrina/PR, 2013. Médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada profundidade, não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os dados de densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade, obtidos ao longo do tempo nos tratamentos SPD e AD nas camadas de 5,5-10,5 cm, 13,5-18,5 cm e 21,5-26,5 cm, foram integrados em uma supervariável chamada de grau de compactação do solo (GC), por meio de uma ferramenta de análise estatística multivariada denominada de modelo de regressão em árvore - MRA (De'ath, 2002) (Figura 4 e Tabela 13). Essa ferramenta permite formar grupos ("nós terminais") que abrangem amostras semelhantes entre si no que se refere ao valor das variáveis que formam a supervariável, possibilitando assim detectar fatores (tratamentos) capazes de explicar a variabilidade dos dados. Para confirmar a existência de diferenças significativas entre os grupos formados pelo MRA, foi empregada a técnica MRPP (*Multi-Response Permutation Procedure*) (Mielke, 1991).

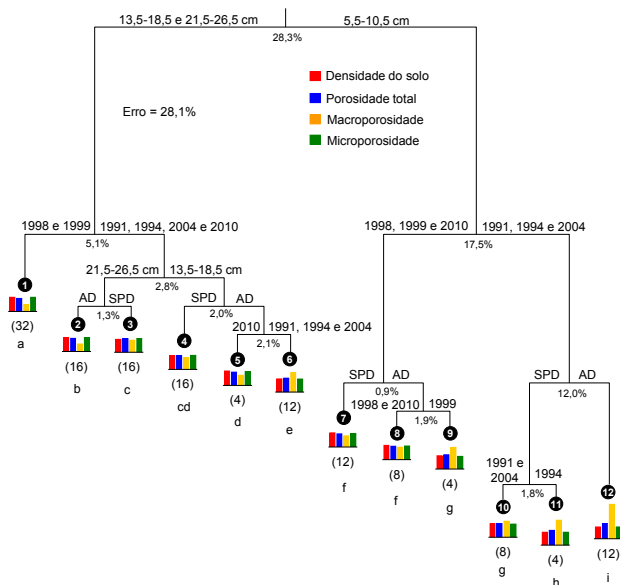


Figura 4. Modelo de regressão em árvore para a variação do grau de compactação de um Latossolo Vermelho distroférrico em sistema plantio direto (SPD) e preparo convencional com arado de discos (AD), em diferentes profundidades e anos de amostragem. Embrapa Soja, Londrina/PR, 2013. Os números abaixo de cada bifurcação indicam a porcentagem da variabilidade total que é explicada pela respectiva separação de fatores. Os valores dentro dos círculos se referem ao número do grupo formado pelo modelo de regressão em árvore. As barras verticais indicam o valor padronizado dos atributos físicos do solo avaliados. Grupos identificados com a mesma letra não diferem significativamente pelo MRPP (*Multi-Response Permutation Procedures*) ($p < 0,05$).

Tabela 13. Valores médios dos parâmetros componentes do grau de compactação do solo, estimados para cada um dos grupos obtidos a partir do modelo de regressão em árvore. Embrapa Soja, Londrina/PR, 2013.

Grupo (nó)	Composição do grupo ⁽¹⁾	Variáveis ⁽²⁾			
		Ds	Pt	Macro	Micro
		-- Mg m ⁻³ --	----- m ³ m ⁻³ -----		
1	13,5-18,5 cm e 21,5-26,5 cm; AD e SPD; 1998 e 1999.	1,28	0,50	0,04	0,45
2	21,5-26,5 cm; AD; 1991; 1994; 2004; e 2010	1,30	0,51	0,05	0,46
3	21,5-26,5 cm; SPD; 1991; 1994; 2004; e 2010	1,20	0,52	0,07	0,45
4	13,5-18,5 cm; SPD; 1991; 1994; 2004; e 2010	1,23	0,52	0,07	0,45
5	13,5-18,5 cm; AD; 2010	1,31	0,51	0,06	0,45
6	13,5-18,5 cm; AD; 1991; 1994; e 2004	1,22	0,54	0,12	0,42
7	5,5-10,5 cm; SPD; 1998; 1999; e 2010.	1,29	0,50	0,07	0,44
8	5,5-10,5 cm; AD; 1998; e 2010	1,30	0,51	0,07	0,44
9	5,5-10,5 cm; AD; 1999	1,21	0,54	0,13	0,41
10	5,5-10,5 cm; SPD; 1991; e 2004	1,23	0,52	0,09	0,42
11	5,5-10,5 cm; SPD; 1994	1,17	0,56	0,15	0,41
12	5,5-10,5 cm; AD; 1991; 1994 e 2004	1,08	0,58	0,20	0,38

⁽¹⁾ SPD = sistema plantio direto contínuo; AD = preparo convencional com arado de discos + grade leve no verão e grade pesada + grade leve no inverno. ⁽²⁾ Ds = densidade do solo; Pt = porosidade total; Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade.

O MRA separou os tratamentos, camadas e épocas de avaliação em doze grupos em função do GC, o que explicou 71,9% da variabilidade dos dados. A análise por meio do MRPP confirmou a existência de diferenças significativas no GC entre os grupos formados pelo MRA, à exceção dos contrastes entre os grupos 3 e 4, 4 e 5, 7 e 8, e 9 e 10. A macroporosidade foi o atributo que mais variou entre os grupos,

sendo, portanto, o indicador mais sensível às alterações físicas ocasionadas pelo sistema de preparo do solo. Na Figura 4, as barras verticais representam os valores padronizados das variáveis dentro de cada grupo, o que permite comparar os grupos em função da magnitude de cada atributo físico estudado.

No lado direito da primeira bifurcação, nota-se que a camada de 5,5-10,5 cm diferiu das demais (Figura 4 e Tabela 13). Nessa camada, os tratamentos foram separados em seis grupos, demonstrando que o GC foi maior no SPD do que no AD na maior parte das avaliações (1991, 1994, 1999 e 2004). No lado esquerdo da primeira bifurcação, verifica-se que, para as demais camadas, o MRA também resultou na formação de seis grupos (Figura 4 e Tabela 13). A separação dos grupos mostrou que, na camada de 13,5-18,5 cm, o GC no AD foi menor (1991, 1994 e 2004) ou igual (1998, 1999 e 2010) ao SPD. Por outro lado, na camada de 21,5-26,5 cm, o AD resultou em um maior GC em comparação ao SPD na maior parte das avaliações (1991, 1994, 2004 e 2010), confirmando a formação do pé-de-arado.

As diferenças de umidade do solo entre os tratamentos no momento da determinação da RP foram inexpressivas na maioria das camadas e avaliações (Tabela 14), permitindo a comparação entre os sistemas de preparo. Nas quatro avaliações realizadas, a RP foi significativamente maior no SPD em relação ao AD e ao ESC na camada de 0-22 cm (Figura 5), a qual corresponde à profundidade média de trabalho do arado e do escarificador. Nas demais camadas, a RP não diferiu significativamente entre estes tratamentos. Independentemente da época de avaliação, as maiores diferenças do SPD em relação ao AD e ao ESC ocorreram na camada de 10-14 cm. Este resultado concorda com diversas pesquisas que têm demonstrado que, no SPD, ocorre a formação de uma camada de solo caracterizada por um maior grau de compactação em uma profundidade equivalente a 8-15 cm (Genro Junior et al., 2009; Secco et al., 2009) o que, no entanto, nem sempre é crítico ao desenvolvimento radicular e à produtividade das culturas. Ao contrário do observado para a densidade e porosidade do solo (Tabelas 9 a 12, Figuras 3 e 4), não houve diferenças significativas na RP entre o SPD e o AD na camada de 21,5-26,5 cm, correspondente ao pé-de-arado.

Tabela 14. Conteúdo de água do solo no momento da determinação da resistência à penetração, em um Latossolo Vermelho distroférico submetido a diferentes sistemas de preparo do solo. Embrapa Soja, Londrina/PR, 2013.

Sistema de manejo ⁽¹⁾	Ano			
	1986	1991	1994	1999
----- kg kg ⁻¹ -----				
----- 0-0,1 m -----				
SPD	0,30	0,29	0,26	0,28
AD	0,30	0,26	0,25	0,25
GP	0,29	0,24	0,25	0,27
ESC	0,29	0,25	0,25	0,28
----- 0,1-0,2 m -----				
SPD	0,31	0,28	0,28	0,31
AD	0,31	0,27	0,26	0,31
GP	0,31	0,24	0,25	0,30
ESC	0,32	0,25	0,27	0,31
----- 0,2-0,3 m -----				
SPD	n.d. ⁽²⁾	0,32	0,29	n.d.
AD	n.d.	0,26	0,26	n.d.
GP	n.d.	0,25	0,26	n.d.
ESC	n.d.	0,26	0,27	n.d.

⁽¹⁾ SPD = Sistema plantio direto; AD = preparo convencional com arado de discos + grade leve no verão e grade pesada + grade leve no inverno; GP = preparo convencional com grade pesada + grade leve no verão e no inverno; ESC = preparo mínimo (escarificador + grade leve) no verão e grade pesada + grade leve no inverno. ⁽²⁾ n.d. = não determinado.

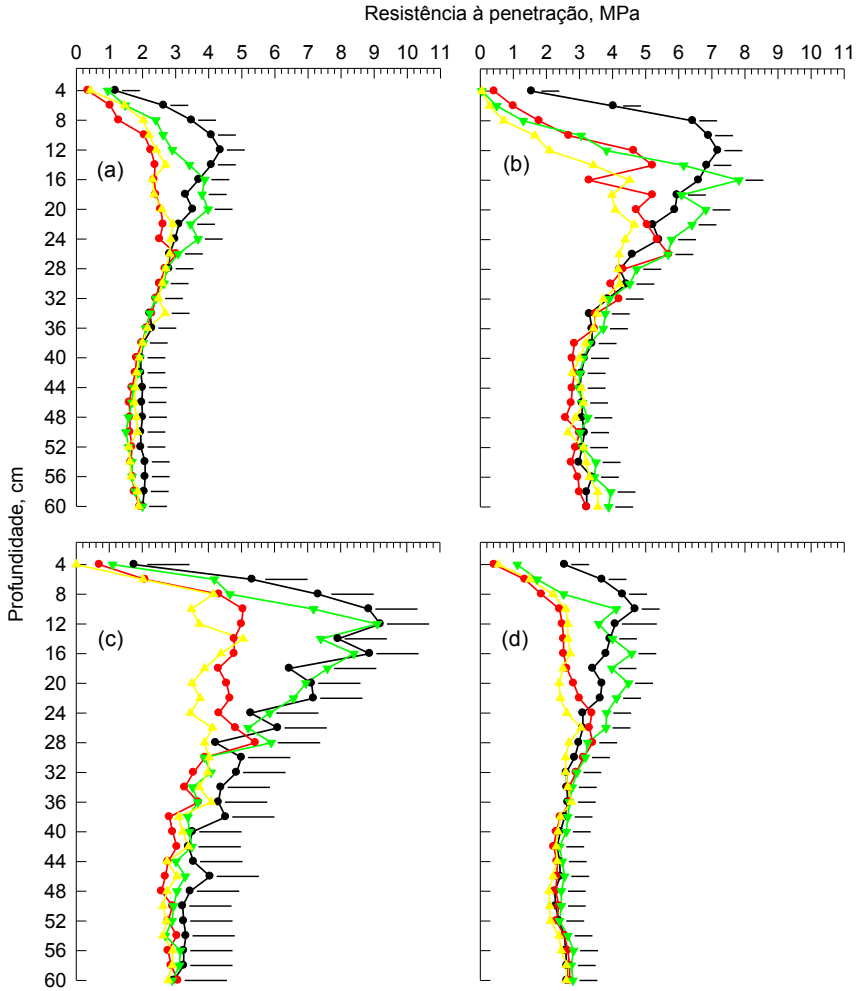


Figura 5. Resistência mecânica à penetração de um Latosolo Vermelho distroférrico submetido a diferentes sistemas de preparo do solo, determinada até 60 cm de profundidade nos anos de 1986 (a), 1991 (b), 1994 (c) e 1999 (d). Embrapa Soja, Londrina/PR, 2013. DMS = diferença mínima significativa, determinada pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Na camada de 0-12 cm, equivalente à profundidade média de trabalho da grade pesada, os valores de RP no tratamento GP foram similares aos obtidos no AD e no ESC, mas significativamente menores do que os observados no SPD (Figura 5). Por outro lado, a GP sempre resultou em maiores valores de RP, comparativamente ao ESC e ao AD na camada de 12-24 cm. Nessa mesma profundidade, a RP na GP foi maior ou igual ao SPD, demonstrando novamente a formação de uma camada compactada (pé-de-grade).

Independentemente da camada considerada e do sistema de preparo, não foi possível detectar tendência de aumento ou redução dos valores de densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade e RP ao longo do tempo, embora os mesmos tenham variado em função do ano em que foram determinados (Tabelas 9 a 13, Figuras 3 a 5). Portanto, o nível de compactação no SPD em todas as camadas avaliadas manteve-se aproximadamente constante ao longo do tempo. Adicionalmente, a densidade do solo no SPD, mesmo na camada com maior grau de compactação (13,5-18,5 cm), foi geralmente inferior a $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$ (Tabela 9 e Figura 3), valor considerado por Torres & Saraiva (1999) como sendo limitante ao desenvolvimento radicular e à produtividade das culturas para o solo utilizado no presente estudo.

A densidade máxima do solo (DMS) da área experimental, determinada pelo Ensaio de Proctor, equivale a $1,53 \text{ Mg m}^{-3}$ (Torres & Saraiva, 1999). Assim, os valores médios da densidade relativa do solo (DR) no SPD, definida como sendo razão entre a densidade do solo e a DMS, corresponderam a 0,81, 0,82 e 0,79 nas camadas de 5,5-10,5 cm, 13,5-18,5 cm e 21,5-26,5 cm, respectivamente. Da mesma forma, o valor de DR mais elevado no SPD, observado na camada de 13,5-18,5 cm em 1999, equivaleu a 0,86. Estes valores de DR são inferiores ao considerado limitante ao desenvolvimento das plantas para um Latossolo Vermelho de textura argilosa, equivalente a 0,88 (Klein, 2006). Esse fato, em conjunto com o comportamento da produtividade da soja e do trigo ao longo do tempo (Tabelas 17 e 18, e Figuras 7 e 12), revela que o maior nível de compactação observado no SPD em relação aos demais tratamentos, principalmente até a camada de 13,5-18,5 cm, não é limitante ao desenvolvimento e a produtividade das culturas.

É interessante notar que, apesar das maiores produtividades (Tabelas 17 e 18, e Figuras 7 e 12) e dos valores adequados de densidade do solo (Tabela 9), a RP no SPD foi maior que 3,5 MPa, valor considerado limitante ao desenvolvimento radicular quando obtido por meio de penetrômetros de impacto (Torres & Saraiva, 1999). Essa aparente incoerência pode ser atribuída, em primeiro lugar, a maior resistência estrutural do solo no SPD mesmo em densidades similares aos demais tratamentos, resultado da maior cimentação entre as partículas e agregação do solo em razão da baixa mobilização do solo e ao aumento no teor de C orgânico do solo (Tabelas 6 a 8 e Figura 2), processo conhecido como *age hardening* (“endurecimento com o tempo”) (Dexter, 1988). Por exemplo, na avaliação realizada em 1999, a RP na camada de 13,5-18,5 cm foi de 3,60 MPa para o SPD e de 2,58 MPa para o AD (Figura 4), enquanto que a densidade (Tabela 9) e a umidade (Tabela 14) do solo na mesma camada foram similares entre os dois tratamentos. O aumento da RP no SPD em relação ao preparo convencional, em amostras com mesma densidade e umidade, foi verificado por Moraes (2013), em trabalho realizado no mesmo tipo de solo. A maior presença de raízes no SPD, devido à menor intensidade de revolvimento do solo, é outro fator que pode ter contribuído para aumentar a RP em relação aos demais tratamentos. Além disso, os bioporos presentes no SPD, produzidos por minhocas e outros organismos de solo e pelas raízes das culturas anteriores, foram provavelmente utilizados como passagem pelas raízes das culturas subsequentes (Torres & Saraiva, 1999), compensando possíveis efeitos negativos da alta RP sobre o desenvolvimento radicular. Esses bioporos geralmente ocupam menos de 1% do volume do solo (Ehlers et al., 1983) e têm trajetórias irregulares, diferentes dos penetrômetros, por isso têm pouco efeito sobre a RP. Assim, esses resultados demonstram que os limites críticos de RP variam em função do sistema de preparo do solo, sendo maiores em SPD. Neste trabalho, valores de RP de até 7 MPa, quando determinada com o solo na consistência friável e por meio de penetrômetros de impacto, não foram suficientes para reduzir a produtividade da soja (Tabela 17 e Figura 7) e do trigo (Tabela 18 e Figura 12).

Os resultados também comprovaram a formação de uma camada compactada a 13,5-18,5 cm de profundidade no tratamento GP (pé-de-grade), e a 21,5-26,5 cm no AD (pé-de-arado), em virtude da realização do preparo do solo sempre a uma mesma profundidade e com o mesmo implemento (Tabelas 9 a 12, Figuras 3 e 5). Em ambos os sistemas de preparo, a densidade do solo na camada de 13,5-18,5 cm (GP) ou de 21,5-26,5 cm (AD) (Tabela 9) foi similar ou superior ao valor crítico de $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$ (Torres & Saraiva, 1999). Tal fato se constitui em uma das possíveis justificativas para a menor produtividade da soja nesses tratamentos em relação ao SPD (Tabela 17), uma vez que camadas compactadas em profundidade, além de prejudicar o desenvolvimento radicular das culturas, limitam os fluxos descendentes (infiltração) e ascendentes de água no solo.

A estabilidade dos agregados em água é um importante indicador de qualidade física do solo, apresentando relação direta com a resistência do solo à erosão hídrica. De forma geral, quanto maior o tamanho dos agregados estáveis em água, maior será o espaço poroso entre os agregados, aumentando a infiltração e, conseqüentemente, diminuindo a erosão (Castro Filho et al., 1998). Entretanto, Paladini & Mielniczuk (1991) alertam que solos compactados em níveis limitantes ao desenvolvimento das culturas podem apresentar elevada estabilidade de agregados em água, de forma que a utilização da mesma, como variável isolada, pode não ser um bom indicador de qualidade estrutural do solo.

No presente trabalho, a porcentagem de agregados estáveis em água (PAEA) na classe $> 4 \text{ mm}$ diferiu significativamente entre os sistemas de preparo do solo na camada de 0-10 cm, obedecendo, em média e na maioria das avaliações, à seguinte ordem: $\text{SPD} > \text{GP} = \text{ESC} > \text{AD}$ (Tabela 15). Por outro lado, para a PAEA nas classes 1-2 mm, 0,5-1 e $< 0,5 \text{ mm}$, os maiores valores geralmente foram obtidos para o AD, enquanto que os menores ocorreram para o SPD. Para essas classes de agregados estáveis, os tratamentos GP e ESC apresentaram um comportamento intermediário, não diferindo entre si na média e na maioria das avaliações. Não houve diferenças entre os sistemas de preparo do solo no que se refere à PAEA na classe 2-4 mm, com exceção da

amostragem realizada em 1994. Ou seja, a maior PAEA > 4 mm no SPD em relação aos demais sistemas de preparo foi compensada pela menor PAEA nas classes 1-2 mm, 0,5-1 e < 0,5 mm. O DMP seguiu a mesma tendência observada para a PAEA > 4 mm, de modo que, em média e na maioria das avaliações, os maiores valores ocorreram para o SPD e os menores para o AD, com os tratamentos GP e ESC apresentando um desempenho intermediário, sem diferenças significativas entre si (Figura 6a).

As diferenças entre os sistemas de preparo do solo no que se refere à estabilidade dos agregados foram menos evidentes na camada de 10-20 cm (Tabela 16 e Figura 6b), comparativamente à de 0-10 cm. Embora com pequenas variações entre os anos de amostragem, o tratamento ESC apresentou, em média, maior PAEA > 4 mm (Tabela 16) e DMP (Figura 6b) do que o SPD, porém, ambos não diferiram significativamente do AD e GP. O inverso foi observado para a PAEA nas classes 1-2 mm e 0,5-1,0 mm, onde o SPD apresentou maiores valores do que o ESC, e ambos os tratamentos não diferiram do AD e da GP.

A maior estabilidade dos agregados em água no SPD em relação a sistemas de preparo convencional na camada de 0-10 cm pode ser atribuída, em primeiro lugar, aos teores mais elevados de carbono orgânico (Tabelas 6 a 8 e Figura 2). Isto se deve ao efeito cimentante exercido pela matéria orgânica e pela microbiota associada à mesma (Goldchín et al., 1997), o que resulta no aumento da resistência dos agregados ao rompimento por forças externas, como o tráfego de máquinas, o impacto da gota da chuva e os ciclos de umedecimento/secamento do solo (Dexter, 1988). Maior estabilidade de agregados no SPD em relação a sistemas com intenso revolvimento do solo, em função do aumento no teor de C orgânico, têm sido relatada em diversos trabalhos (Castro Filho et al., 1998; Wendling et al., 2005; Barreto et al., 2009; Tavares Filho et al., 2012). A ausência de fragmentação dos agregados pelo preparo do solo e a maior preservação das raízes, que se constituem em um dos principais agentes para estabilização dos agregados (Goldchín et al., 1997; Silva & Mielniczuk, 1997), são outros fatores que explicam a maior estabilidade dos agregados em água no SPD.

Tabela 15. Distribuição de agregados de solo estáveis em água por classe de diâmetro, determinada na camada de 0-10 cm em diferentes anos, em um Latossolo Vermelho distroférrico submetido a diferentes sistemas de preparo do solo. Embrapa Soja, Londrina/PR, 2013.

Sistema de preparo ⁽¹⁾	Ano					Média
	1986	1991	1994	1998	1999	
----- % -----						
----- > 4 mm -----						
SPD	46,84 a	44,96 a	62,13 a	60,29 a	57,28 a	54,32 a
AD	24,01 b	10,89 d	9,83 c	37,35 b	43,73 b	25,16 c
GP	21,14 b	33,53 b	23,93 b	52,88 a	55,34 a	37,37 b
ESC	22,71 b	25,06 c	27,64 b	41,61 b	49,56 ab	33,32 b
----- 2-4 mm -----						
SPD	17,91 a	11,55 a	17,47 a	15,47 a	20,12 a	16,51 a
AD	16,38 a	9,58 a	10,68 c	15,79 a	23,08 a	15,10 a
GP	16,96 a	13,25 a	13,61 bc	17,77 a	22,26 a	16,77 a
ESC	17,10 a	11,02 a	15,74 ab	16,16 a	22,93 a	16,59 a
----- 1-2 mm -----						
SPD	10,38 b	13,22 a	10,18 b	10,75 b	11,16 b	11,14 c
AD	16,01 a	16,34 a	16,93 a	18,16 a	15,50 a	16,59 a
GP	13,79 ab	13,99 a	15,62 a	12,12 b	9,44 b	12,99 bc
ESC	13,44 ab	14,47 a	18,76 a	17,39 a	13,16 ab	15,44 ab
----- 0,5-1 mm -----						
SPD	22,88 b	14,54 c	7,43 c	8,13 b	7,31 a	12,06 c
AD	36,60 a	28,10 a	29,58 a	16,19 a	10,34 a	24,16 a
GP	36,90 a	16,31 c	19,02 b	9,09 b	6,87 a	17,64 b
ESC	35,43 a	20,78 b	19,58 b	14,24 a	8,63 a	19,74 b
----- < 0,5 mm -----						
SPD	1,99 b	16,75 d	7,73 d	5,35 b	4,12 a	7,19 c
AD	7,01 ab	35,34 a	32,98 a	12,51 a	7,36 a	19,04 a
GP	11,21 a	22,92 c	27,82 b	8,14 ab	6,08 a	15,23 b
ESC	8,59 a	28,67 b	18,28 c	10,60 a	5,72 a	14,37 b

⁽¹⁾ SPD = Sistema plantio direto; AD = preparo convencional com arado de discos + grade leve no verão e grade pesada + grade leve no inverno; GP = preparo convencional com grade pesada + grade leve no verão e no inverno; ESC = preparo mínimo (escarificador + grade leve) no verão e grade pesada + grade leve no inverno. Médias seguidas pela mesma letra nas colunas, dentro de cada ano e classe de diâmetro, não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Tabela 16. Distribuição de agregados de solo estáveis em água por classe de diâmetro, determinada na camada de 10-20 cm em diferentes anos, em um Latossolo Vermelho distroférico submetido a diferentes sistemas de preparo do solo. Embrapa Soja, Londrina/PR, 2013.

Sistema de manejo ⁽¹⁾	Ano					Média
	1986	1991	1994	1998	1999	
----- % -----						
----- > 4 mm -----						
SPD	n.d. ⁽²⁾	18,32 a	17,52 b	29,99 ab	33,04 b	24,72 b
AD	n.d.	9,62 b	18,16 b	36,22 ab	47,93 a	27,98 ab
GP	n.d.	21,18 a	22,05 b	37,81 a	34,83 b	28,97 ab
ESC	n.d.	19,76 a	33,67 a	28,76 b	43,24 a	31,36 a
----- 2-4 mm -----						
SPD	n.d.	12,80 a	17,72 b	18,84 a	21,84 b	17,80 a
AD	n.d.	10,20 a	15,94 b	19,29 a	24,70 ab	17,53 a
GP	n.d.	11,95 a	18,08 b	19,88 a	23,36 ab	18,31 a
ESC	n.d.	11,58 a	24,55 a	19,60 a	25,92 a	20,41 a
----- 1-2 mm -----						
SPD	n.d.	19,50 a	22,99 a	22,55 a	21,92 a	21,74 a
AD	n.d.	19,21 a	23,34 a	20,45 a	14,61 b	19,40 ab
GP	n.d.	18,57 a	23,67 a	19,32 a	20,62 a	20,55 ab
ESC	n.d.	16,52 a	17,97 b	23,04 a	16,27 b	18,45 b
----- 0,5-1 mm -----						
SPD	n.d.	23,12 ab	21,86 a	17,03 a	14,47 a	19,12 a
AD	n.d.	26,46 a	23,46 a	13,89 ab	7,64 b	17,86 a
GP	n.d.	22,42 b	20,05 a	13,20 b	12,65 a	17,08 ab
ESC	n.d.	22,56 b	12,65 b	16,36 ab	9,04 b	15,15 b
----- < 0,5 mm -----						
SPD	n.d.	26,26 b	19,92 a	11,59 a	8,73 a	16,63 a
AD	n.d.	34,50 a	19,10 a	10,14 a	4,65 a	17,10 a
GP	n.d.	25,88 b	16,16 ab	9,80 a	8,55 a	15,10 a
ESC	n.d.	29,58 ab	13,38 b	12,25 a	5,53 a	15,18 a

⁽¹⁾ SPD = Sistema plantio direto; AD = preparo convencional com arado de discos + grade leve no verão e grade pesada + grade leve no inverno; GP = preparo convencional com grade pesada + grade leve no verão e no inverno; ESC = preparo mínimo (escarificador + grade leve) no verão e grade pesada + grade leve no inverno. ⁽²⁾ n.d. = não determinado. Médias seguidas pela mesma letra nas colunas, dentro de cada ano e classe de diâmetro, não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

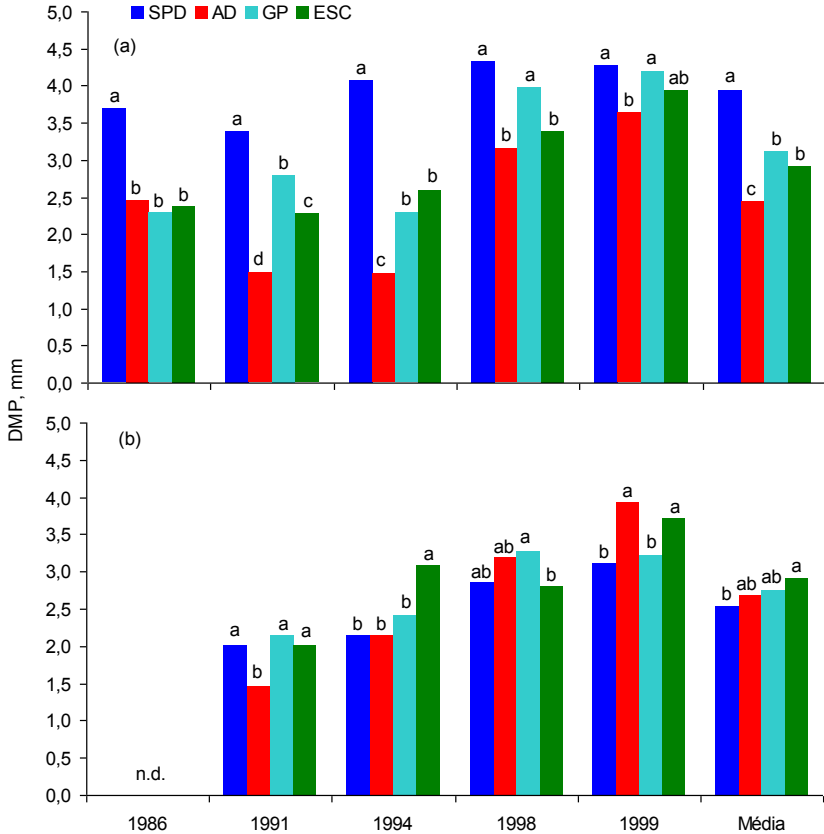


Figura 6. Diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados de solo estáveis em água, determinado nas camadas de 0-10 cm (a) e 10-20 cm (b) em diferentes anos, em um Latossolo Vermelho distroférico submetido a diferentes sistemas de preparo do solo. Embrapa Soja, Londrina/PR, 2013. n.d = não determinado. Médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada ano, não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Em ambas as camadas e para todos os sistemas de preparo, a porcentagem de agregados estáveis em água nas classes > 4 mm e de 2-4 mm aumentou ao longo do tempo, enquanto que, para as classes de agregados < 1 mm, ocorreu o contrário (Tabelas 15 e 16). Já a porcentagem de agregados estáveis na classe de 1-2 mm manteve-se constante no decorrer do tempo. O DMP também aumentou ao longo do tempo independentemente da camada e do sistema de preparo (Figuras 6a e 6b). No caso do SPD, o aumento do tamanho dos agrega-

dos estáveis em água na camada de 0-10 cm pode ser explicado pelo aumento no teor de C orgânico, que passou de 20,1 g kg⁻¹ em 1991 (Tabela 6) para 24,1 g kg⁻¹ em 2004 (Tabela 8), considerando a camada de 0-8 cm. No entanto, em camadas mais profundas que 10 cm, a variação do teor de C em função da época de amostragem foi pequena (Tabelas 6 a 8), de forma que esta variável não explica o aumento na estabilidade dos agregados com o tempo na camada de 10-20 cm no SPD. Assim, a exemplo do discutido anteriormente para a RP, parte do aumento da estabilidade dos agregados no SPD no decorrer do tempo pode ser atribuído ao processo de *age hardening*, descrito por Dexter (1988). De acordo com essa teoria, a ausência de revolvimento do solo aumenta a resistência dos agregados do solo ao longo do tempo em função de dois fatores principais: 1) Rearranjo das partículas para posições de mínima energia livre; e 2) Fortalecimento de ligações já existentes entre as partículas de solo, pela difusão de agentes cimentantes até os pontos de contato das mesmas. Já o aumento do tamanho dos agregados estáveis em água ao longo do tempo nos sistemas com revolvimento de solo pode estar associado à formação de planos de ruptura da massa de solo devido à repetição do preparo do solo. A quebra da massa de solo, ano após ano, seguindo aproximadamente os mesmos planos de ruptura, pode resultar na formação de agregados mais compactados e, dessa forma, mais estáveis.

3.2. Impactos dos sistemas de preparo sobre a produtividade de grãos de soja e trigo

Em dez das 30 safras avaliadas, não houve diferença de produtividade da soja entre os quatro sistemas de preparo avaliados (Tabela 17). Até a 12ª safra, as produtividades de soja não diferiram muito entre os preparos do solo. Nesse período, a produtividade em SPD foi, inclusive, um pouco inferior à observada em AD (Figura 7). Após o início do SPD há uma fase de estabilização, em que as produtividades podem ser inferiores a sistemas de preparo com mobilização do solo (McGregor et al., 2006). Em trabalho desenvolvido por Franchini et al. (2012) em um Latossolo Vermelho distroférrico, verificou-se que a fase de estabilização do SPD foi de seis anos. Nessa fase, que no caso deste traba-

lho teve duração de 12 anos, há aumento gradual do teor de matéria orgânica do solo manejado em SPD, especialmente na camada superficial. A importância da matéria orgânica do solo para a estabilização do SPD pode ser atribuída à melhoria de vários atributos físicos, químicos e biológicos do solo, tais como: formação e estabilização de agregados; aumento da retenção de água; incremento da capacidade de troca de cátions; redução da fitotoxicidade de elementos como o alumínio; e aumento da atividade e diversidade de organismos vivos no solo (Bayer & Mielniczuk, 1999). Cabe salientar que, a partir da nona safra (1989/1990), a produtividade da soja sempre foi igual ou maior no SPD em relação aos demais sistemas de preparo (Tabela 17), demonstrando de forma consistente o benefício agronômico do SPD.

No SPD, a produtividade da soja aumentou abruptamente a partir da 11ª safra, o mesmo ocorrendo no AD (Figura 7). Tal fato é explicado pela mudança de cultivar. No entanto, da 19ª à 30ª safra, a produtividade da soja diminuiu no AD, o que não ocorreu com o uso do SPD. Nesse período, a redução no AD é decorrente da degradação da qualidade do solo. Após 30 safras, a produtividade da soja cultivada em AD foi similar à do início do experimento, cerca de $1,7 \text{ t ha}^{-1}$, ao passo que, em SPD, após 30 safras, a produtividade da soja foi o dobro da observada no início do experimento. Esse aumento de produtividade em SPD pode ser creditado, além do uso de cultivares mais produtivas, ao aumento do teor de C orgânico, à melhoria da estrutura do solo, e da fertilidade, sobretudo teores de P, como discutido anteriormente. Além disso, salienta-se que em SPD as condições para a fixação simbiótica de nitrogênio são mais favoráveis do que em sistemas de preparo com mobilização do solo (Pereira et al., 2007).

Tabela 17. Produtividade da soja em diferentes sistemas de preparo do solo, determinada nas safras entre 1981/1982 a 2010/2011. Embrapa Soja, Londrina/PR, 2013.

Safr	ISNA ⁽¹⁾	Sistema de preparo ⁽²⁾			
		SPD	AD	GP	ESC
----- t ha ⁻¹ -----					
1981/1982	-	2,14 a	1,97 a	2,02 a	2,19 a
1982/1983	-	1,06 a	1,11 a	0,82 a	1,09 a
1983/1984	-	1,98 a	2,12 a	1,88 a	2,24 a
1984/1985	-	0,98 b	1,37 a	1,36 a	1,53 a
1985/1986	-	1,36 b	1,63 a	1,49 ab	1,70 b
1986/1987	-	2,23 a	1,96 a	1,94 a	1,94 a
1987/1988	0,87	1,39 a	1,27 a	1,04 a	1,33 a
1988/1989	0,80	1,50 b	2,17 a	2,09 a	1,69 ab
1989/1990	0,44	1,76 a	1,76 a	1,45 a	1,62 a
1990/1991	0,52	1,84 a	1,84 a	1,52 a	1,69 a
1991/1992	0,41	1,41 a	1,52 a	1,35 a	1,61 a
1992/1993	0,83	1,94 a	1,60 ab	1,32 b	1,61 ab
1993/1994	0,73	2,28 a	1,77 ab	1,48 b	2,05 ab
1994/1995	0,88	2,81 a	2,32 ab	2,16 b	2,57 ab
1995/1996	0,88	3,30 a	2,89 a	2,92 a	2,88 a
1996/1997	0,83	3,21 a	2,44 bc	2,26 c	2,98 ab
1997/1998	0,62	2,06 a	1,92 a	1,60 a	2,02 a
1998/1999	0,84	3,76 a	3,45 ab	3,14 b	3,33 ab
1999/2000	0,67	3,46 a	2,03 b	1,82 b	2,20 b
2000/2001	0,77	3,56 a	3,05 ab	2,93 b	3,11 ab
2001/2002	0,71	2,98 a	2,60 a	1,70 b	2,55 a
2002/2003	0,84	3,22 a	2,50 b	2,66 b	2,40 b
2003/2004	0,53	2,99 a	2,02 b	1,83 b	1,65 b
2004/2005	0,56	3,05 a	2,49 b	2,13 b	2,18 b
2005/2006	0,36	3,11 a	2,00 b	1,75 bc	1,26 c
2006/2007	0,81	3,47 a	2,06 b	1,87 b	1,76 b
2007/2008	0,65	2,59 a	1,21 b	1,11 b	1,02 b
2008/2009	0,63	3,24 a	1,71 b	1,52 b	1,08 b
2009/2010	0,79	3,59 a	2,40 b	2,50 b	1,82 c
2010/2011	0,83	3,31 a	2,08 b	2,12 b	2,40 b

⁽¹⁾ ISNA = índice de satisfação das necessidades de água, calculado para o subperíodo R1-R6. ⁽²⁾ SPD = Sistema plantio direto; AD = preparo convencional com arado de discos + grade leve no verão e grade pesada + grade leve no inverno; GP = preparo convencional com grade pesada + grade leve no verão e no inverno; ESC = preparo mínimo (escarificador + grade leve) no verão e grade pesada + grade leve no inverno. Médias seguidas pela mesma letra nas linhas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

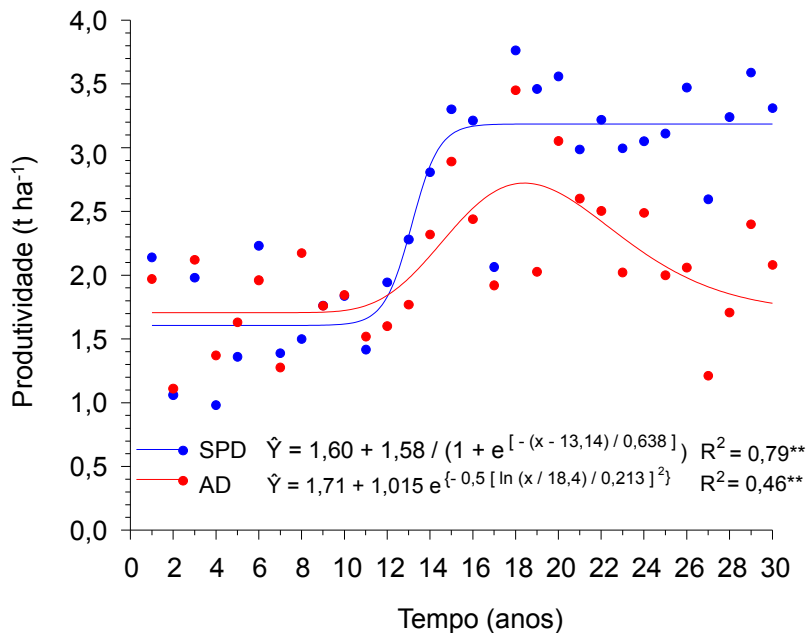


Figura 7. Evolução temporal da produtividade de grãos de soja no sistema plantio direto (SPD) e no sistema de preparo convencional com arado de discos (AD). ** - Regressão não linear estatisticamente significativa (Teste F, $p < 0,01$).

Nas 30 safras, a produção acumulada de grãos de soja foi 23,5 %, 35,5% e 27,0% maior no SPD em relação ao AD, GP e ESC, respectivamente (Figura 8). O SPD propiciou incremento de 240 sacas ha^{-1} de soja em relação ao AD, durante as 30 safras avaliadas, o que corresponde a R\$ 12.000,00 de diferença, considerando preço médio da saca em R\$ 50,00. Esse maior valor de produção, associado à redução de custos de produção propiciadas pelo SPD, confere ganhos expressivos de rentabilidade, o que se reflete na sustentabilidade da cadeia produtiva da soja.

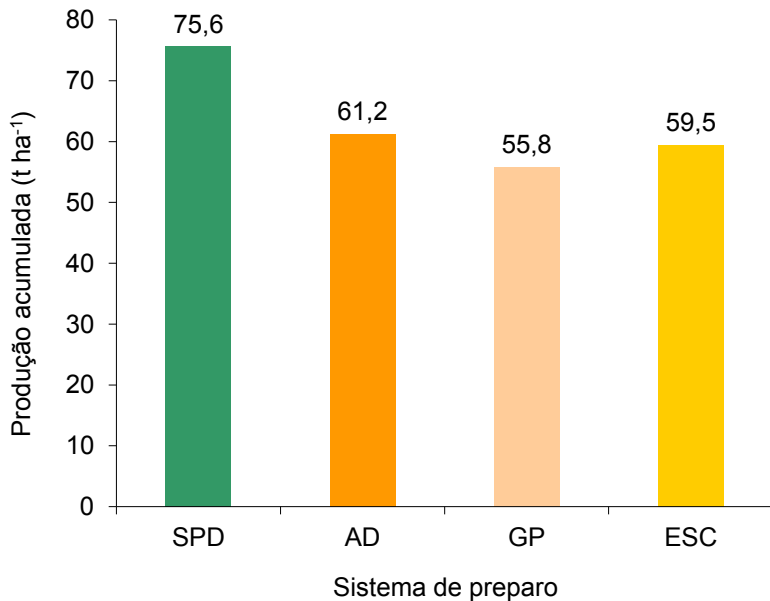


Figura 8. Produção acumulada de soja durante 30 safras, em função do sistema de preparo do solo utilizado. SPD = Sistema plantio direto; AD = preparo convencional com arado de discos + grade leve no verão e grade pesada + grade leve no inverno; GP = preparo convencional com grade pesada + grade leve no verão e no inverno; ESC = preparo mínimo (escarificador + grade leve) no verão e grade pesada + grade leve no inverno.

Nos sistemas de preparo com AD, GP e ESC, houve tendência de aumento da produtividade da soja com o aumento do Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA), calculado para o período que vai do estádio R1 (início do florescimento) até o estádio R6 (grão completamente cheio) (Figura 9). Nesses sistemas de preparo, houve forte dependência da disponibilidade hídrica no período reprodutivo para alcance de produtividades satisfatórias. No entanto, no caso do SPD, não houve relação significativa entre a produtividade e o ISNA, demonstrando maior estabilidade da produção no período avaliado. Enquanto que no sistema ESC a redução de 0,1 no ISNA ocasionou redução de produtividade de 372 kg ha⁻¹, no SPD essa redução foi de apenas 138 kg ha⁻¹. Além disso, as diferenças na produtividade de grãos entre o SPD e os demais sistemas de preparo aumentaram com a redução da disponibilidade hídrica às plantas, expressa por valores de ISNA mais baixos.

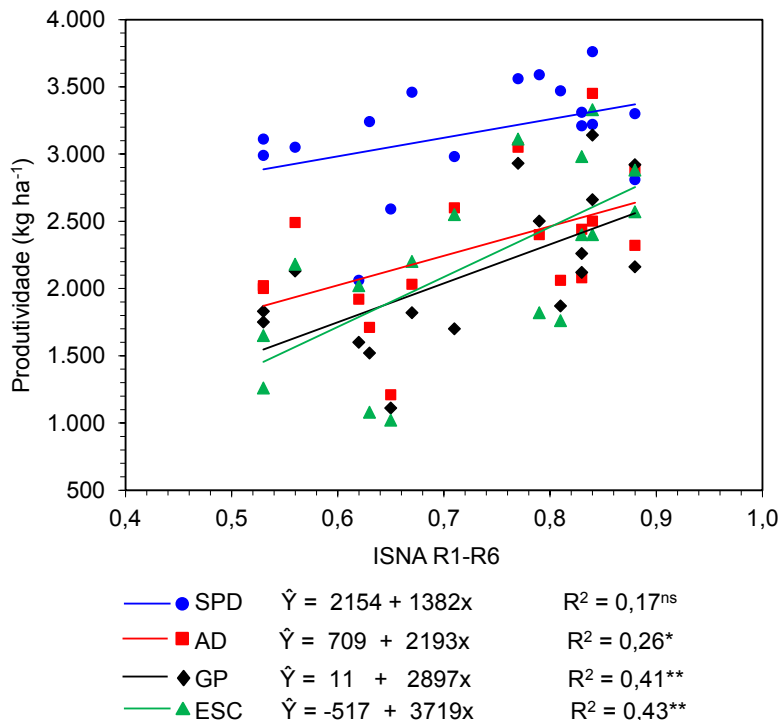


Figura 9. Relação entre a produtividade de grãos da soja e o índice de satisfação das necessidades de água (ISNA) calculado para o subperíodo R1-R6, em função do sistema de preparo do solo utilizado. SPD = Sistema plantio direto; AD = preparo convencional com arado de discos + grade leve no verão e grade pesada + grade leve no inverno; GP = preparo convencional com grade pesada + grade leve no verão e no inverno; ESC = preparo mínimo (escarificador + grade leve) no verão e grade pesada + grade leve no inverno. * - Equação estatisticamente significativa (Teste F, $p < 0,05$); ** - Equação estatisticamente significativa (Teste F, $p < 0,01$); ^{ns} - equação não significativa.

Os efeitos dos diferentes sistemas de preparo sobre o desenvolvimento da soja em uma safra com ocorrência de déficit hídrico durante todo o ciclo da cultura podem ser visualizados na Figura 10. De acordo com esta Figura, fica evidente o melhor desenvolvimento da soja nas parcelas manejadas sob SPD em relação aos demais sistemas de preparo do solo, inclusive em relação ao ESC, cuja intensidade de revolvimento é menor. Especificamente para a safra 2008/2009, o SPD resultou na produção de 30 sacas por ha a mais em relação à média dos outros sistemas de preparo, o que corresponde a uma produtividade 2,2 vezes maior no SPD.



Figura 10. Aspecto visual da cultura da soja na safra 2008/2009 (cultivar BRS 184), em função dos diferentes sistemas de preparo do solo.

O principal fator responsável pela maior estabilidade de produção do SPD em diferentes disponibilidades hídricas é a melhor estrutura do solo nesse sistema, propiciando maior retenção de água e melhores condições para a absorção desta pelas plantas. Em razão do menor revolvimento do solo em SPD, há preservação dos bioporos, que possuem papel fundamental na movimentação de água e ar no solo (Oades, 1993). Adicionalmente, a presença de palha sobre o solo em SPD, associada à melhor estrutura do solo, propicia redução de perdas de água via erosão. Em outro experimento conduzido na Fazenda Experi-

mental da Embrapa Soja, a capacidade de infiltração de água no solo na camada de 0-10 cm foi de 58 mm h⁻¹ para o SPD com 24 anos de condução, enquanto que, no preparo convencional com grade pesada, esse valor foi reduzido em quase 50% (30 mm h⁻¹) (Moraes, 2013). Nesse sentido, o uso adequado do SPD é muito relevante na amenização das perdas de produtividade de grãos ocasionadas pela seca, muito comuns em várias regiões do Brasil. Isso demonstra a importância do SPD para a competitividade da soja brasileira, além dos benefícios ambientais propiciados por este.

Em oito das 22 safras de trigo avaliadas, não houve diferença de produtividade entre os quatro sistemas de preparo avaliados (Tabela 18). Diferentemente da soja, ao longo do tempo de avaliação, a produtividade do trigo foi similar entre os sistemas de preparo do solo. Neste sentido, a Figura 11 mostra o aspecto uniforme da cultura do trigo no experimento na safra de 2007, reforçando a similaridade entre os sistemas de preparo. Na Figura 12, verifica-se que a produtividade do trigo no SPD apresentou um pequeno aumento ao longo do tempo, enquanto que, no AD, a produtividade não variou significativamente em função do tempo de condução experimental. Dessa forma, a produtividade do trigo, que inicialmente era um pouco superior no AD em relação ao SPD, tornou-se igual a partir 20^a safra.

Tabela 18. Produtividade de trigo em diferentes sistemas de preparo, determinada nas safras entre 1989/1990 a 2010/2011. Embrapa Soja, Londrina/PR, 2013.

Safr	Sistema de preparo ⁽¹⁾			
	SPD	AD	GP	ESC
----- t ha ⁻¹ -----				
1989	2,41 a	2,17 ab	2,07 b	2,20 ab
1990	1,75 a	2,02 a	1,85 a	2,02 a
1991	1,62 b	1,99 a	1,86 ab	1,88 ab
1992	(2)	(2)	(2)	(2)
1993	2,33 a	2,13 ab	1,79 b	1,90 b
1994	(2)	(2)	(2)	(2)
1995	2,24 a	2,14 a	1,92 a	2,13 a
1996	2,10 a	1,93 ab	1,63 bc	1,31 c
1997	2,41 b	2,92 a	2,76 a	2,98 a
1998	2,31 a	2,42 a	2,21 a	2,22 a
1999	2,42 b	2,76 a	2,60 ab	2,82 a
2000	1,67 b	2,18 a	2,00 ab	2,02 a
2001	2,80 b	3,10 ab	2,96 ab	3,22 a
2002	1,31 a	1,33 a	1,00 a	1,17 a
2003	3,29 a	3,14 a	3,03 a	3,27 a
2004	2,72 a	2,79 a	2,68 a	2,91 a
2005	2,54 a	2,26 ab	2,16 b	2,29 ab
2006	1,98 a	1,81 ab	1,49 b	1,75 ab
2007	3,34 bc	3,71 a	3,25 c	3,64 ab
2008	2,60 a	2,43 a	2,47 a	2,56 a
2009	1,99 a	1,97 a	2,01 a	1,95 a
2010	3,50 a	3,50 a	3,11 b	3,47 a

⁽¹⁾ SPD = Sistema plantio direto; AD = preparo convencional com arado de discos + grade leve no verão e grade pesada + grade leve no inverno; GP = preparo convencional com grade pesada + grade leve no verão e no inverno; ESC = preparo mínimo (escarificador + grade leve) no verão e grade pesada + grade leve no inverno. ⁽²⁾ Perda total de produção devido à ocorrência de seca. Médias seguidas pela mesma letra nas linhas não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).



Figura 11. Aspecto visual do trigo (cultivar BRS 208) na safra 2007, mostrando a uniformidade da cultura em todo o experimento.

A ausência de ganhos em produtividade do trigo no SPD pode ser explicada em parte pela maior imobilização de N no SPD em relação a sistemas de preparo com mobilização do solo (Hungria et al., 2009), reduzindo a disponibilidade desse nutriente ao trigo. Esse fato foi agravado pela ausência de adubação nitrogenada de cobertura no trigo e pelo uso de baixas doses de N na base, iguais ou inferiores a 20 kg ha^{-1} . No caso da soja, o efeito de imobilização de N em SPD foi inexpressivo em decorrência da fixação biológica de N. Em face dessa situação, a produção acumulada de grãos de trigo nas 22 safras avaliadas foi, inclusive, um pouco menor no SPD em relação aos sistemas AD e ESC (Figura 13). Nesse contexto, o SPD apresentou maior impacto na produtividade da soja do que no trigo. Em trabalho conduzido por Franchini et al. (2012), também verificou-se menores benefícios do SPD em trigo e milho, comparativamente à soja.

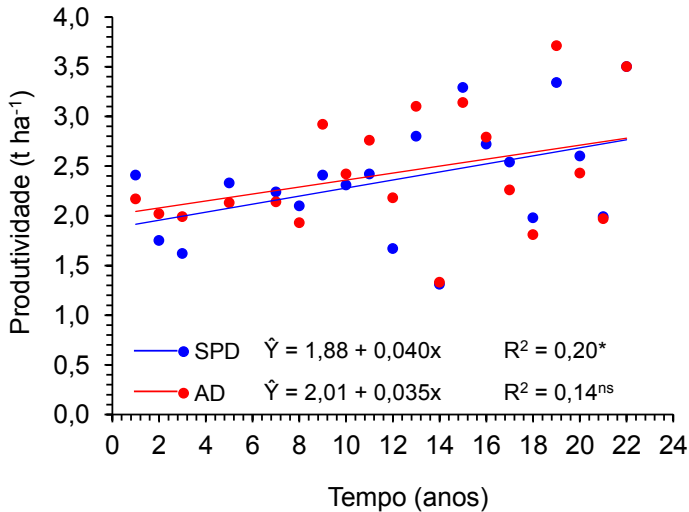


Figura 12. Evolução temporal da produtividade de grãos de trigo no sistema plantio direto (SPD) e no sistema de preparo convencional com arado de discos (AD). * - Equação estatisticamente significativa (Teste F, $p < 0,05$); ^{ns} - equação não significativa.

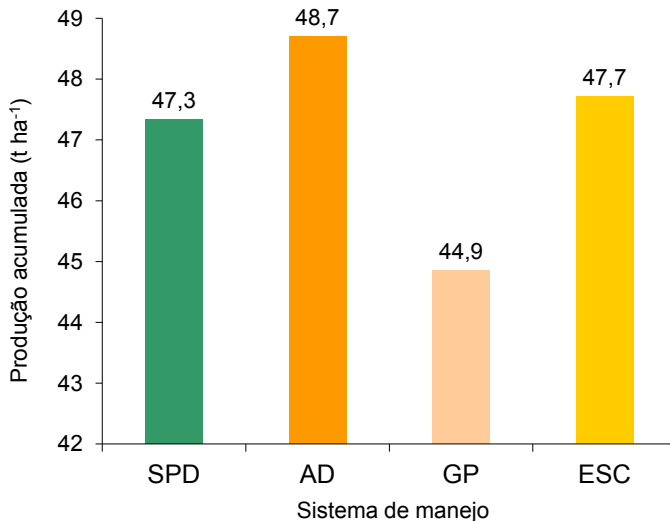


Figura 13. Produção acumulada de trigo durante 22 safras, em função do sistema de preparo do solo utilizado. SPD = sistema plantio direto; AD = preparo convencional com arado de discos + grade leve no verão e grade pesada + grade leve no inverno; GP = preparo convencional com grade pesada + grade leve no verão e no inverno; ESC = preparo mínimo (escarificador + grade leve) no verão e grade pesada + grade leve no inverno.

4. Considerações finais

Durante 30 anos de pesquisa em um Latossolo Vermelho distroférrico, com alto teor de argila, os sistemas de preparo do solo afetaram significativamente vários atributos químicos e físicos do solo e, conseqüentemente, o desempenho produtivo das culturas de soja e trigo. O SPD proporcionou maiores teores de vários nutrientes e de carbono orgânico, especialmente na camada superficial do solo, em relação aos demais sistemas de preparo. As alterações nos atributos químicos do solo foram intensificadas com o passar do tempo. É importante ressaltar ainda que, mesmo com a aplicação superficial de calcário ao longo do tempo, a acidez do solo, os teores de Ca e Mg, e a saturação por bases em camadas subsuperficiais do SPD mantiveram-se em níveis similares aos demais sistemas de preparo e adequados ao desenvolvimento das plantas de soja e trigo.

No SPD houve maior resistência mecânica do solo à penetração e menor macroporosidade nas camadas superficiais, comparativamente aos sistemas de preparo com revolvimento. Todavia, esse aumento no estado da compactação do solo não se refletiu em redução de produtividade das culturas avaliadas. No caso da soja ocorreu o inverso, pois com o decorrer dos anos, houve incrementos expressivos na produtividade em SPD. Enfatiza-se que os benefícios do SPD sobre a produtividade de grãos de soja foram mais evidentes em safras com restrição hídrica no período reprodutivo da cultura. Isso retrata a importância da adequada condução do SPD para minimizar a variabilidade da produtividade da soja em diferentes safras.

Nos primeiros anos de condução experimental, as produtividades em SPD foram um pouco menores do que em sistemas com revolvimento, indicando que o solo manejado em SPD sob sucessão trigo-soja necessita de um período de cerca de 12 anos para formar a estrutura adequada ao crescimento das raízes. Esse período poderia ser reduzido para 5 a 6 anos com o uso de sistemas de culturas mais diversificados, conforme detectado em outros estudos. De qualquer forma, pesquisas que visam detectar efeitos de preparos do solo sobre os seus atributos

e sobre as produtividades de diferentes culturas devem ser conduzidas por longo prazo para que os resultados sejam de fato relevantes. Na presente pesquisa, é necessário salientar que os efeitos dos preparos do solo foram mais evidentes na soja do que no trigo.

Nesses 30 anos de pesquisa, ficou evidente que os valores de referência de atributos físicos do solo, sobretudo resistência mecânica à penetração, considerados ideais para o desempenho de culturas em preparos com revolvimento do solo, não se ajustam ao SPD. Isso aponta a necessidade de aprofundamento das pesquisas focadas em indicadores de qualidade do solo considerando as peculiaridades do SPD.

Nesse contexto, o SPD teve e terá papel fundamental para a sustentabilidade da agricultura brasileira, a qual necessita conciliar aspectos econômicos, ambientais e sociais.

5. Agradecimentos

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo apoio financeiro à organização e sistematização dos dados do experimento (projeto 562453/2010-5).

Aos funcionários da equipe de Manejo do Solo e da Cultura da Embrapa Soja, Eliseu Custódio de Souza, Luiz Gustavo Garbelini, Donizete Aparecido Loni, Mariluci da Silva Pires, João Ribeiro de Macedo, Agostinho Aparecido da Silva, Antonio Aparecido Jacobino, Ildefonso Acosta Carvalho, Everson Balbino e Esmael Lopes dos Santos pelo empenho e responsabilidade demonstrados na coleta dos dados e condução do experimento que originou este trabalho.

6. Referências

ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo em sistema plantio direto. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. de; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.).

Fertilidade do solo. Viçosa: SBCS, 2007. p.873-928.

BABUJIA, L.C.; HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J.C.; BROOKES, P.C. Microbial biomass and activity at various soil depths in a Brazilian oxisol after two decades of no-tillage and conventional tillage. **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v.42, p.2174-2181, 2010.

BARRETO, R. C.; MADARI, B. E.; MADDOCK, J. E. L.; MACHADO, P. L. O. A.; TORRES, E.; FRANCHINI, J.; COSTA, A.R. The impact of soil management on aggregation, carbon stabilization and carbon loss as CO₂ in the surface layer of a Rhodic Ferralsol in Southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 132, 2009, p. 243-251.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 9-26.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A.; DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 86, p. 237-245, 2006.

BISCAIA, R. M. **Influência da intensidade de movimentação do solo no processo erosivo, com uso de simulador de chuva, em Latossolo Vermelho Escuro dos Campos Gerais, no Paraná**. 1977. 57f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Hidrologia Aplicada, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1977.

BODDEY, R.M.; JANTALIA, C.P.; CONCEIÇÃO, P.C.; ZANATTA, J.A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; DIECKOW, J.; DOS SANTOS, H.P.; DENARDIN, J.E.; AITA, C.; GIACOMINI, S.; ALVES, B.J.R.;

URQUIAGA, S. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture. **Global Change Biology**, Oxford, v.16, p.784-795, 2010.

CASSOL, L.C. **Relação solo-planta-animal num sistema de integração lavoura-pecuária em semeadura direta com calcário na superfície**. 2003. 157 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, 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, MG, v. 22, p. 527-538, 1998.

CONAB. **Séries históricas** – Soja. Disponível em: < http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=2&Pagina_objcmsconteudos=3#A_objcmsconteudos>. Acesso em: 08/08/2013.

COSTA, S. E. V. G. A.; SOUZA, E. D.; ANGHINONI, I.; FLORES, J. P. C.; VIEIRA, F.C.B.; MARTINS, A.P.; FERREIRA, E.V.O. Patterns in phosphorus and corn root distribution and yield in long-term tillage systems with fertilizer application. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, n. 109, p.41–49, 2010.

DE'ATH, G. Multivariate regression trees: a new technique for modeling species–environment relationships. **Ecology**, Tempe, v.83, p.1105-1117, 2002.

DENARDIN, K. E.; KOCHHANN, R. A.; FLORES, C. A.; FERREIRA, T. N.; CASSOL, E. A.; MONDARDO, A.; SCHWARZ, R. A. Evolução do sistema plantio direto no Rio Grande do Sul. In: DENARDIN, K. E.; KOCHHANN, R. A.; FLORES, C. A.; FERREIRA, T. N.; CASSOL, E. A.; MONDARDO, A.; SCHWARZ, R. A. **Manejo da enxurrada em sistema plantio direto**. Porto Alegre: Fórum Estadual de Solo e Água, 2005. p. 23-36.

DENARDIN, K. E.; KOCHHANN, R. A.; FLORES, C. A.; FERREIRA, T. N.; CASSOL, E. A.; MONDARDO, A.; SCHWARZ, R. A. Energia da gota de chuva e da enxurrada. In: DENARDIN, K. E.; KOCHHANN, R. A.; FLORES, C. A.; FERREIRA, T. N.; CASSOL, E. A.; MONDARDO, A.; SCHWARZ, R. A. **Manejo da enxurrada em sistema plantio direto**. Porto Alegre: Fórum Estadual de Solo e Água, 2005. p. 37-42.

DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, p. 199-238, 1988.

DIAS JUNIOR, M. S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 1, p. 175-182, 1996.

DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D. P.; KÖGEL-KNABNE, I. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilization. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 268, p. 319-328, 2005.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (Ed.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: SSSA, 1994. p.1-20. (Special, 35).

EHLERS, W.; KOPKE, F.; HESSE, F.; BOHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 3, n. 3, p. 261-275, 1983.

ELTZ, F. L. F.; PEIXOTO, R. T. G., JASTER, F. Efeito de sistemas de preparo de solo nas características físicas e químicas de um Latossolo Bruno Álico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 12, p. 259-267, 1989.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos e análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: CNPS, 1997. 212p.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: SNLCS, 1979. Não paginado.

FARIAS, J .R. B.; ASSAD, E. D.; ALMEIDA, I. R.; EVANGELISTA, B. A.; LAZZAROTTO, C.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L. Caracterização de risco climático nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, p. 415-421, 2001.

FLORES, J. P. C. **Atributos físicos e químicos do solo e rendimento de soja sob integração lavoura-pecuária em sistemas de manejo**. 102 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Faculdade de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-RS, 2008.

FOREST, F. **Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales**. Présentation et utilisation du logiciel BIP. Irat-Cirad, Montpellier, 1984, 63 p.

FRANCHINI, J. C.; CRISPINO, C. C.; SOUZA, R. A.; TORRES, E.; HUNGRIA, M. Microbiological parameters as indicators of soil quality under various soil management and crop rotation systems in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, p. 18-29, 2007.

FRANCHINI, J.C.; DEBIASI, H.; BALBINOT JUNIOR, A.A.; TONON, B.C.; FARIAS, J.R.B.; OLIVEIRA, M.C.N.; TORRES, E. Evolution of crop yields in different tillage and cropping systems over two decades in Southern Brazil. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.137, p.178-185, 2012.

GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho e produtividade de culturas cultivadas em sucessão e rotação. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 1 p. 65-73, 2009.

GOLDCHIN, A.; BALDOCK, J. A.; OADES, J. M. A model linking organic matter decomposition, chemistry, an aggregate dynamics. In:

LAL, R.; KIMBLE, J. M.; FOLLET, R. F.; STEWART, B. **Soil process and the carbon cycle**. Boca Raton: CRC Press, 1997. p. 245-266.

GONÇALVES, S. L.; SARAIVA, O. F.; FRANCHINI, J. C.; TORRES, E. **Decomposição de resíduos de milho e soja em função do tempo e do manejo do solo**. Londrina: Embrapa Soja, 2010. 19 p. (Embrapa Soja. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 23).

HERNANI, L. C.; KURIHARA, C. H.; SILVA, W. M. Sistemas de manejo de solo e perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, p. 145-154, 1999.

HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J.C.; BRANDÃO-JUNIOR, O.; KASCHUK, G.; SOUZA, R.A. Soil microbial activity and crop sustainability in a long-term experiment with three soil-tillage and two crop-rotation systems. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v.42, p.288-296, 2009.

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

KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, K. E.; FLORES, C. A.; FERREIRA, T. N.; CASSOL, E. A.; MONDARDO, A.; SCHWARZ, R. A. Ação da enxurrada em declives acentuados e longos. In: DENARDIN, K. E.; KOCHHANN, R. A.; FLORES, C. A.; FERREIRA, T. N.; CASSOL, E. A.; MONDARDO, A.; SCHWARZ, R. A. **Manejo da enxurrada em sistema plantio direto**. Porto Alegre: Fórum Estadual de Solo e Água, 2005. p. 43-54.

LANDERS, J. N. **Histórico, características e benefícios do plantio direto**. Brasília: ABEAS; Universidade de Brasília/Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2005. 113 p.

LIPIEC, J.; ARVIDSSON, J.; MURER, E. Review of modeling crop growth, movement of water and chemicals in relation to topsoil and subsoil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 73, p. 145-170, 2003.

McGREGOR, K. C.; CULLUM, R. F.; MUTCHLER, C.K., JOHNSON, J. R. **Long-term no-till an conventional-till soybean yields (1983-1999)**. Mississippi State: MAFES. 2006. Não paginado. (MAFES. Bulletin, 1146).

MIELKE, P.W., Jr. The application of multivariate permutation methods based on distance functions in the earth sciences. **Earth-Science Reviews**, Amsterdam, v.31, p.55-71, 1991.

MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 1-8.

MIELNICZUK, J. Manejo conservacionista da adubação potássica. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 2005. p.165-178.

MONDARDO, A.; BISCAIA, R. M. Controle da erosão. In: IAPAR. **Plantio direto no Estado do Paraná**. Londrina: Fundação Instituto Agrônômico do Paraná, 1981. p. 33-42.

MORAES, M. T. **Qualidade física do solo sob diferentes tempos de adoção e de escarificação do sistema plantio direto e sua relação com a rotação de culturas**. 2013. 205 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, 2013.

OADES, J.M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. **Geoderma**, Amsterdam, v.56, p.377-400, 1993.

OLIVEIRA JUNIOR, A.; CASTRO, C.; KLEPKER, D. OLIVEIRA, F.A. Soja. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: culturas**. Piracicaba: IPNI – Brasil, 2010. v. 3, cap 1, p. 1-38.

PALADINI, F. L. S.; MIELNICZUK, J. Distribuição de tamanho de agregados de um solo Podzólico Vermelho-Escuro afetado por sistemas de culturas. **Revista Brasileira Ciência Solo**, Viçosa, MG, v. 15, p. 135-140, 1991.

PEREIRA, A. A.; HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; KASCHUK, G.; CHUEIRE, I. M. O.; CAMPO, R. J.; TORRES, E. Variações qualitativas e quantitativas na microbiota do solo e na fixação biológica do nitrogênio sob diferentes manejos com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.31, p.1397-1412, 2007.

RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J.; LUPATINI, G. C.; SANTOS, E. J. S. Modificações em atributos químicos de solo arenoso sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, p. 715-723, 1998.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, D. J.; SILVA, V. R. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 1, p.58-64, 2009.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 21, p. 113-117, 1997.

SISTI, C.; P. J.; SANTOS, H. P.; KOCHANN, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, p.39-58, 2004.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V. Recomendação para o uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf. **STAB-Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.1, n.3, 1983.

TAVARES FILHO, J.; FELTRAN, C. T. M.; OLIVEIRA, J. F.; ALMEIDA, E.; GUIMARÃES, M. F. Atributos de solo determinantes para a estimativa do índice de estabilidade de agregados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília: DF., v. 47, p. 436-441, 2012.

TORRES, E.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J.C.; SARAIVA, O.F.; ALMEIDA, A.M.R. Manejo do solo na prevenção de doenças radiculares. In: ALMEIDA, A.M.R.; SEIXAS, C.D.S. (Ed.) **Soja: doenças radiculares e de hastes e inter-relações com o manejo do solo e da cultura**. Embrapa Soja: Londrina, 2010. p. 207-279.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Embrapa Soja, 1999. 58 p. (Embrapa Soja. Circular Técnica, 23).

TULLBERG, J. N. Wheel traffic effects on tillage draught. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Londron, v. 75, p. 375-382, 2000.

VOLK, L. B. S.; COGO, N. P.; STRECK, E. V. Erosão hídrica influenciada por condições físicas de superfície e subsuperfície do solo resultantes do seu manejo, na ausência de cobertura vegetal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, p. 763-774 , 2004.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J. C. L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília: DF, v.40, p.487-494, 2005.

YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal of the American Society of Agronomy**, Washington, v. 28, p. 337-351, 1936

Embrapa

Soja