

Estratificação química e física em solos manejados com sistema plantio direto em Mato Grosso

Entraves à produção das culturas



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

DOCUMENTOS 7

Estratificação química e física em solos manejados com sistema plantio direto em Mato Grosso

Entraves à produção das culturas

*Silvio Tulio Spera
Ciro Augusto de Souza Magalhães
José Eloir Denardin
Cornélio Alberto Zolin
Eduardo da Silva Matos
Luís Gonzaga Chitarra
Luciano Shozo Shiratsuchi*

Embrapa Agrossilvipastoril
Sinop, MT
2018

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Agrossilvipastoril
Rodovia MT-222, Km 2,5, C.P. 343
CEP 78550-970 Sinop, MT
Fone: (66) 3211-4220
Fax: (66) 3211-4221
www.embrapa.br
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações
da Unidade Responsável

Presidente
Flávio Fernandes Júnior

Secretária-Executiva
Fernanda Satie Ikeda

Membros
Aisten Baldan, Alexandre Ferreira do Nascimento, Daniel Rabelo Ituassú, Dulândula Silva Miguel Wruck, Eulalia Soler Sobreira Hoogerheide, Jorge Lulu, Rodrigo Chelegão, Vanessa Quitete Ribeiro da Silva

Supervisão Editorial
Renato da Cunha Tardin Costa

Normalização bibliográfica
Aisten Baldan

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica
Propagare

Foto da capa
Silvio Tulio Spera

1ª edição
Publicação digitalizada (2018)

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 Agrossilvipastoril

Spera, Silvio Tulio

Estratificação química e física em solos manejados com sistema plantio direto em mato grosso - entraves à produção das culturas / Silvio Tulio Spera... [et al.]. – Sinop, MT: Embrapa, 2018.

PDF (34 p.) : il. color.; 21cm. – (Documentos / Embrapa Agrossilvipastoril, ISSN 2359-6600; 7).

1. Plantio direto. 2. Manejo do solo. 3. Estratificação química. I. Spera, Silvio Tulio. II. Magalhães, Ciro Augusto de Souza. III. Denardin, Jose Eloir. IV. Zolin, Cornélio Alberto. V. Matos, Eduardo da Silva. VI. Chitarra, Luís Gonzaga. VII. Shiratsuchi, Luciano Shozo. VIII. Embrapa Agrossilvipastoril. IX. Título. X. Série

CDD 631.58

Autores

Silvio Tulio Spera

Engenheiro agrônomo, doutor em Agronomia, pesquisador, Embrapa Agrossilvipastoril

Ciro Augusto de Souza Magalhães

Engenheiro agrícola, doutor em Ciência do Solo, pesquisador, Embrapa Agrossilvipastoril

José Eloir Denardin

Engenheiro agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador, Embrapa Trigo

Cornélio Alberto Zolin

Engenheiro agrícola, doutor em Irrigação e Drenagem, pesquisador, Embrapa Agrossilvipastoril

Eduardo da Silva Matos

Engenheiro agrônomo, doutor em Ciências Naturais, pesquisador, Secretaria de Inteligência e Relações Estratégicas da Embrapa Sede

Luís Gonzaga Chitarra

Engenheiro agrônomo, doutor em Fitopatologia, pesquisador, Embrapa Algodão

Luciano Shozo Shiratsuchi

Engenheiro agrônomo, doutor em ciência do Solo, professor associado, Louisiana State University

Sumário

Introdução	5
Caracterização da estratificação química do perfil do solo	7
Caracterização da estratificação física no perfil cultural do solo.....	11
Prejuízos advindos da estratificação física do perfil solo	17
Aeração do solo e o desenvolvimento de plantas.....	18
Redução na infiltração e permeabilidade da água no solo	20
Reduções no rendimento de culturas causadas pela combinação de efeitos da estratificação química e física do solo	21
Problemas advindos da estratificação física e química do solo	23
Amostragem do solo em perfis estratificados	24
Considerações finais	26
Referências	27

Introdução

Os solos de Mato Grosso são utilizados de forma intensiva com a agricultura baseada em mecanização e uso de fertilizantes químicos, corretivos e pesticidas. Sem o uso de fertilizantes e corretivos a agricultura nesses solos seria impraticável, o fator limitante fertilidade química do solo foi o primeiro a ser mitigado por ações de pesquisa agropecuária (Sousa; Lobato, 2004). Apesar do elevado nível tecnológico da agricultura mato-grossense, nos últimos anos as lavouras do estado vêm mostrando índices de produtividade agrícola aquém do seu potencial e abaixo de outros estados brasileiros (Tabela 1).

Tabela 1. Rendimento médio de culturas anuais de verão e safrinha (ou de inverno) em vários estados brasileiros na safra de 2012/2013.

Cultura	2000	2010	2020						
Milho	5.709 ¹	5.204 ¹	4.638 ¹	6.741	6.179	5.523	5.578	5.541	3.133
Soja	3.129	2.534	2.793	3.145	2.989	2.763	2.453	2.392	1.430
Sorgo	2.759 ¹	3.182 ¹	589 ¹	3.330 ¹	3.549	2.663	-	-	2.266
Feijão	1.342 ¹	1.643	559	2.393 ²	1.541	1.970	1.411	1.371	1.062
Girassol	1.686	999 ¹	868 ⁺	1.525	1.412	682 ¹	2.070	2.010	1.959
Algodão	3.849 ¹	3.573	3.172	3.659	3.407	3.169	1.439	-	-
Arroz	3.222	6.408 ²	1.696	3.121	2.044	4.350	4.659	7.398 ²	7.405 ²

Legenda: 1 safrinha; 2 irrigado.

Fonte: IBGE, 2018

Pelos dados da Tabela 2, observa-se que os rendimentos dos principais cultivos agrícolas de Mato Grosso, nos últimos oito anos têm se mostrado estagnados. O manejo inadequado da fertilidade química e física dos solos agrícolas mato-grossenses pode ser parte da causa desses rendimentos abaixo do potencial (Chagas, 2004; Nobre, 2008; Batistão et al., 2009; Magalhães et al., 2009; Kappes, 2015).

Com a disseminação do sistema plantio direto (SPD), a estrutura dos horizontes superficiais do perfil do solo deixou de ser recorrentemente homogênea pela aração e gradagem. O condicionamento do solo, objetivando promover o desenvolvimento das plantas, passou a depender da estrutura desenvolvida pela biota do solo, bem como da deposição de fertilizantes junto à

Tabela 2. Rendimento médio de culturas anuais de verão e safrinha no estado de Mato Grosso.

Cultura	Rendimentos médios de grãos na safra ano (kg ha ⁻¹)							
	2006 / 2007	2007 / 2008	2008 / 2009	2009 / 2010	2010 / 2011	2011 / 2012	2012 / 2013	2013 / 2014
Soja	2.702	3.123	3.053	3.032	3.219	3.014	3.129	3.110
Milho	3.688	4.333	5.000	4.421	3.889	6.240	5.709	5.780
Algodão	4.010	3.997	2.667	3.500	3.429	3.714	3.849	3.825

Fonte: IMEA, 2012, IBGE, 2018; ACOMPANHAMENTO..., 2013.

linha de semeadura ou nos primeiros centímetros da superfície, decorrentes do manejo do solo e de culturas praticado ao longo das safras agrícolas. Em decorrência, o horizonte superficial do perfil do solo tornou-se a se diferenciar, extinguindo a camada arável e, por consequência, a homogeneidade do solo nela estabelecida pela aração e gradagem recorrentes. A estratificação da camada arável em distintos horizontes, tanto na camada de 0 a 20 cm quanto na de 0 a 10 cm, resultante da atividade da biota do solo e da supressão da incorporação de fertilizantes ao solo, passou a comprometer o modelo de avaliação da fertilidade em seu fator mais precípuo e fundamental, qual seja, a homogeneidade do solo a ser amostrado e submetido ao processo analítico vigente, destinado a avaliar a fertilidade (Denardin et al., 2007; Denardin; Denardin, 2015).

A avaliação da fertilidade de solos manejados sob os preceitos da agricultura conservacionista, que preconiza a minimização ou supressão de mobilizações de solo, requer modelagem de maior abrangência que a habitual, expressa apenas por indicadores de natureza química. Armazenamento e disponibilidade de água, armazenamento e difusão de calor, fluxo de oxigênio, permeabilidade ao ar e a água e resistência mecânica à penetração de raízes são propriedades dependentes da estrutura do solo e constituem em elementos indissociáveis da fertilidade, quando o revolvimento é suprimido ou restrito à linha de semeadura. Como a estrutura de solos manejados com SPD é determinante das propriedades físicas do solo que interferem nos atributos químicos do solo, a acepção do termo fertilidade do solo requer a interação das faces biológica, física e química e não mais, simplesmente à expressão de indicadores pertinentes a aspectos de natureza química, estruturados pelo atual modelo de avaliação da fertilidade. Na aplicação do atual modelo de avaliação da fertilidade, em solos manejados com SPD, os atributos químicos, indicadores da

fertilidade, obtidos a partir de amostras de solo coletadas nas camadas de 0 a 20 cm ou de 0 a 10 cm, constituem valores não representativos, pois, em razão da extinção da camada arável e da homogeneidade da camada amostrada, resultam da miscigenação de valores estratificados nos diferentes horizontes que compõem a camada amostrada (Denardin; Denardin, 2015).

A calagem ainda é a principal prática utilizada para a correção química da acidez do solo e da neutralização do alumínio. Ocorre que a ação desses corretivos é restrita ao local ou camada de aplicação, ainda que, alguns estudos indiquem que pode ocorrer a mobilização do calcário em profundidade. Resíduos vegetais na superfície do solo, em função da liberação de compostos orgânicos hidrossolúveis de baixo peso molecular, poderiam afetar a mobilidade do calcário no perfil do solo, sendo essa mobilidade esta variável de acordo com as espécies de plantas (Franchini et al., 2001).

Caracterização da estratificação química do perfil do solo

Quando amostras de solo são coletadas de forma estratificada, não raro são encontrados resultados como os apresentados na Tabela 3, onde amostras foram retiradas de uma área em que a adubação foi feita a lanço, na superfície. Pode se constatar na camada de 0 a 5 cm valores muito maiores que nas demais, principalmente de P, K e Ca. O acúmulo de matéria orgânica nessa camada é normal para um solo manejado com sistema plantio direto. Nas camadas de 0 a 5 e 5 a 10 cm não se verifica presença de Al trocável, mas na camada de 15 a 20 observa-se 10% de saturação por alumínio, valor considerado baixo, mas indicativo de maiores valores em profundidade.

É importante salientar que os resultados das análises dos atributos químicos dos solos acima apresentados, não são situações isoladas. O alumínio é menos tóxico em solos sob sistema plantio direto (Salet et al., 1999; Spera, 2009), em função da complexação deste elemento por ligantes aniônicos orgânicos e inorgânicos e pela força iônica da solução do solo. Salet et al. (1999) estudaram a atividade do alumínio em dois sistemas e concluíram que na camada superficial (0 a 5 cm) efetivamente a atividade livre do alumínio foi muito menor no sistema plantio direto em comparação ao manejo com re-

Tabela 3. Atributos químicos das camadas de um solo Latossolo Vermelho Amarelo de Sinop, MT cultivado por quinze anos com algodão, soja e milho.

Camada (cm)	Argila (%)	pH	P (mg dm ⁻³)	K	MO (%)	Ca	Mg	CTC (cmol _c dm ⁻³)	Al	m (%)
0-5	54	5,8	13,4	98	3,5	3,4	1,2	7,4	0,0	0
5-10	54	5,6	6,1	57	2,7	2,1	0,8	6,3	0,0	0
10-15	55	5,5	3,0	45	2,3	1,8	0,5	5,5	0,05	1
15-20	57	5,4	2,5	37	1,8	1,2	0,4	5,1	0,2	10

Spera. Dados da tabela coletados em 2015, não publicado.

volvimento do solo com arado, no entanto, abaixo dessa camada não houve diferença em relação ao preparo convencional. Isto provavelmente ocorre em função do maior teor de matéria orgânica que acumula nessa camada e é menor nas demais camadas, nas quais o problema da toxidez do alumínio persiste.

Em face da condição observada na Tabela 3, há um desalinhamento em relação às recomendações. A recomendação de adubação e calagem para o Cerrado (Sousa; Lobato, 2004) propõe que em solos com elevada acidez em camadas mais profundas (10-20 cm) deva ser aplicada a quantidade de calcário recomendada para a correção da acidez na camada de 0-20 cm e se efetuar a incorporação. Nessa recomendação está incluído ainda que a incorporação deva ocorrer em glebas onde o SPD esteja em fase de implantação ou em áreas sem calagem anterior.

A incorporação dos corretivos com a utilização de arado ou grade aradora, em áreas manejadas com SPD já consolidada não tem sido preconizada, pois essas áreas de lavoura normalmente não mais dispõem de terraços ou de outras práticas complementares de conservação do solo, o que certamente acarretaria intensa erosão hídrica. A utilização de implementos de hastes que incorporem parcialmente os corretivos até 15 a 20 cm de profundidade ainda é restrita, pois não há equipamentos disponíveis no mercado que façam tal operação e os protótipos ainda estão em desenvolvimento (Klein et al., 2007).

Nas lavouras brasileiras com grande extensão de área é cada vez mais comum a aplicação de fertilizantes e corretivos na superfície do solo, sem incorporação. Um exemplo são os resultados analíticos de amostras de solo apre-

sentados na Tabela 3, que foi retirada de uma área onde a adubação foi feita a lanço, na superfície. É evidente a concentração, principalmente do fósforo (P) e do potássio (K) na camada de 0 a 5 cm. Esse acúmulo superficial dos nutrientes não estimula o aprofundamento do sistema radicular, restringindo uma distribuição da massa radicular também à camada superficial.

Nas lavouras manejadas com SPD, a variabilidade espacial dos indicadores da fertilidade do solo, empregando o modelo arquitetado a partir da agricultura convencional, se manifesta tanto na horizontalidade quanto na verticalidade. Diante destes fatos e percepções, o equívoco de maior impacto é admitir que o atual emprego da agricultura de precisão, com o objetivo de corrigir a variabilidade horizontal da fertilidade do solo manejado com SPD está fundamentado em dados analíticos gerados pelo modelo ainda vigente de avaliação da fertilidade do solo, no qual os fundamentos tornaram-se obsoletos, ou seja, a homogeneidade da camada de solo a ser amostrada, seja na camada de 0 a 20 cm, seja na de 0 a 10 cm. No âmbito da agricultura conservacionista, com a erradicação de mobilizações mecânicas de solo, é questionável corrigir a variabilidade espacial, no sentido horizontal, de um determinado indicador de fertilidade do solo, a partir de valores médios deste indicador, oriundos de amostras de solo com variabilidade espacial no sentido vertical, conforme exemplificado pela Figura 1.

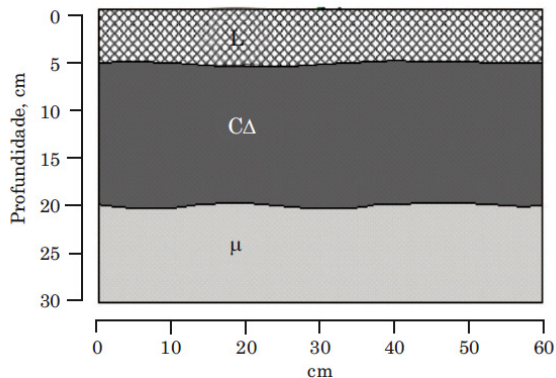


Figura 1. Perfil cultural de um Latossolo Vermelho distroférrico: Camada L = limite superior da camada compactada, solta a macia; camada C Δ = camada compactada, maciça, dura a muito dura; camada μ = limite inferior da camada compactada, ligeiramente dura a dura, porém mantendo estrutura de granular muito pequena típica de Latossolos.

Assim, a prática agrícola de incorporação de fertilizantes em profundidades abaixo de 5 a 7 cm, mediante uso de sulcadores eficientes do tipo facão, embutidos nas semeadoras adubadoras, é recomendada, uma vez que com isso, além de promover um ambiente físico mais favorável ao desenvolvimento radicular, possibilita a deposição do fertilizante em camadas mais profundas, diminuindo a diferença do gradiente químico vertical e favorecendo o aumento do volume de solo explorado pelas raízes (Nunes et al., 2015). Deste modo, deve-se reforçar a importância do produtor poder contar com um solo com adequada qualidade edáfica em camadas mais profundas, com plenas condições de fornecer água, ar e nutrientes ao sistema radicular das plantas e destacar os problemas que elevados gradientes químicos em solos manejados com SPD podem restringir o pleno desenvolvimento das plantas, afetando assim principalmente a estabilidade da produção agrícola.

Para que haja um pleno desenvolvimento do sistema radicular das plantas é imprescindível que este não se depare com nenhum tipo de limitação física, química ou biológica. As raízes das plantas têm o seu crescimento afetado na presença de elementos tóxicos. A presença de alumínio em níveis tóxicos, frequentemente associada a uma camada compactada, são as principais limitações, ocasionando estresse nutricional e hídrico nas plantas cultivadas. É importante lembrar que os principais cultivares de espécies agrônomicas destinadas para produção de grãos possuem ciclos vegetativos cada vez mais curtos e, nesse caso, quando ocorrem períodos curtos de estresse hídrico, em fases críticas, isso afeta negativamente o rendimento de grãos.

Para que os nutrientes possam ser eficientemente absorvidos pelo sistema radicular, independentemente do modo de absorção, é necessário que os mesmos estejam solubilizados na água, ou seja, devem estar dissolvidos em uma camada de hidratação na superfície dos colóides do solo e/ou deve haver um filme de água para que possam ser transportados até as raízes. Assim, mesmo que o solo contenha elevada quantidade de nutrientes, se não dispôr de adequada disponibilidade de água, não há absorção dos nutrientes.

A água disponível às plantas é considerada aquela retida entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, que é dependente da estrutura do solo. A espessura da camada do solo explorada pelas plantas também tem importância fundamental no desenvolvimento do sistema radicular das plantas, e, conseqüentemente, no volume de água disponível. Uma vez que

a lâmina de água disponível é representada pela profundidade em que a água ocorre na forma disponível, e que quanto mais profundo for o sistema radicular, maior será o volume de solo passível de ser explorado pelas raízes e maior o volume de água e nutrientes disponível às plantas (Klein et al., 2007). O desbalanço entre teores disponíveis de determinados nutrientes em certas camadas também podem acarretar redução no desenvolvimento das plantas em função da competição na absorção de nutrientes pelas raízes. Castamann (2009) constatou menor absorção de magnésio (Mg) e do cálcio (Ca) por plantas de soja em solos que tinham teor de K duas vezes maior que o valor limite da faixa “alto”, conforme a Manual... (2004). Assim, a concentração desse nutriente na camada superficial pode favorecer este desbalanço.

Caracterização da estratificação física no perfil cultural do solo

Considerando a extinção da camada arável, que foi substituída por um perfil estratificado, a melhor forma de se avaliar os atributos do solo é descrevendo o perfil cultural (Tavares Filho et al., 1999). O método do perfil cultural permite que camadas compactadas sejam mais facilmente identificadas. A compactação tem sido apontada como a principal causa de redução da aeração de solos cultivados não inundados. A compactação reduz também o volume de raízes das plantas cultivadas. Goedert et al. (2002) destacam que a compactação é caracterizada pelo aumento da densidade do solo e da redução do espaço poroso total, e como resultado, as propriedades do solo relativas à composição porosa são significativamente alteradas.

O tráfego de máquinas e implementos nas operações de preparo, semeadura, adubação, tratamentos fitossanitários e colheita têm sido apontados como um dos agentes de compactação de solos (Goedert et al., 2002). Beutler et al. (2003) observaram que o manejo intensivo promoveu diminuição na macroporosidade, na permeabilidade do ar e na difusão de gases do solo.

A compactação tem sido considerada um dos mais importantes entraves no manejo do solo no SPD que tem consequências refletidas diretamente

sobre a produtividade das culturas exploradas. Em termos concisos, o solo compactado contém dois problemas cruciais: dificuldade de desenvolvimento de raízes e impedimento da infiltração e ascensão de água no perfil do solo (Câmara; Klein, 2005). No SPD, a compactação do solo na camada superficial pode ser decorrente da intensa atividade antrópica relacionada às atividades agropecuárias. Freitas (2005) relata que em solos cultivados com SPD, a princípio sofrem compactação devido ao tráfego de máquinas e implementos, além de uma consolidação natural, gerando maior densidade nessa camada, a qual pode diminuir gradualmente com a profundidade, principalmente em solos argilosos. De acordo com Spera et al. (2005), solos submetidos ao SPD mostram maior compactação nas camadas entre 7 e 20 cm. Com o passar dos anos, a densidade do solo da camada compactada, no SPD pode diminuir, em parte, como resultado do aumento do nível de matéria orgânica na camada superficial, que favorece a reestruturação do solo (Amado et al., 2001; Streck, 2003; Denardin; Denardin, 2015).

O manejo inadequado dos solos tem como consequência a compactação e a erosão. Uma das consequências pode ser a redução da produção de lavouras, motivada pela redução na disponibilidade de água. O manejo adequado do solo visando melhorias nas condições propícias ao desenvolvimento radicular das plantas é de fundamental importância para evitar estes efeitos negativos. Silva e Rosolem (2001) comentam que os sistemas radiculares de aveia preta, milho, sorgo, guandu, mucuna preta e tremoço são considerados como reestruturadores de solo, porém, até a densidade do solo atingir um valor próximo de $1,60 \text{ Mg m}^{-3}$. Valores ao redor de $1,50 - 1,70 \text{ Mg m}^{-3}$ têm sido apontados como o limitante ao desenvolvimento radicular, bem como a emergência de plântulas (Floss, 2011). Porém, a elevada compactação, ainda que não impeça o crescimento de raízes, esse crescimento é reduzido.

Uma das formas utilizadas para descompactação de solos é a utilização de escarificadores. Estes implementos produzem superfícies mais rugosas quando comparados com arados de discos e grades pesadas. O principal objetivo da escarificação é aumentar a porosidade, reduzir a densidade e, ao mesmo tempo, romper as camadas superficiais encrostadas e camadas subsuperficiais compactadas (Kochhann; Denardin, 2000; Silva et al., 2006) sem inverter as camadas cultivadas do solo. Nunes et al. (2014b)

relatam, para o estado do RS, que o efeito desta operação é observado por no máximo duas safras.

Os valores de densidade de solo (Ds), porosidade total (PT) e resistência à penetração mecânica do solo (RP) obtidos por Spera (2015) para soja e milho cultivados em um Latossolo Vermelho Amarelo argiloso com e sem escarificação utilizando equipamento de hastes operando a 30 cm de profundidade são apresentados na Tabela 4, para ilustrar o efeito da escarificação na redução da compactação.

Tabela 4. Densidade do solo e porosidade total obtidos na Fazenda Tropeiro Velho, em Sinop, MT, em parcelas escarificadas e não escarificadas.

Manejo	Densidade do solo (g cm ³)		
	Camada 0 - 5 cm	Camada 5 - 10 cm	Camada 10 - 20 cm
Escarificado	1,11 b	1,19 b	1,23 b
Não escarificado	1,24 a	1,31 a	1,32 a
C.V, %	8,7	6,8	6,4
Manejo	Porosidade total (%)		
	Camada 0 - 5 cm	Camada 5 - 10 cm	Camada 10 - 20 cm
Escarificado	55,1 a	51,7 a	49,9 a
Não escarificado	49,7 b	46,6 b	46,6 b
C.V, %	7,9	7,1	6,9
Manejo	Resistência do solo à penetração (MPa)		
	Camada 0 - 5 cm	Camada 5 - 10 cm	Camada 10 - 20 cm
Escarificado	0,61 a	1,3 b	2,2 b
Não escarificado	0,36 b	2,3 a	2,7 a
C.V, %	32,9	14,3	14,2

Fonte: Spera (2015), dados gerados pelo autor.

Além da descompactação, a escarificação também cria um microrrelevo na superfície do solo que favorece o escoamento superficial e o armazenamento sazonal de água (Bertol et al., 2007). Na Tabela 5 encontram-se os valores de Ds, PT e RP de parcelas de distintos tipos de uso da terra em um LVA argiloso manejado com e sem escarificação. Os valores mais adequados de Ds, PT e RP encontram-se na camada superficial de 0 a 5 cm. Os tipos de uso com

menor intensidade de mecanização e trânsito de máquinas e animais têm valores maiores de Ds e RP e menor PT.

Pode-se constatar que a resistência mecânica do solo à penetração obtida com penetrômetro de impacto em um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico argiloso em Sinop, MT produz um gradiente que aumenta com a profundidade (Figura 2). Nota-se que, a partir de 7 cm, o valor de RP ultrapassa o limite considerado crítico para a maioria das culturas anuais (Klein, 2008), que é equivalente a 2,0 MPa. Os valores de RP aumentam até a profundidade de 15 cm.

Tabela 5. Valores de densidade do solo, porosidade total e resistência mecânica do solo à penetração de cinco diferentes tipos de uso da terra de experimento conduzido na Embrapa Agrossilvipastoril, Sinop, MT.

Camada	Densidade do solo (g cm ⁻³)					CV (%)
	Eucalipto	Pastagem	Lavoura	ILPF *	Mata nativa	
0 - 5 cm	1,15	1,19	1,16	1,20	0,97	11,4
5 - 10 cm	1,30 a	1,32 a	1,16 ab	1,32a	1,11 b	5,3
10 - 20 cm	1,27 a	1,26 ab	1,33 a	1,31 a	1,11 b	4,6
Camada	Porosidade total (%)					CV (%)
	Eucalipto	Pastagem	Lavoura	ILPF *	Mata nativa	
0 - 5 cm	55,0	53,3	54,8	53,0	62,2	9,1
5 - 10 cm	49,3 b	48,3 b	54,6 ab	48,3 b	56,8 a	5,0
10 - 20 cm	50,3 b	50,8 ab	48,2 b	49,0 b	56,5 a	4,4
Camada	Resistência do solo à penetração (MPa)					CV (%)
	Eucalipto	Pastagem	Lavoura	ILPF *	Mata nativa	
0 - 5 cm	0,91 b	1,30 a	1,33 a	1,47 a	0,56 b	12,8
5 - 10 cm	1,63 b	2,25 a	2,27 a	2,20 a	0,75 c	8,0
10 - 20 cm	2,05 a	2,15 a	2,29 a	2,01 a	0,83 b	10,9

* Integração lavoura pecuária floresta.

Spera. Dados da tabela coletados em 2015, não publicado

O crescimento das plantas pode ser alterado por alguns fatores restritivos que são encontrados pelas raízes neste ambiente de restrição. Vários estudos têm mostrado que a elevada resistência mecânica do solo é um dos mais importantes fatores de estresse, uma vez que pode afetar o crescimento

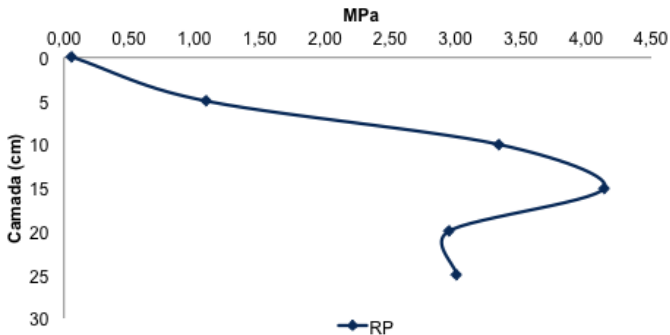


Figura 2. Gradiente de RP (em MPa) em profundidade de um LVA distrófico típico do MT sob lavouras anuais com sucessão soja e milho.

Fonte: Spera et al., 2015.

de plantas reduzindo a taxa crescimento de raízes (Zou et al., 2001), ainda que se conheça pouco do efeito da resistência mecânica do solo no desenvolvimento de caules e raízes. A elevada resistência mecânica do solo está estreitamente relacionada com outro principal fator de estresse: o reduzido volume da porosidade de aeração do solo, que promove efeitos restritivos ao crescimento de plantas (Passioura, 2002).

Quando o solo é amostrado conforme a estratificação do perfil cultural, conforme mostrado nas Tabelas 6 e 7, pode-se verificar que a espessura da camada superficial, com valores semelhantes de densidade, varia em até 80%, e o gradiente de Ds entre as camadas é mais expressivo. O mesmo se observa com os atributos químicos, conforme ilustrado na Tabela 7.

Tabela 6. Espessura média de três camadas de perfil cultural e respectivas densidades do solo de perfis de solos estratificados, numa lavoura de soja e algodão do município de Ipiranga do Norte, MT.

Camada	Espessura (cm)					Densidade do solo (g cm^{-3})				
	A	B	C	D	Med.	A	B	C	D	Med.
1	7,0	5,7	5,0	9,0	6,7	1,04	1,10	1,15	1,16	1,11
2	23,0	21,0	22,0	17,0	20,8	1,34	1,42	1,42	1,43	1,40
3	-	-	-	-	-	1,13	1,27	1,25	1,23	1,22

Camada 1 = limite superior da camada compactada, solta a macia; camada 2 = camada compactada, macia, dura a muito dura; camada 3 = limite inferior da camada compactada, ligeiramente dura a dura, porém mantendo estrutura de granular muito pequena de Latossolos. A, B, C e D – faixas de amostragem.

Spera e Chitarra. Dados da tabela coletados em 2016, não publicado.

Tabela 7. Atributos químicos de solo de três camadas de perfil cultural de uma lavoura de soja e algodão do município de Ipiranga do norte, MT.

Atributo químico	Camada		
	1	2	3
pH em água	6,2	5,9	5,7
P (mg dm ⁻³)	47	13	2
Na (cmol _c dm ³)	0,15	0,13	0,11
K (cmol _c dm ³)	0,39	0,11	0,07
Ca (cmol _c dm ³)	1,94	0,62	0,44
Mg (cmol _c dm ³)	0,59	0,35	0,31
Al (cmol _c dm ³)	0	0,14	0,22
H+Al (cmol _c dm ³)	4,20	5,90	5,51
CTC (cmol _c dm ³)	7,27	7,11	6,45
V (%)	42	17	14
M (%)	0	10	15
MO (g kg ⁻¹)	3,3	2,4	1,6
SB (cmol _c dm ³)	3,07	1,21	0,93
SatK (%)	5,4	1,5	1,1
SatNa (%)	2,1	1,8	1,8
C (%)	2,85	1,46	1,21
N (%)	0,18	0,07	0,06
S (%)	1,09	0,07	0,07
Cu (mg dm ⁻³)	0,73	0,48	0,42
Fe (mg dm ⁻³)	51,72	84,01	71,58
Zn (mg dm ⁻³)	5,30	0,67	0,51
Mn (mg dm ⁻³)	17,26	3,25	2,06

Camada 1 = limite superior da camada compactada; camada 2 = camada compactada; camada 3 = limite inferior da camada compactada, ligeiramente dura a dura, porém mantendo estrutura de granular muito pequena de Latossolos. A, B, C e D – faixas de amostragem.

Spera e Chitarra. Dados da tabela coletados em 2016, não publicado.

A camada de maior densidade, observada abaixo de 5 cm tem características de estrutura dispersada quimicamente, endurecida e desprovida de macroporos de diâmetro maior que 1 mm, indicando um ambiente de reduzida permeabilidade à água e ao ar e de pouca atividade da macrobiota do solo

(e talvez da microbiota). É uma camada que em certos aspectos lembra um fragipã (Santos et al., 2013a). Esta camada compactada, maciça, “dura” a “muito dura” é um ambiente edáfico muito desfavorável ao desenvolvimento radicular, onde foi observado pelos detentores dos dados a pouca presença de raízes, se restringindo às raízes muito fina ($\varnothing < 1$ mm) e finas (\varnothing entre 1 e 2 mm), conforme Santos et al. (2013b).

O gradiente de estratificação dos atributos químicos do solo entre as camadas distinguidas mediante o método do perfil cultural é mais evidente no que se refere à concentração de nutrientes na superfície e no aumento da acidez em profundidade.

Prejuízos advindos da estratificação física do perfil solo

Nos últimos anos, nos estados produtores de soja do Centro Oeste, Mato Grosso entre eles, a aplicação de corretivos e fertilizantes a lanço na superfície tem favorecido a formação de um perfil de solo estratificado com uma camada superficial de reduzida espessura, onde se concentra quase a totalidade dos nutrientes e de matéria orgânica. Concomitante a isso, tem-se observado a presença de camadas compactadas no solo numa profundidade variando de 5 a 10 cm (Mello et al., 2003; Klein et al., 2007; Spera et al., 2010; Yagi et al., 2014), camadas estas com baixa permeabilidade, muitas delas já com características de estrutura maciça, com porosidade reduzida e pouca atividade biológica e até presença de acidez. O efeito somado dos fatores supracitados, por sua vez, pode deixar as plantas mais suscetíveis ao estresse hídrico, já que restringem a penetração das raízes em maior profundidade, confinando-as na superfície.

A maioria dos artigos técnico-científicos sobre calagem superficial demonstra que o rendimento de culturas, nesse tipo de manejo da acidez do solo, não difere dos modos de manejo que incorporam o calcário em camadas de 20 cm ou abaixo desta profundidade (Lopes et al., 2004; Kaminski et al., 2005; Moraes, 2005; Franchini et al., 2008; Spera, 2009; Caires, 2013; Sousa et al., 2013?; Caires, 2015; Fidalski et al., 2015). Alguns desses estudos foram conduzidos inclusive para justificar a aplicação da calagem em superfície, em razão do elevado custo das operações de incorporação. Nenhum dos artigos, entretanto, mostra os efeitos da aplicação de calcário na superfície em longo

prazo (> 10 anos), e tampouco foram conduzidos em condições de estresse hídrico ou veranico, situação na qual, as restrições químicas e físicas dos solos tendem a se manifestarem como problemas às lavouras. Assim, estudos sobre o efeito da incorporação do calcário em profundidade, em SPD deveriam ser retomados, como os de Klein et al. (2007), que buscavam incorporar o calcário em camadas subsuperficiais, mas evitando o revolvimento. Porém, é importante destacar que, dentre os preceitos básicos da implantação do SPD, ainda consta a exigência de calagem na dose recomendada para corrigir a camada de até 20 cm do solo, antes da consolidação do sistema. E, conforme tem sido confirmada por técnicos, esta recomendação não tem sido seguida pelo produtor (Denardin; Denardin, 2015).

O uso da escarificação tem mostrado efeito de curta duração quando feita de forma isolada (Drescher et al., 2016), mas pode ser mais eficaz quando associada ao consórcio de braquiária com a cultura, principalmente o milho. Assim, como alternativa vegetativa já testada pode-se utilizar na safrinha, braquiária consorciada com a cultura do milho em segunda safra ou somente a braquiária em segunda safra, tanto para a formação de palha no sistema plantio direto quanto dentro da estratégia de integração lavoura-pecuária, pois essa espécie possui um desenvolvimento agressivo de raízes, o que auxilia na reestruturação do solo (Chioderoli et al., 2012).

Aeração do solo e o desenvolvimento de plantas

O solo é o reservatório de água e de nutrientes que devem ser fornecidos para as plantas de acordo com as necessidades destas e pelo maior tempo possível durante o período de crescimento vegetal (Floss, 2011). A camada superficial do solo é a primeira a secar, seja por evaporação ou por extração da água pelas raízes das plantas, pois estas se concentram nessa camada. No caso em que o solo da camada superficial seca coincida com momento em que o solo está com elevados teores de nutrientes, estes não podem ser absorvidos pelas plantas por falta do meio fluido. Em condições de solos úmidos, comum na época chuvosa do Mato Grosso ou áreas irrigadas, a estratificação química pouco ou nada alteraria a produção das culturas, porém, na ocorrência de veranico, ou na segunda safra (safrinha), onde períodos de déficit hídrico são frequentes, certamente essa situação afetaria a produção agrícola.

No solo, a difusão do ar é reduzida devido à tortuosidade e obstrução dos poros contínuos disponíveis e ao espaço poroso efetivo. O tamanho dos poros não chega a ser crítico, mas a continuidade sim, uma vez que o diâmetro médio dos condutos livres para as moléculas gasosas é muito menor que o dos poros envolvidos (Silva; Cabeda, 2006). Assim, em condições de inadequada aeração, a absorção de água pelas raízes torna-se deficiente. A elevada concentração de CO_2 e a baixa de O_2 , conferida pela aeração deficiente, pode reduzir a capacidade das raízes de absorverem nutrientes, principalmente o potássio (Libardi, 2005). Outra forma de redução da porosidade de aeração do solo é acarretada pela saturação por água, por inundação temporária e baixa permeabilidade. Assim, a ocupação dos poros por água é a causa da restrição à aeração e não a redução do volume de poros que podem ser ocupados com o ar (Kirchhof; So, 2005).

Se as trocas de oxigênio e dióxido de carbono são interrompidas, os processos metabólicos das raízes das plantas são imediatamente prejudicados. As trocas de gases em equilíbrio inadequado levam ao decréscimo ou estagnação no desenvolvimento de plantas se continuadas por somente um dia, mas se forem prolongadas por mais dias, causam até a morte precoce das plantas (Torres et al., 2004; Reichardt; Timm, 2012).

Quando há restrição da aeração, os processos respiratórios da micro e macro biota que ocorrem no solo aumentam o uso de oxigênio e produzem dióxido de carbono bem mais rápido do que se poderia ser trocado com a atmosfera; o resultado é uma redução líquida do oxigênio e aumento do dióxido de carbono no solo. Porém, nem todas as plantas respondem da mesma maneira à deficiência de oxigênio ou ao excesso de dióxido de carbono (Jong van Lier, 2001).

As raízes em geral obtêm oxigênio (O_2) suficiente para a respiração aeróbia diretamente do espaço gasoso no solo. Os poros preenchidos com gás, em condição de adequada drenagem e porosidade permitem imediata difusão do O_2 até vários metros de profundidade. Aparentemente a concentração de oxigênio no ar do solo acima de 10% é adequada para as raízes da maioria das plantas (Kramer; Boyer, 1995). Jong van Lier (2001) relata que, em baixa concentração de oxigênio, os tecidos radiais de raízes de plantas de milho tornam-se anóxicos, enquanto o córtex permanece aeróbico porque o oxigênio continua sendo fornecido pela parte aérea por meio dos aerênquimas,

porém, o transporte de íons é drasticamente reduzido em raízes pobremente aeradas. Torres et al. (2004) constataram morte de raízes de plântulas de soja por deficiência de aeração em solo compactado e observaram distúrbios que foram atribuídos à anoxia. De acordo com Moreira e Siqueira (2006), este efeito também pode ser comprovado pela morte de nódulos de rizóbio em leguminosas que requeiram oxigênio e nitrogênio para FBN pelas raízes.

Silva et al. (2004) verificaram, em solos com teor de argila variando de 6 a 37% e manejados com preparo convencional ou com SPD, aumento do crescimento de plantas, avaliadas mediante aumento de altura, com aumento da porosidade de aeração do solo. Observaram, porém que o maior valor de crescimento de plantas foi obtido em solo manejado com SPD. A densidade e o comprimento de raízes de plântulas de milho, parâmetros usados para avaliar a elongação de raízes, são maiores em condições de menor compactação e, portanto, de maior porosidade de aeração do solo (Diaz-Zorita et al., 2005).

Redução na infiltração e permeabilidade da água no solo

Vários são os fatores que interferem na magnitude da infiltração e permeabilidade da água no solo. Esses fatores estão associados às propriedades físicas do solo e do manejo adotado. A textura, estrutura, porosidade, rugosidade superficial, restos culturais, matéria orgânica, atividade biológica do solo, manejo do solo e umidade inicial são alguns dos fatores apontados como responsáveis pelas variações na taxa de infiltração (Streck, 2003). Segundo Lipiec e Hatano (2003), os repetidos impactos das gotas de chuva contribuem para a redução da taxa de infiltração por duas maneiras: diminuição da rugosidade superficial, reduzindo a formação de poças d'água, e de uma fina camada de selamento na superfície. Essa camada tem menor condutividade hidráulica e é responsável por redução de até 90% da permeabilidade original.

Diversos estudos demonstram o efeito negativo do preparo sobre a capacidade de infiltração da água no solo. Kertzmann (1996) obteve uma taxa constante de infiltração de água de 1.396 mm h^{-1} em solo de mata, enquanto na área manejada com SPD por 15 anos a taxa foi de 63 mm h^{-1} . Spera (2009) obteve, em laboratório, 131 e 40 mm h^{-1} , respectivamente para mata e SPD, em medições na camada de 0 a 6,7 cm.

A deficiência da aeração do solo, ao nível de anóxia, é geralmente considerada um problema exclusivo de solos encharcados onde a disponibilidade de O_2 não atende à demanda biológica e zonas anaeróbias se desenvolvem. Mas em condições de extrema compactação pode-se atingir estado de hipóxia. Isto pode atrasar o desenvolvimento do sistema radicular por alterações na disponibilidade de ferro e manganês e também causar perdas de nitrogênio por desnitrificação (Stepniewski et al., 1994). Após uma chuva ou irrigação, a porosidade livre atinge valores próximos ao zero. De um a três dias depois, quando o solo atinge a capacidade campo, a porosidade livre de água aumenta, atingindo valores maiores que 10%, dependendo da textura. Nestas condições, as camadas compactadas se encontram em condições de baixa oxigenação ou hipóxia (Lebert et al., 2004).

Reduções no rendimento de culturas causadas pela combinação de efeitos da estratificação química e física do solo

Muitos produtores rurais e técnicos do Centro Oeste indicaram a compactação do solo como a principal causa de baixos rendimentos em lavouras devido à elevação da resistência do solo à penetração de raízes (Freitas, 2005). Como consequência, alguns produtores abandonaram o SPD momentaneamente e realizaram operações de cultivo do solo, a maioria utilizando a escarificação (cultivo mínimo) e uma pequena parte retornando ao preparo convencional com aração e gradagem (Spera et al., 2005), abandonando as vantagens de sistemas de manejo sem revolvimento do solo.

Ainda que não haja dados conclusivos na bibliografia sobre o assunto, a densidade do solo, um indicador de compactação de solo, tem sido correlacionada com o rendimento de culturas. Torres e Saraiva (1999) relacionaram a densidade de solo com o rendimento de soja em três anos, sendo a safra de 1984-1985 com melhor precipitação pluvial, safra de 1985-1986 com precipitação pluvial reduzida, e a safra de 1987-1988, também com precipitação insatisfatória. Observa-se na Figura 3 que na safra de melhor precipitação pluvial, a redução significativa no rendimento somente foi observada em densidades de solo maiores que $1,37 \text{ Mg m}^{-3}$, o mesmo valendo para a safra de precipitação insatisfatória, porém com rendimentos proporcionalmente bem menores. Para a condição de safra com precipitação reduzida (1985-1986), verificam-se reduções de rendimentos na densidade do solo maior que $1,33$

Mg m⁻³. Nas safras com melhor disponibilidade de chuvas, praticamente não se verifica efeito da compactação, no entanto, em condições de anos poucos chuvosos, a densidade do solo parece afetar o rendimento de soja.

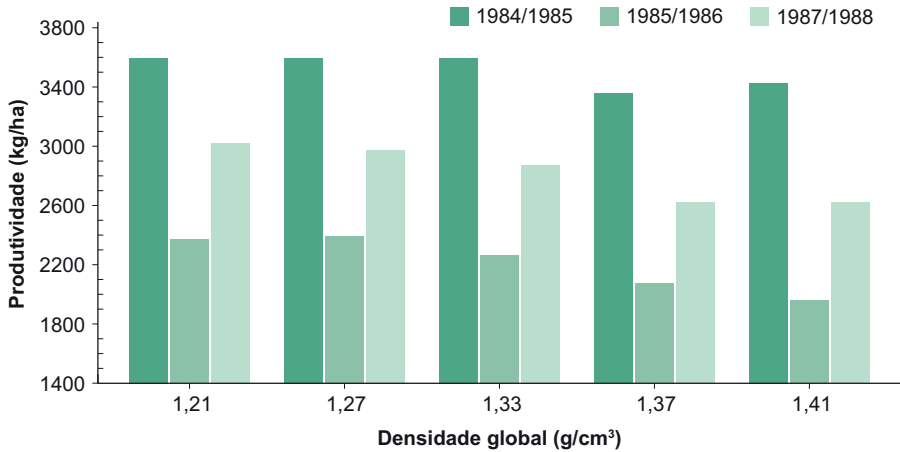


Figura 3. Rendimento de soja observada em 5 níveis de densidade do solo, na camada de 8 a 16 cm em um Latossolo Vermelho distroférrico.

Fonte: Torres e Saraiva (1999)..

Os atributos físicos do solo, alterados pelo manejo, influenciam o crescimento de raízes. Silva e Rosolem et al. (2001) observaram maior produção de raízes em culturas manejadas sob SPD, no entanto, afirmam que as raízes se concentram somente nos primeiros 15 cm do solo em razão da presença de camadas compactadas. Foloni et al. (2006) constataram intensificações nas reduções do crescimento de plantas de milho e de soja em condições de solo variando respectivamente de ligeiramente a severamente compactado.

A compactação do solo afeta o crescimento radicular quando o solo se encontra com um elevado valor de compactação. Nessa situação, o exame morfológico do crescimento das raízes das plantas cultivadas, no período de florescimento, permite identificar camadas com severo impedimento mecânico (Freitas, 2005). Nessas condições, as raízes reagem aumentando o diâmetro do ápice com a finalidade de incrementar a pressão de crescimento, alterando a direção de crescimento da raiz principal, ou fazendo crescer raízes laterais e aumentando a produção de pelos absorventes (Russel, 1981). As raízes, no entanto, são sensíveis mesmo a pequenas pressões, às vezes não detec-

tadas por penetrômetros. Um pequeno aumento na pressão pode causar um decréscimo no comprimento de raízes de cereais, sendo que, com pressão elevada o crescimento poderá ser praticamente nulo (Foloni et al., 2006).

Problemas advindos da estratificação física e química do solo

A compactação do solo é, de modo geral, o principal fator da alteração das relações entre ar, água e temperatura do solo, afetando a disponibilidade de nutrientes e o crescimento de raízes, e conseqüentemente, a produtividade das culturas (Goedert et al., 2002). O aumento de densidade do solo provoca alterações na estrutura, que levam a alterações nas curvas de retenção de água no solo, pela diminuição do volume de macroporos, especialmente os responsáveis pela drenagem rápida, e o aumento de microporos ($< 2 \mu\text{m}$). Essas alterações podem ser agravadas pelo aumento da resistência do solo ao crescimento de raízes (altas tensões) ou a diminuição da porosidade de aeração (Freitas, 2005).

A diminuição do volume de macroporos em 50% causa considerável diminuição na condutividade hidráulica. Isto considerando que não houve prejuízo na continuidade de poros, que possibilitam o fluxo de água. Nas camadas compactadas em solos com elevada degradação estrutural, ocorre uma descontinuidade muito forte da porosidade do solo, dificultando o fluxo de água, mesmo com uma distribuição de tamanho de poros não restritiva (Schaefer et al., 2001).

De acordo com os valores observados na Tabela 8, constata-se que houve concentração da massa e da distribuição do sistema radicular do milho na camada de 0 a 5 cm. Conforme Russel (1981), o percentual de raízes de milho ideal, na camada de 0 a 5 cm, deveria ser de no máximo 70% em um solo adequadamente estruturado. Na mesma tabela, verifica-se que, mesmo no solo escarificado, ainda há concentração de raízes na camada superficial, o que pode ser atribuído à acumulação ou concentração de nutrientes nessa camada.

A combinação de gradientes de estratificação química e física do solo favorece a ocorrência de condições ideais de enraizamento somente na camada mais superficial do solo agrícola e faz com que sistema radicular fique confinado nessa camada. Do ponto de vista químico, se a camada superficial puder fornecer as quantidades demandadas de nutrientes, teoricamente não haveria problemas com o confinamento radicular, mas na prática isso nunca ocorre. Foloni et al. (2006) reportam que para que se obtenha uma produção adequada em condições de restrição do sistema radicular é fundamental que o clima e demais fatores ambientais e biológicos de produção se mantenham em níveis satisfatórios. O fornecimento de água pelas chuvas deverá ser adequado, suficiente e em momentos de maior demanda, combinações que raramente ocorrem.

Tabela 8. Valores de massa seca (MS) e porcentagem de raízes de milho, amostrados após três anos da escarificação, até a camada de 10 a 20 cm, na Fazenda Tropeiro Velho, em Sinop, MT.

Camada	Escarificado			Não escarificado		
	MS raiz (Kg ha ⁻¹)	Raiz (%)	C (%)	MS raiz (Kg ha ⁻¹)	Raiz (%)	C (%)
0 - 5 cm	1.000,8	88,1	1,9	913,0	95,1	1,7
5 - 10 cm	80,0	7,0	8,7	18,7	2,0	17,7
10 - 20 cm	55,0	4,9	13,2	28,4	2,9	14,5

Spera. Dados da tabela coletados em 2015, não publicado.

A camada superficial geralmente dispõe de maior concentração dos nutrientes às plantas. Entretanto, caso uma maior concentração de nutrientes se concentre na superfície, nas regiões agrícolas onde a condição climática favoreça chuvas com maior índice pluviométrico, a perda destes nutrientes pela enxurrada será mais intensa (Denardin et al., 2005).

Amostragem do solo em perfis estratificados

Na aplicação do atual modelo de avaliação da fertilidade do solo, em solos manejados com SPD, os atributos químicos, indicadores da fertilidade do solo, obtidos a partir de amostras de solo coletadas na camada de 0 a 20 cm ou 0 a 10 cm, constituem valores inexistentes no solo, pois, em razão da extinção

da camada arável e da homogeneidade da camada amostrada, resultam da integração de valores estratificados nos diferentes horizontes de solo que compõem a camada amostrada.

A Figura 4 apresenta a situação em que 6 e 10 mg dm^{-3} de fósforo (P) e 39 e 53 mg dm^{-3} de potássio (K), extraídos pela solução de Mehlich-1 de amostras de solo coletadas, respectivamente, nas camadas de 0 a 20 cm e 0 a 10 cm, constituem teores inferiores àqueles estimados como críticos (P = 12 mg dm^{-3} e K = 80 mg dm^{-3}). Neste cenário, os teores quantificados induzem o tomador de decisão, tanto para a amostra de 0 a 20 cm quanto de 0 a 10 cm, indicar doses de P e K acima da necessária, pois no horizonte "O", na camada de 0 a 4 cm, os teores determinados se encontram acima do teor crítico. Contudo, os valores de 6 e 10 mg dm^{-3} de P e 39 e 53 mg dm^{-3} de K não enganosos no solo amostrado. São somente resultados da integração de valores estratificados presentes nos diferentes horizontes.

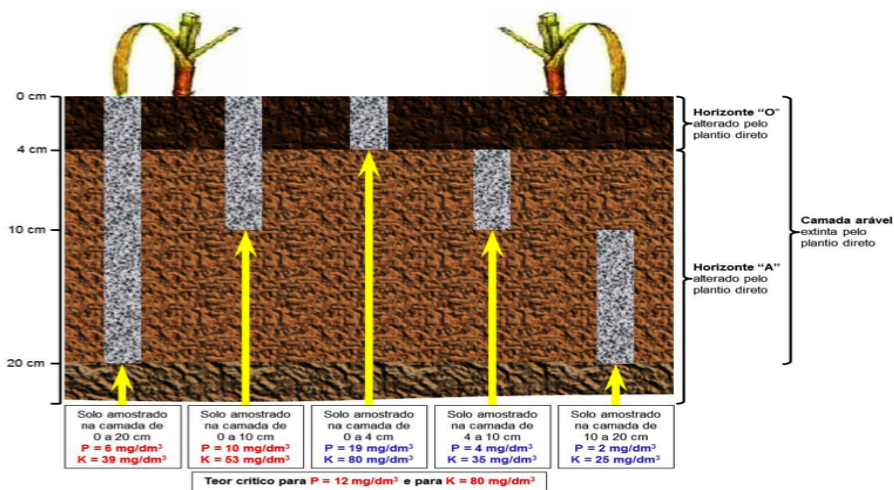


Figura 4. Perfil cultural de um solo manejado com sistema plantio direto, mostrando a extinção da camada arável e estratificação em horizontes, com gradientes nos teores de fósforo (P) e potássio (K) que comprometem resultados quando gerados a partir de amostras de solo coletadas nas camadas de 0 a 20 cm ou 0 a 10 cm, pertinentes ao modelo vigente de avaliação da fertilidade do solo.

Fonte: Denardin e Denardin (2015).

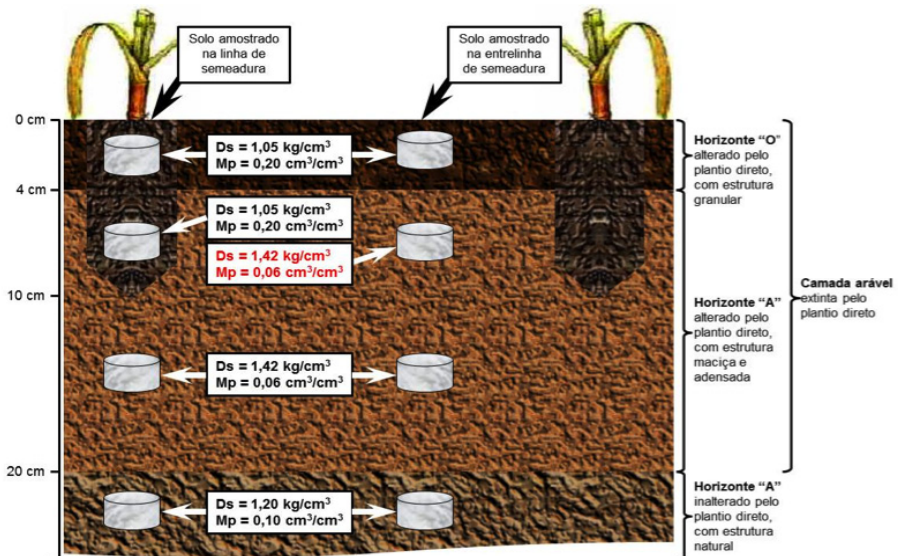


Figura 5. Perfil cultural de um solo manejado com sistema plantio direto, mostrando a extinção da camada arável e estratificação em horizontes, com variações na estrutura do solo, comprovadas pela densidade do solo (Ds) e pela macroporosidade do solo (Mp), tanto nos horizontes quanto na linha e entre linha de semeadura, que comprometem resultados analíticos quando gerados a partir de amostras de solo coletadas em camadas definidas na ausência da descrição do Perfil Cultural.

Fonte: Denardin e Denardin (2015).

A Figura 5 ilustra o fato de que a estrutura do solo varia tanto verticalmente, ao longo dos horizontes superficiais do solo, quanto horizontalmente, ao longo da linha e da entrelinha de semeadura. Os dados de densidade do solo e macroporosidade expostos evidenciam este aspecto e inferem que a amostragem do solo, para fins analíticos, requer diferenciação de sítios homogêneos, identificados previamente no perfil de solo pela técnica do perfil cultural (Tavares Filho et al., 1999).

Considerações finais

A estagnação e até mesmo redução dos rendimentos médios das culturas anuais no estado de MT pode estar relacionada, entre outros fatores, ao manejo inadequado da fertilidade do solo, tanto nos aspectos químicos quanto físicos. O problema pode ter tido origem já na implantação das lavouras, com

semeadura direta, mas sem que fossem seguidas as recomendações preconizadas para a implantação do SPD.

A limitação das raízes das culturas a camada superficial do solo, seja por restrições químicas ou físicas, tem reduzido de forma relevante o “reservatório” de água do solo, que associado a períodos de estiagem, mesmo que breves, têm comprometido significativamente a produtividade das culturas e, conseqüentemente, a renda dos produtores.

A estratificação dos valores dos atributos físicos, químicos, biológicos e morfológicos do perfil cultural promove a formação de camadas desestruturadas e biologicamente desfavoráveis à biota e ao sistema radicular.

Existe uma demanda por pesquisa em sistemas alternativos de manejo de solos visando à melhoria química e física das camadas subsuperficiais e de modelos de produção que gerem ambiente edáfico favorável ao desenvolvimento radicular e de novos equipamentos que permitam aplicar corretivos e fertilizantes em camadas subsuperficiais sem a necessidade de se revolver o solo.

As operações de escarificação, ainda que descompactem o solo, têm mostrado muitas vezes sendo de pouca eficácia na solução permanente do problema compactação do solo. Entretanto, a escarificação combinada com uso de plantas com sistema radicular vigoroso e agressivo, como a braquiária, em consórcio com milho ou com milheto, tem mostrado efeitos favoráveis na reestruturação e melhoria na porosidade de solos sob uso agropecuário.

Referências

ACOMPANHAMENTO da safra brasileira [de] grãos: safra 2013/14: primeiro levantamento – intenção de plantio. Brasília: CONAB, v.1, n.1, 2013. Disponível em: Disponível em: < https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/graos/boletim-da-safra-de-graos/item/download/1270_2208894ee7aeb6e6403b99e0e5e4b09f >. Acesso em: 13 nov. 2018.

AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; ELTZ, F. L. F.; BRUM, A. C. R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e melhoria na qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 189-197, 2001.

BATISTÃO, A. C.; LANGE, A.; LAVEZO, A.; BUCHELT, A. C.; FERREIRA, A.; BORSA, C. D. Épocas de adubação nitrogenada, com e sem compactação no arroz, em Alta Floresta–MT. In: JORNADA CIENTIFICA DA UNEMAT, 2.; WORKSHOP DOS GRUPOS DE PESQUISA E DA PÓS-GRADUAÇÃO DA UNEMAT, 2.; CONGRESSO INTERNO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNEMAT, 5.; WORKSHOP DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO INDÍGENA, 1.; SEMINÁRIO DO CONVÊNIO DE COOPERAÇÃO INSTITUCIONAL (UFSCar X UNEMAT 2009), 4., 2009, Cáceres. **Anais...** Cáceres: Unemat, 2009.

BERTOL, I.; GONZÁLEZ, A. P.; VÁSQUEZ, E. V. Rugosidade superficial do solo sob diferentes doses de resíduo de milho submetido à chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 1, p. 103-110, 2007.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G. Resistência à penetração em Latossolos: limitante à produção de grãos de soja. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia. **Novas fronteiras: o desafio da engenharia agrícola: [trabalhos apresentados]**. Goiânia: SBEA, 2003. CD-ROM. CD-ROM.

CAIRES, E. F. Calcário aplicado em SPD pode amenizar acidez, em camadas profundas do solo. **Visão Agrícola**, n. 13, p. 45-48, 2015.

CAIRES, E. F. Correção da acidez do solo em Sistema Plantio Direto. **Informações Agrônomicas**, n. 141, p. 1-13, 2013.

CÂMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. **Ciência Rural**, v. 35, n. 5, p. 813-819, 2005.

CASTAMANN, A. **Normas DRIS para rendimento de grão e teor de óleo da cultura da soja, cultivada no planalto médio do Rio Grande do Sul**. 2009. 153 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo.

CHAGAS, A. C. **Propriedades físicas, mecânicas, químicas e micromorfológicas de um Latossolo Vermelho sob cerrado e submetido a dois sistemas de manejo em Dom Aquino, MT**. 2004. 68 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

CHIODEROLI, C. A.; MELLO, L. M. M.; GRIGOLLI, P. J.; FURLANI, C. E. A.; SILVA, J. O. R.; CESARIN, A. L. Atributos físicos do solo e produtividade de soja em sistema de consórcio milho e braquiária **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 1, p. 37-43, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000100005>.

DENARDIN, J. E.; DENARDIN, N. D. Fatos e mitos em ciência do solo: manejo conservacionista do solo. **Boletim Informativo da SBCS**. v. 40, n. 1, p. 18-21, 2015.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, N. D. Sistemas Agrícolas produtivos: fator de promoção da fertilidade integral do solo. In: WORKSHOP SOBRE O SISTEMA PLANTIO DIRETO NO ESTADO DE SÃO PAULO, 1., 2005, Campinas. [Anais...] Piracicaba: Fundação Agrisus; FEALQ; Campinas: IAC, 2007. p. 156-167.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; FLORES, C. A.; CASSOL, E. A.; MONDARDO, A.; SCHWARZ, R. **Manejo de enxurrada em sistema plantio direto**. Porto Alegre: Fórum Estadual de Solo e Água, 2005.

DIAZ-ZORITA, M.; GROVE, J. H.; PERFECT, E. Soil fragment size distribution and comparative effort effects on maize root seedling elongation in moist soil. **Crop Science**, v. 45, n. 4, p. 1.047-1.057, 2005.

DRESCHER, M. S.; REINERT, D. J.; DENARDIN, J. E.; GUBIANI, P. I.; FAGANELLO, A.; DRESCHER, G. L. Duração das alterações em propriedades físico-hídricas de Latossolo argiloso decorrentes da escarificação mecânica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 2, p. 159-168, 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X2016000200008

FIDALSKI, J.; YAGI, R.; TORMENA, C. A. Revolvimento ocasional e calagem em Latossolo muito argiloso em sistema plantio direto consolidado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n. 5, p. 1.483-1.489, 2015.

FLOSS, E. L. **Fisiologia das plantas cultivadas**: o estudo do que está por trás do que se vê. 5.ed. atual. e ampl. Passo Fundo: UPF, 2011.

FOLONI, J. S. S.; LIMA, S. L. de; BÜLL, L. T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 1, p. 49-57, 2006.

FRANCHINI, J. C.; MEDA, A. R.; CASSIOLATO, M. E.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Potencial de extratos de resíduos vegetais na mobilização do calcário no solo por método biológico. **Scientia Agrícola**, v. 58, n. 2, p. 357-360, 2001.

FRANCHINI, J. C.; TORRES, E.; GARBELINI, L. G.; MIYAZAWA, M.; FONTOURA, S.; COSTA, J. M. da; RODRIGUES, J. C. P.; PAULETTI, V. **Correção da acidez subsuperficial no plantio direto pela aplicação de calcário na superfície e uso de plantas de cobertura e adubação verde**. In: SARAIVA, O. F.; LEITE, R. M. V. B. de C. (Ed.). Resultados de pesquisa da Embrapa Soja 2006. Londrina: Embrapa Soja, 2008. p. 125-132. (Embrapa Soja. Documentos, 308).

FREITAS, P. L. de. **Sistema plantio direto**: conceitos, adoção e fatores limitantes. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2005. (Embrapa Solos. Comunicado Técnico, 31).

GOEDERT, W. J.; SCHERMACK, M. J.; FREITAS, F. C. Estado de compactação do solo em áreas cultivadas no sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 2, p. 223-227, 2002.

IBGE. Séries Históricas e Estatísticas. **Agropecuária**: produção agrícola municipal (PAM): PA4: lavoura temporária – valor de produção. Disponível: <<https://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?no=1&op=0&vcodigo=PA4&t=lavoura-temporaria-valor-producao>>. Acesso em 13 nov. 2018.

IMEA. Instituto Mato-grossense de Economia Agropecuária. **Agro-MT 2022 Outlook**: projeções do agronegócio em Mato Grosso para 2022. [Cuiabá, MT: IMEIA], 2012. Disponível em: <http://www.imea.com.br/site/upload/pdf/arquivos/AgroMT_Outlook_2022.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2018.

JONG VAN LIER, Q. de. Oxigenação do sistema radicular: uma abordagem física. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 233-238, 2001.

KAMINSKI, J.; SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; SILVA, L. S. Eficiência da calagem superficial e incorporada precedendo o sistema plantio direto em um Argissolo sob pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 573-580, 2005.

KAPPES, C. Sistemas de cultivo de milho safrinha no Mato Grosso. In: SEMINÁRIO NACIONAL [DE] MILHO SAFRINHA, 12., 2013, Dourados. **Estabilidade e produtividade**: anais. Brasília, DF: Embrapa; Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2013. Palestra. Disponível em: <<http://www.cpa0.embrapa.br/cds/milhosafrinha2013/palestras/5CLAUDINEIKAPPES.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2018.

KERTZMANN, F. F. **Modificações na estrutura e no comportamento de um latossolo roxo provocadas pela compactação**. 1996. 176 f. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo.

KIRCHHOF, G.; SO, H. B. Soil puddling for rice production under glasshouse conditions its quantification and effect on soil physical properties. **Australian Journal of Soil Research**, v. 43, n. 5, p. 617-622, 2005.

KLEIN, V. A. **Física do solo**. Passo Fundo: UPF, 2008.

KLEIN, V. A.; DALLMEYER, A. U.; ESCOSTEGUY, P. A. V.; BOLLER, W.; FIOREZE, I.; VIEIRA, M. L.; DURIGON, F. F.; FÁVERO, F. Adaptação de um equipamento para incorporação de calcário em solos sob plantio direto. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 6, n. 2, p. 95-103, 2007.

KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E. **Implantação e manejo do sistema plantio direto**. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 2000. (Embrapa Trigo. Documentos. 20).

KRAMER, P. J.; BOYER, J. S. **Water relations of plants and soils**. San Diego: Academic Press. 1995.

LEBERT, M.; BÖKEN, H.; GLANTE, F. Soil compaction – indicators for the assessment of harmful changes to the soil in the context of the German Federal soil protection Act. In: OECD Expert Meeting on “Farm Management Indicators for Agriculture and the Environment”, 1., 2004, Palmerston North, Nova Zelândia. **[Proceedings...]** Palmerston North: OECD, 2004. Não paginado. Disponível em: < https://community.oecd.org/streamPage.jspa?cwsDb=Farm%20Management%20Indicators&community=2283&showHeader=0&link=http://livelink-idx-1n.main.oecd.org/LES_RM/livelink.exe/fetch/1202765/1232121/1232176/LebertRevised26April.PDF >. Acesso em: 13 nov. 2018.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005.

LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 116, n. 1-2, p. 107-136, 2003.

LOPES, A. S.; WIETHÖLTER, S.; GUILHERME, L. R. G.; SILVA, C. A. **Sistema plantio direto: bases para o manejo da fertilidade do solo**. São Paulo: ANDA, 2004.

MAGALHÃES, W. de A.; CREMON, C.; MAPELI, N. C.; SILVA, W. M. da; CARVALHO, J. M. de; MOTA, M. S. da. Determinação da resistência do solo a penetração sob diferentes sistemas de cultivo em um Latossolo sob Bioma Pantanal. **Agrarian**, v. 2, n. 6, p. 21-32, 2009.

MANUAL de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10 ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul - Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 2004.

MELLO, J. C. A.; VILLAS BÔAS, R. L.; LIMA, E. V.; CRUSCIOL, C. A. C.; BÜLL, L. T. Alterações nos atributos químicos de um Latossolo distroférico decorrentes da granulometria e doses de calcário em sistemas plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 3, p. 553-561, 2003.

MORAES, M. F. **Mobilidade de íons em solo ácido com aplicação de calcário e material vegetal em superfície**. 2005. 80 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agronômico de Campinas, Campinas.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. atual. e ampl. Lavras: UFLA, 2006.

NOBRE, N. A. O. **Avaliação dos atributos físicos do solo em três sistemas de uso e seus impactos na bacia hidrográfica do Rio Carapá em Colíder, MT**. 2008. 109 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade do Estado de Mato Grosso, Cáceres, MT.

NUNES, M. R.; DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; PAULETTO, E. A.; PINTO, L. F. S. Efeito de semeadora com haste sulcadora para ação profunda em solo manejado com plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 627-638, 2014a.

NUNES, M. R.; DENARDIN, J. E.; PAULETTO, E. A.; FAGANELLO, A.; PINTO, L. F. S. Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 148, p. 119-126, 2015.

NUNES, M. R.; PAULETTO, E. A.; DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A.; PINTO, L. F. S.; SCHEUNEMANN, T. Persistência dos efeitos da escarificação sobre a compactação de Nitossolo sob plantio direto em região subtropical úmida. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 7, p. 531-539, 2014b.

PASSIOURA, J. B. Soil conditions and plant growth. **Plant Cell & Environment**, v. 25, n. 2, p. 311-318, 2002.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2. ed. Barueri: Manole. 2012.

RUSSEL, R. S. Plant root systems - their function and interaction with the soil. In: RUSSEL, R. S.; IGUE, K.; MEHTA, Y. R. **The soil/root system in relation to Brazilian agriculture**. Londrina: IAPAR, 1981. p. 3-19.

SALET, R. L.; ANGHINONI, I.; KOCHHANN, R. A. Atividade do alumínio na solução de solo do sistema plantio direto. **Revista Científica Unicruz**, v. 1, n. 1, p. 9-13, 1999.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. de **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013a.

SANTOS, R. D. dos; LEMOS, R. C. de; SANTOS, H. G. dos; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. dos; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 6. ed. rev. e ampl. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013b.

SCHAEFER, C. E. G. R.; SOUZA, C. M.; MERNES, F. J. V.; VIANA, J. H. M.; GALVÃO, J.; RIBEIRO, L. M. Características da porosidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes sistemas de preparo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 3, p. 765-769, 2001.

SILVA, A. J. N. da; CABEDA, M. S. V. Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 6, p. 921-930, 2006.

SILVA, A. P. da; IMHOFF, S.; KAY, B. Plant response to mechanical resistance and air-filled porosity of soils under conventional and no tillage system. **Scientia Agricola**, v. 61, n. 4, p. 451-456, 2004.

SILVA, M. A. S.; MAFRA, A. L.; ALBUQUERQUE, J. A.; DALLA ROSA, J.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Propriedades físicas e teor de carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob distintos sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 2, p. 329-337, 2006.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. A. Influência da cultura anterior e da compactação do solo na absorção de macronutrientes em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 10, p. 1.269-1.275, 2001.

SOUSA, D. M. G. de; REIN, T. A.; SANTOS JÚNIOR, J. de D. G. dos; NUNES, R. de S. **Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto no cerrado**. [s. l.: s. n, 2013?]. Disponível em: <http://www.agrisus.org.br/arquivos/artigo_Embrapa_Cerrados.pdf>. Acesso em 22 mar. 2016. Artigo 17.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Eds.). **Cerrado: Correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa Cerrados, 2004.

SPERA, S. T. **Atributos físicos e químicos de um Latossolo e produtividade de culturas, em função de manejo de solo e de rotação de culturas**. 2009. 228 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de Passo Fundo, 2009.

SPERA, S. T.; MAGALHAES, C. A. de S.; FARIAS NETO, A. L. de; WOLF, G.; DORNELAS, K. C. **Soil mechanical resistance to penetration (SMRP) in an Oxisol under different integrated crop/livestock systems (CLS)**. In: WORLD CONGRESS ON INTEGRATED CROP-LIVESTOCK-FOREST SYSTEMS; INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTEGRATED CROP-LIVESTOCK SYSTEMS, 3., 2015, Brasília, DF. Towards sustainable intensification: proceedings. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 291.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P. dos; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Efeito de integração entre lavoura e pecuária, sob plantio direto, em alguns atributos físicos do solo após dez anos.

Bragantia, v. 69, n. 3, p. 695-704, 2010.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O.; SPERA, M. R. N. Alterações na estrutura do solo causadas pela compactação, em sistemas de integração lavoura/pecuária sob plantio direto. In: SIMPÓSIO SOBRE PLANTIO DIRETO E MEIO AMBIENTE, 1., 2005, Foz do Iguaçu.

Seqüestro de carbono e qualidade da água: anais. Ponta Grossa: FEBRAPDP, 2005. p. 238-240.

STEPNIEWSKI, W.; GLINSKI, J.; BALL, B. C. Effects of compaction on soil aeration properties. in: SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C. (Eds.). **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.167-189. Cap. 8. (Developments in Agricultural Engineering, v. 11).

STRECK, C. A. **Compactação do solo e seus efeitos no desenvolvimento radicular e produtividade da cultura do feijoeiro e da soja**. 2003. 83 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M. F.; MEDINA, C. C.; BALBINO, L. C.; NEVES, C. S. V. J. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 2, p. 393- 399, 1999.

TORRES, E.; ALMEIDA, A. M. R.; SARAIVA, O. F.; HENNING, A. A.; FRANCHINI, J. C.; GALERANI, P. R.; FERREIRA, L. P. **Morte de plântulas de soja provocada pelo excesso de umidade e falta de aeração do solo**. Londrina: Embrapa Soja, 2004. (Embrapa Soja. Documentos, 239).

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

YAGI, R.; FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A. A incorporação de calcário em sistema plantio direto consolidado reduz o estoque de carbono em macroagregados do solo. **Ciência Rural**, v. 44, n. 11, p. 1.962-1.965, 2014.

ZOU, C.; PENFOLD, C.; SANDS, R.; MISRA, R.K.; HUDSON, I. Effects of soil air-filled porosity, matric potential and soil strength on primary root growth of radiata pine seedlings. **Plant and Soil**, v. 236, n. 1, p. 105-115, 2001.

Embrapa

Agrossilvipastoril

MINISTÉRIO DA
**AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO**

