

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
BRUNO VIZIOLI



QUALIDADE FÍSICA E CARBONO ORGÂNICO DE LATOSSOLOS SOB DIFERENTES
SISTEMAS DE PREPARO A LONGO PRAZO NOS CAMPOS GERAIS - PR

CURITIBA
2018

BRUNO VIZIOLI

QUALIDADE FÍSICA E CARBONO ORGÂNICO DE LATOSSOLOS SOB DIFERENTES
SISTEMAS DE PREPARO A LONGO PRAZO NOS CAMPOS GERAIS - PR

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo, Área de Concentração Solo e Ambiente,
do Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do
Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de
Doutor em Ciência do Solo.

Orientadora: Prof^a Dr^a Karina Maria Vieira Cavaliéri-Polizeli

CURITIBA

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS/UFPR -
BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, DOUGLAS ALEX JANKOSKI CRB 9/1167
COM OS DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

V864q Vizioli, Bruno
Qualidade física e carbono orgânico de latossolos sob
diferentes sistemas de preparo a longo prazo nos Campos
Gerais - PR / Bruno Vizioli. - Curitiba, 2018.
103 f.: il., grafs., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná. Setor
de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em
Ciências do Solo.
Orientadora: Karina Maria Vieira Cavalieri Polizeli

1. Solos – Qualidade. 2. Latossolos – Campos Gerais
(PR). 3. Solos – Preparo. 4. Plantio direto. 5. Rotação de
cultivos. I. Polizeli, Karina Maria Vieira Cavalieri. II. Título. III.
Universidade Federal do Paraná.

CDU 631.417.1(816.2)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS DO SOLO

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **BRUNO VIZIOLI** intitulada: **Qualidade física e carbono orgânico de latossolos sob diferentes sistemas de preparo a longo prazo nos campos gerais - Pr**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 23 de Fevereiro de 2018.

KARINA MARIA VIEIRA CAVALIERE POLIZELI
Presidente da Banca Examinadora

JEFERSON DIECKOW
Avaliador Interno

NEYDE FABIOLA BALAREZO GIAROLA
Avaliador Externo

JORGE LUIZ MORETTI DE SOUZA
Avaliador Interno

CASSIO ANTÔNIO TORMENA
Avaliador Externo

Aos meus pais, Lúcia e Alcir, que sempre estiveram ao meu lado e se fizeram presente em todos os momentos. Ao meu querido avô Rinaldo Vizioli (*in memoriam*) por tudo que é em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por tantas coisas boas que proporcionou em minha vida e pelas boas oportunidades que Ele me concedeu nessa estadia em Curitiba.

À minha família pelo apoio, compreensão e por me fazerem quem sou hoje. Aos meus pais Lúcia e Alcir, a minha irmã Marina, aos meus tios, meus avós, que sempre se fizeram presentes em uma visitinha em Curitiba.

À professora Karina Cavalieri, a quem admiro pela profissional e pelo ser humano impar que é; pela orientação, amizade e ensinamentos proporcionados ao longo dos quatro anos de doutorado.

À Universidade Federal do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela estrutura física e científica que proporcionaram a condução do doutorado.

À Fundação ABC, na pessoa do pesquisador Gabriel Barth, por ter cedido as áreas para estudo.

À Universidade Estadual de Maringá, na pessoa do professor Cássio Antônio Tormena, que possibilitou algumas análises nos laboratórios da instituição.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, de forma especial à Fabiane Vezzani, Nerilde Favaretto, Jefferson Dieckow, Marcelo Lima, Robson Armindo, Volnei Pauleti e Moretti.

Aos Professores Cássio Antônio Tormena e Jefferson Dieckow pelas valorosas contribuições no exame de qualificação.

À Joseane, Maria, Fabiana e Denise, funcionárias da Universidade Federal do Paraná, pelas conversas, dicas e ajudas nos momentos de análises laboratoriais.

Aos amigos que fiz durante esse período: Mariana Ibbar, Fabiane Murakami, Karla, Bruna Daniela, Marcus Cremonesi, Alcione, Felipe Abboud, Emanuelle, Daniela, Bruna Ramalho, Daniel Malheiros, Leiken e Alinni, muito obrigado!

À grande amiga Sísara, por quatro anos de intensa convivência dentro e fora da Universidade, pelas ajudas, momentos de descontração e turismo curitibano.

Às pessoas que fizeram parte da graduação e mestrado, que incentivaram continuar na pesquisa e nos estudos; Juliana Barilli, Aloísio Chagas Jr, Viviane Moreira, Marcela Cristina (UFT) e as professoras Carolina Fernandes e Mara Pêsoa da Cruz (Unesp)

À todos que contribuíram para a realização deste trabalho e para meu crescimento pessoal e profissional... MUITO OBRIGADO!!

RESUMO GERAL

Os sistemas de preparo do solo e o manejo da palhada em solos sob uso agrícola podem afetar a sua qualidade física e o conteúdo de carbono orgânico. A qualidade física pode ser quantificada por meio dos indicadores de qualidade do solo, dentre eles o intervalo hídrico ótimo (IHO), sensível à compactação do solo, porém a relação com a produtividade das culturas ainda é discutida. Já o conteúdo de carbono orgânico pode ter relação com a curva de retenção de água no solo. O trabalho está estruturado em três capítulos, sendo o objetivo do primeiro: avaliar a qualidade física de um solo sob sistemas de preparo; do segundo: avaliar a influência do manejo da palhada do azevém em sistema de plantio direto, nos atributos físicos do solo; e do terceiro: avaliar a relação que as frações do carbono orgânico têm na retenção de água do solo. Para isso foram propostos dois experimentos: (I) o primeiro em um Latossolo Vermelho distrófico típico em Ponta Grossa - Paraná, em que os tratamentos foram os sistemas de preparo do solo adotado durante 21 anos na área: preparo convencional; plantio direto escarificado a cada três anos; e plantio direto. O segundo experimento (II) se deu em um Latossolo Bruno distrófico típico em Castro - Paraná, em que os tratamentos foram os manejos da palhada do azevém em sistema de plantio direto, adotado durante nove anos: azevém para silagem; azevém em cobertura e azevém pastejado. O delineamento experimental em ambos os experimentos foi em blocos ao acaso com três tratamentos e três blocos. O sistema de plantio direto com rotação de culturas proporcionou o maior IHO após 21 anos e maior produtividade de milho na safra de 2013/14. O manejo da palhada do azevém não tem influencia nos atributos físicos do solo e a influência do carbono orgânico particulado e do carbono orgânico associado aos minerais nos parâmetros da CRAS depende do sistema de preparo adotado na área.

Termos de Indexação: preparo convencional; escarificação; plantio direto; rotação de culturas; fracionamento físico da matéria orgânica; intervalo hídrico ótimo; curva de retenção de água.

GENERAL ABSTRACT

Soil tillage and straw management systems in soils under agricultural use can affect the physical quality and the organic carbon content of these soils. Soil physical quality can be quantified through soil quality indicators, among them the least limiting water range (LLWR), sensitive to soil compaction, but the relationship with crop productivity is still discussed. The organic carbon content may be related to the soil water retention curve. The work is structured in three chapters, the purpose of which is: to evaluate the physical quality of a soil under tillage systems; of the second: to evaluate the influence of the management of the ryegrass straw in no-tillage system, in the physical attributes of the soil and of the third: to evaluate the relation that the fractions of the organic carbon have in the retention of water of the soil. For this purpose, two experiments were proposed: (I) the first one in a typical dystrophic Red Latosol in Ponta Grossa - Paraná, where the treatments were the soil tillage systems adopted in the area: conventional tillage; chiseling every three years and no-tillage. The second experiment (II) occurred in a typical dystrophic Bruno Latosol (Haplohumox) in Castro - Paraná, where the treatments were the management of the ryegrass straw in a no-tillage system, adopted for nine years: ryegrass for silage; ryegrass in coverage and grazed ryegrass. The experimental design in both experiments was in randomized blocks with three treatments and three blocks.. The no-tillage system with crop rotation provided the highest LLWR after 21 years and increased maize productivity in the 2013/14 crop. There was no relationship between LLWR and soybean, corn, wheat and white oat crop yields accumulated over ten years. The management of ryegrass straw has no influence on soil physical attributes and the influence of particulate organic carbon and organic carbon associated with minerals on the parameters of SWRC depends on the tillage system adopted in the area.

Index terms: conventional tillage; chiseling; no-tillage; crop rotation; physical fractionation of organic matter; soil water retention curve; least limiting water range

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| INTRODUÇÃO GERAL | 9 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 14 |
| CAPÍTULO I: QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO, PRODUTIVIDADE DA SOJA E MILHO APÓS 21 ANOS SOB SISTEMAS DE PREPARO | 19 |
| RESUMO | 19 |
| ABSTRACT | 20 |
| INTRODUÇÃO | 21 |
| MATERIAL E MÉTODOS | 24 |
| RESULTADOS E DISCUSSÃO | 29 |
| CONCLUSÕES | 39 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 39 |
| CHAPTER II: INFLUENCE OF RYEGRASS MANAGERMENTS ON PHYSICAL ATTRIBUTES OF A HAPLOHUMOX | 46 |
| ABSTRACT | 46 |
| RESUMO | 47 |
| INTRODUCTION | 48 |
| MATERIAL AND METHODS | 49 |
| RESULTS AND DISCUSSION | 54 |
| CONCLUSIONS | 60 |
| REFERENCES | 60 |
| CAPÍTULO III: RELAÇÕES ENTRE O CARBONO ORGÂNICO E A CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DE UM LATOSSOLO VERMELHO | 65 |
| RESUMO | 65 |
| ABSTRACT | 66 |
| INTRODUÇÃO | 67 |
| MATERIAL E MÉTODOS | 69 |
| RESULTADOS E DISCUSSÃO | 73 |
| CONCLUSÕES | 83 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 83 |
| CONCLUSÕES GERAIS | 88 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS | 88 |

INTRODUÇÃO GERAL

As operações de preparo para incorporar fertilizantes e corretivos, facilitar o desenvolvimento radicular, infiltração de água e diminuir a competição da cultura com plantas espontâneas (Otsubo et al., 2012), são largamente utilizadas em solos sob uso agrícola, e conceituadas como preparo convencional (PC). O PC pulveriza o solo por meio do revolvimento, favorecendo a erosão, sendo um sistema que geralmente há reduzida qualidade física do solo. Assim, visando atenuar os problemas que o PC provoca nos solos, na década de 1960 surgiu o plantio direto (PD). Neste sistema a semeadura é feita sob os restos culturais da safra anterior, com revolvimento mínimo do solo, restrito somente à linha de plantio pela haste da semeadora (Reichert et al., 2009; Singh et al., 2014). O PD saiu em vantagem ao PC por ter custo reduzido, evitar perdas de solo por erosão e melhorar a qualidade do solo (Lal, 2000; Silva et al., 2015). O sistema foi amplamente aceito pelos produtores e corresponde atualmente a mais de 82% das lavouras brasileiras e quase 90% das paranaenses (FEBRAPDP, 2014).

Entretanto, por impor ao solo alta intensidade de tráfego e revolvimento do solo somente na linha de semeadura, alguns autores salientam que o PD pode influenciar negativamente a estrutura do solo, compactando a camada subsuperficial, resultando no “pé-de-plantio-direto” (Reichert et al., 2009), ocorrendo a redução da macroporosidade, aumento da densidade do solo e da resistência à penetração (Klein et al., 2009). Por outro lado, alguns trabalhos citam que o PD pode melhorar a estrutura do solo por acumular mais carbono orgânico (CO) em superfície (Bayer et al., 2006; Reis et al., 2014) e por favorecer a formação da porosidade do solo, por meio de bioporos, decorrente da presença do sistema radicular das culturas mantido no solo (Cavaliere et al., 2009), promovendo melhor aproveitamento de ar e água pelas plantas (Reynolds et al., 2002).

Uma alternativa que vem sendo adotada para aliar as vantagens do PD e atenuar os eventuais impactos negativos do sistema à estrutura do solo é a escarificação periódica do PD. Contudo os efeitos da escarificação nos atributos físicos dos solos ainda são bastante discutidos na literatura (Klein et al., 2009; Calonego e Rosolem, 2011; Lozano et al., 2016; Calonego et al., 2017). Nunes et al. (2015) detectaram os efeitos da escarificação na agregação de um Nitossolo Vermelho eutroférico por até seis meses após o manejo. Os autores observaram que a escarificação reduziu o diâmetro médio dos

agregados do solo estudado em relação ao tratamento sob PD. Calonego et al. (2017), ao compararem os atributos físicos de um Nitossolo Vermelho distroférico sob PD e PD+Escarificação a cada três anos, não detectaram diferenças na macroporosidade e na densidade do solo nos tratamentos estudados, três anos após a escarificação. No entanto Drescher et al. (2016) concluíram que os efeitos da escarificação nos atributos físicos do solo, relacionados ao transporte de água, podem ser detectados por até dois anos. Calonego et al. (2017) ressaltaram que a rotação de culturas, com vasta diversidade de plantas, tem efeito similar ao da escarificação em promover melhorias na qualidade física do solo em solos sob PD. O sistema radicular das culturas e o aporte de CO favorecem a descompactação do solo, reduzem a densidade e criam fluxo contínuo de poros, proporcionando infiltração de água e aeração suficiente ao desenvolvimento do sistema radicular das culturas.

Apesar dos benefícios da diversidade de material vegetal para os atributos físicos do solo, em regiões agrícolas do Brasil os produtores utilizam o PD, mas cultivam apenas duas espécies vegetais no solo, alternando as culturas durante vários anos. Em regiões produtoras de gado leiteiro, a prática de alternar duas culturas, uma para silagem e a outra para pastejo, é uma das mais empregadas. Na bacia leiteira de Castro-PR, a mais produtiva do país, o solo é cultivado basicamente com milho (*Zea mays*) durante a safra de verão, para a produção de silagem. Na safra de inverno o cultivo é com azevém (*Lolium multiflorum*), que pode ser retirado do solo para a produção de silagem ou submetido ao pastejo, sendo mais vantajoso por reduzir os custos de produção de silagem.

Entretanto, são poucos os estudos sobre o efeito do manejo da palhada do azevém nos atributos físicos do solo, pois a retirada das plantas do solo pode comprometer o incremento de CO. O tráfego de maquinários para realizar o corte também pode danificar a estrutura do solo. O pastejo compacta o solo devido à ação do pisoteio animal, sendo uma das práticas que mais degrada o solo quando realizada de forma inadequada (Debiasi e Franchini, 2012). Costa et al. (2009), ao avaliarem a influencia de três sistemas de manejos do azevém (pastejado, roçado ou dessecado) em PD e em PC, nos atributos físicos de um Cambissolo Húmico alumínico em Santa Catarina (Brasil), concluíram que nenhum dos manejos causaram impactos negativos nos atributos físicos avaliados no solo em PD. Os autores ressaltaram que as raízes mantem a agregação do solo,

promovem a formação e manutenção da porosidade e são fontes de CO em profundidade, o que favoreceu os resultados obtidos. De acordo com os autores, sob os mesmos manejos do azevém, o PC quando comparado ao PD, promoveu alterações negativas nos atributos físicos do Cambissolo Humico alúminico. Porém Auler et al. (2014) ao compararem o efeito de três sistemas de manejo de azevém (silagem, cobertura e pastejado) em PD, nos atributos físico-hídricos de um Latossolo Bruno distrófico no Paraná (Brasil), observaram que o tratamento azevém em cobertura proporcionou maior retenção de água em relação aos demais. O tratamento azevém em silagem promoveu menor teor de CO na camada de 0,00-0,10 m devido à ausência de palhada. A redução do conteúdo de CO em superfície pode favorecer a redução da qualidade física do solo no decorrer do tempo.

Uma característica do PD é o maior teor de CO em superfície se comparado ao PC, atribuído a preservação física do CO pela estrutura do solo, melhor nos sistemas com menos revolvimento (Chung et al., 2008; Six e Paustian 2014; Winck et al., 2014). Vale ressaltar que em condições similares de rotação ou sucessão de culturas, a adição de CO é similar em ambos os sistemas, somente a preservação é melhor em superfície nos sistemas onde o solo é menos revolvido (Six et al., 2002; Six e Paustian, 2014). O conteúdo de CO é um atributo químico chave nos estudos sobre qualidade do solo, pois reflete a funcionalidade e a sustentabilidade do sistema (Lal, 1997; Hartemink, 1998; Blanco-Moure et al., 2011), tendo efeitos na qualidade química, biológica e física do solo. A redução do conteúdo de CO geralmente está associada à redução da qualidade física do solo.

O CO pode influenciar diversos atributos físicos do solo, um destes é a retenção de água nos solos, seja diretamente, retendo água em sua superfície específica, ou indiretamente, por promover melhor estrutura e porosidade (Rawls et al., 2003; Silva Júnior et al., 2009). Alguns trabalhos correlacionam o CO com a curva de retenção de água no solo - CRAS (Rawls et al., 2003; Machado et al. 2008). Apesar de encontrar correlações que evidenciam a estreita relação do CO com a CRAS, os trabalhos ainda são controversos e necessitam estudos mais detalhados (Rawls et al., 2003; Braida et al., 2011). Rawls et al. (2003) observaram que o CO influenciou mais a água retida no potencial de -15000 hPa (ponto de murcha permanente) do que a água retida no potencial de -330 hPa (capacidade de campo) de um grupo de amostras representativas de quatro

classes de solos (Latosolos, Argissolos, Espodosolos e Gleissolos), coletados sob diferentes manejos no Estado do Colorado (EUA). A maior relação com a água retida no potencial de -15000 hPa é devido ao efeito do CO se sobressair à textura em solos arenosos. Cavazza et al. (2007) ao avaliarem a CRAS em um solo argiloso e orgânico sob uso agrícola na Itália, também atribuíram as modificações nos parâmetros da curva, em potenciais maiores, ao teor de CO. Em um dos poucos estudos sobre o tema em Latossolos Machado et al. (2008) concluíram que alterações negativas nos teores de CO no solo refletem em mudanças negativas na CRAS. Os autores verificaram, por meio de correlações canônicas, forte relação de CO e os parâmetros da CRAS de um Latossolo Vermelho sob mata nativa, pastagem com *Brachiaria decumbens* e uso agrícola.

Geralmente os trabalhos que relacionam conteúdo de água e CO fazem uso do valor total de CO, não separando por frações. Neste aspecto o fracionamento físico granulométrico é grande importante para demonstrar a fração de CO (particulada ou associada aos minerais) que mais influencia a retenção de água nos solos. O fracionamento físico granulométrico é mais indicado quando se visa comparar manejo de solo (Bayer et al., 2001).

O carbono orgânico particulado (COP) é uma das frações resultante do fracionamento físico granulométrico, sendo a mais eficiente em apontar melhores práticas de manejo e qualidade do solo, por ser mais acumulada na camada superficial do solo. Assim, a forma e a intensidade das operações de preparo afetam a dinâmica do COP nos solos (Six et al., 2002). Wink et al. (2014) observaram que o COP foi eficiente em detectar alterações da qualidade de um Latossolo Vermelho distrófico típico de textura argilosa, conduzido há 26 anos sob PD na região dos Campos Gerais-PR. Os autores concluíram que a COP influenciou o estoque de CO na camada de 0,00-0,20 m, e que a fração contribuiu com 30% do CO no solo, sendo um parâmetro significativo para comparar preparos e usos do solo, e indicar a qualidade do mesmo.

A qualidade do solo é conceituada como a capacidade do solo de proporcionar o bom desenvolvimento de plantas, potencializar o fluxo de água, ciclar nutrientes essenciais para a vida no planeta e servir como tampão ambiental (Doran, 1996) podendo ser dividida em: qualidade química; qualidade biológica; e a qualidade física. Apesar da evolução, as pesquisas em qualidade física do solo utilizam diversos atributos físicos. Assim a dinâmica física do solo pode ser governada por quatro fatores diretos que limitam

o crescimento de plantas: resistência à penetração, temperatura, porosidade de aeração e água, o último fator é o mais importante (Letey, 1985). Baseado nestes fatores, Silva et al. (1994), propuseram o intervalo hídrico ótimo (IHO) como indicador de qualidade física do solo. O IHO é um conjunto de atributos físicos que indica o conteúdo ótimo de água no solo em uma determinada densidade, a partir dos limites de disponibilidade de água no solo, superior (capacidade de campo) e inferior (ponto de murcha permanente), garantindo a aeração necessária para que ocorram as trocas gasosas para a cultura e mantendo a resistência à penetração não limitante às plantas.

O aumento da densidade do solo, proporcionado no PD, reflete em redução do IHO até uma densidade considerada crítica, em que $IHO=0$ (Wilson et al., 2013). Os autores afirmaram que densidade do solo superior à densidade crítica é um indicativo de que a estrutura do solo foi prejudicada. O IHO foi considerado por Lima et al. (2012) como o indicador de qualidade física mais recomendado para Latossolos, por possuir parâmetros muito afetados por alterações na estrutura do solo.

Determinar a situação da qualidade física do solo é essencial para manter o sistema produtivo. As operações de preparo de solo são necessárias para que ocorra o desenvolvimento das culturas, produzir e não degradar o solo seria ideal ao longo do tempo. A qualidade do solo, determinada por meio de indicadores, pode ser resultado da integração das funções biológicas e físicas do solo, conforme relataram Aziz et al. (2013). Os autores, ao avaliarem a qualidade física de um solo de textura siltosa, conduzido por cinco anos sob PC e PD, atribuíram ao incremento de CO os melhores valores de indicadores físicos de qualidade de solo no PD. Entretanto, os autores evidenciam que há necessidade de monitorar os indicadores no decorrer do tempo.

Baseado no exposto os estudos sobre qualidade física em experimentos de longa duração, são poucos e controversos, carecendo de estudos mais detalhados sobre as alterações físicas no solo. Assim a hipótese geral do trabalho é que a sistemas de uso e manejo do solo, quando conduzidos de forma adequada, não promovem redução da qualidade física do solo. Sendo os objetivos deste trabalho, avaliar a qualidade física do solo conduzido há 21 anos sob sistemas de preparo. Avaliar a influencia que o manejo da palhada do azevém tem nos atributos físicos do solo após nove anos sob esse manejo e determinar a relação que as frações do carbono orgânico têm na retenção de água do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AULER, A. C.; MIARA, S.; PIRES, L. F.; DA FONSECA, A. F.; BARTH, G. Soil physico-hydrical properties resulting from the management in Integrated Production Systems. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 45, n. 5 (especial), p. 976-989. 2014.

AZIZ, I.; MAHMOOD, T.; ISLAM, K. R. Effect of long term no-till and conventional tillage practices on soil quality. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 131, p. 28-35. 2013.

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

BAYER C, MARTIN-NETO L, MIELNICZUK J, PILLON CN, SANGOI L. Changes in Soil Organic Matter Fractions under Subtropical No-Till Cropping Systems. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 65, n. 5, p. 1473-1478. 2001.

BLANCO-MOURE, N.; GRACIA, R.; BIELSA, A.; LÓPEZ, M. V. Long-term effect of no-tillage on soil organic matter fractions in rainfed Aragon (NE Spain). **Spanish Journal of Soil Sciences**, Madrid, v. 1, n. 1, p. 116-121. 2011.

CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Least limiting water range in soil under crop rotations and chiseling. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 759-771. 2011.

CALONEGO, J. C.; RAPHAEL, J. P. A.; RIGON, J. P. G.; OLIVEIRA NETO, L.; ROSOLEM, C. A. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. **European Journal of Agronomy**, Amsterdã, v. 85, p. 31-37. 2017.

CAVALIERI, K. M. V., DA SILVA, A. P., TORMENA, C. A. LEÃO, T. P.; DEXTER, A. R.; HÅKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a

Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 103, p. 158-164. 2009.

CAVAZZA, L.; PATRUNO, A.; CIRILLO, E. Effect of yearly oscillating water table on soil moisture retention curves. **Biosystems Engineering**, Amsterdã, v. 98, p. 257-265. 2007.

CHUNG, H.; GROVE, J. H.; SIX, J. Indications for soil C saturation in a temperate agroecosystem. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, p. 1132-1139. 2008.

COSTA, A.; ALBUQUERQUE, J. A.; MAFRA, A. L.; SILVA, F. R. Propriedades físicas do solo em um sistema de manejo na integração agricultura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v. 33, p. 235-244. 2009.

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C. Atributos físicos do solo e produtividade da soja em sistema de integração lavoura-pecuária com braquiária e soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, p. 1180-1186. 2012.

Doran, J. W.; Parkin, T. B. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: Doran, J. W.; Jones, A. J (Ed.). **Methods for Assessing Soil Quality**. Madison, SSSA, 1996, p. 25-37.

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, Brasília**, v. 51, n. 2, p. 159-168. 2016.

FEBRAPDP, Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha. Evolução do Sistema de Plantio Direto no Paraná [internet]. Foz do Iguaçu-PR: Federação Brasileira de Plantio Direto e Irrigação, 2015. Acesso em 1º/junho/2017, disponível em http://febrapdp.org.br/download/EVOLUCAO_DO_SPD_NO_PARANA_2014.pdf

HARTEMINK, A. E. Soil chemical and physical properties as indicators of sustainable land management under sugar cane in Papua New Guinea. **Geoderma**, Amsterdã, v. 85, n. 4, p. 283-306. 1998.

KLEIN, V. A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T. Indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico típico sob plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 9, p. 2475-2481. 2009.

LAL, R. Soil quality and sustainability. In: LAL, R.; BLUM, W. H.; VALENTIN, C.; STEWART, B. A. Ž (Ed.). **Methods for Assessment of Soil Degradation.**, Boca Raton CRC Press, 1997, pp. 17-30.

LAL, R. Physical management of the soils of the tropics: priorities for the 21st century. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 165, p. 191-207. 2000.

LETEY, J. Relationship between Soil Physical Properties and Crop Production. In: STEWART, B. A. (Ed) **Advances in Soil Science**. New York, NY:Springer, 1985. v. 1, p. 277-294.

LIMA, V. M. P.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; CURI, N.; EVANGELISTA, A. R. Intervalo hídrico ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 71-78. 2012.

LOZANO, Z. A.; SORACCO, C. G.; VILLARREAL, R.; RESSIA, J. M.; SARLI, G. O.; FILGUEIRA, R. R. Soil physical quality and soybean yield as affected by chiseling and subsoiling of a no-till soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 40, p. 1-12. 2016.

MACHADO, J. L.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; SCAPIM, C. A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 495-502. 2008.

NUNES, M. R.; DENARDIN, J. E.; PAULETTO, E. A.; FAGANELLO, A.; PINTO, L. F. S. Effect of soil chiseling on soil structure and root growth for a clayey soil under no-tillage. **Geoderma**, Amsterdã, v. 259, p. 149-155. 2015.

OTSUBO, A. A.; BRITO, O. R.; PASSOS, D. P.; DE ARAÚJO, H. S.; MERCANTE, F. M.; OTSUBO, V. H. N. Formas de preparo de solo e controle de plantas daninhas nos fatores agronômicos e de produção da mandioca. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, p. 2241-2246. 2012.

RAWLS, W. J.; PACHEPSKY, Y. A.; RITCHIE, J. C.; SOBECKI, T. M.; BLOODWORTH, H. Effect of soil organic carbon on soil water retention. **Geoderma**, Amsterdã, v. 116, p. 61-76. 2003.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 102, p. 242-254, 2009.

REIS, C. E. S.; DICK, D. P.; CALDAS, J. S.; BAYER, C. Carbon sequestration in clay and silt fractions of Brazilian soils under conventional and no-tillage systems. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 71, p. 292-301. 2014.

REYNOLDS WD, BOWMAN BT, DRURY CF, TAN CS, LU X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, Amsterdã, v. 110, p. 131-146, 2002.

SILVA JÚNIOR, M. L.; DESJARDINS, T.; SARRAZIN, M.; MELO, V. S.; MARTINS, P. F. S.; SANTOS, E. R.; CARVALHO, C. J. R. Carbon content in Amazonian Oxisols after forest conversion to pasture. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 603-611. 2009.

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

SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; SILVA, E. A.; FERREIRA, M. M.; NORTON, L. D.; CURI N. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic latosol as affected by soil management. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 154, p. 103-113. 2015.

SINGH A, PHOGAT VK, DAHIYA R, BATRA SD. Impact of long-term zero till wheat on soil physical properties and wheat productivity under rice-wheat cropping system. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 140, p. 98-105. 2014;

SIX, J.; CONANT, R. T.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. **Plant Soil**, Berlin, v. 241, p.155-176. 2002.

SIX, J.; PAUSTIAN, K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdã, v. 68, p. A4-A9. 2014.

WILSON, M. G.; SASAL, M. C.; CAVIGLIA. O. P. Critical bulk density for a Mollisol and a Vertisol using least limiting water range: Effect on early wheat growth. **Geoderma**, Amsterdã. v. 192, p. 354-361. 2013.

WINCK, B. R.; VEZZANI, F. M.; DIECKOW, J.; FAVARETTO N.; MOLIN, R. Carbono e nitrogênio nas frações granulométricas da matéria orgânica do solo, em sistemas de culturas sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 980-989. 2014.

CAPÍTULO I: QUALIDADE FÍSICA DE UM LATOSSOLO VERMELHO, PRODUTIVIDADE DA SOJA E MILHO APÓS 21 ANOS SOB SISTEMAS DE PREPARO

RESUMO

Os sistemas de preparo do solo podem ter efeitos negativos na qualidade física do mesmo, assim os indicadores, como o intervalo hídrico ótimo, são essenciais mensurar os impactos dos sistemas de preparo na qualidade física do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade física, produtividade de soja e milho em um solo conduzido por 21 anos, sob sistemas de preparo. Os dados são de um Latossolo Vermelho distrófico típico, de textura argilosa, em que os tratamentos foram sistemas de preparo: preparo convencional; plantio direto escarificado a cada três anos e plantio direto. O delineamento foi em blocos ao acaso, com três tratamentos e três blocos. Em maio de 2014 foram amostradas as camadas 0,00-0,15 e 0,15-0,30 m para a determinação da textura, carbono orgânico total e densidade de partículas; amostras indeformadas nas referidas camadas para a determinação da curva de retenção de água no solo, da curva de resistência à penetração radicular e a densidade do solo. O intervalo hídrico ótimo foi determinado a partir do ajuste das curvas, dos dados de densidade do solo e porosidade de aeração. A produtividade de soja e milho na safra de 2013/14 foi determinada a partir da colheita da área útil de cada parcela. A escarificação a cada três anos não proporcionou melhorias à qualidade física do Latossolo Vermelho após 21 anos sob este sistema de preparo. A rotação de culturas adotada durante 21 anos superou o efeito dos sistemas de preparo do solo em manter a qualidade física do Latossolo Vermelho. O sistema de plantio direto com rotação de culturas proporcionou o maior intervalo hídrico ótimo após 21 anos e maior produtividade de milho na safra de 2013/14. Não houve relação entre o intervalo hídrico ótimo e a produtividade das culturas da soja, milho, trigo e aveia-branca acumulada durante dez anos.

Termos de indexação: preparo convencional; escarificação; plantio direto; rotação de culturas; intervalo hídrico ótimo.

CHAPTER I: PHYSICAL QUALITY OF A RED LATOSOL (OXISOL), SOYBEAN AND CORN PRODUCTIVITY AFTER 21 YEARS UNDER TILLAGE SYSTEMS

ABSTRACT

Soil tillage systems can have negative effects on the soil physical quality, and then physical quality indicators, for example least limiting water range, are essential to evaluate the impacts of the tillage systems. The objective of this work was to evaluate the soil physical quality, productivity the soybean and corn in the 2013/14 crop. The data are of a typical dystrophic Red Latosol, of clay texture, in which the treatments were tillage systems: conventional tillage; chiseling every three years and no-tillage. The experimental design was in randomized blocks, with three treatments and three blocks. In May 2014 deformed soil samples were collected in the 0.00-0.15 m layer and 0.15-0.30 m for the determination of texture, total organic carbon and particle density; samples undeformed in said layers for the determination of the water retention curve in the soil, the resistance curve to root penetration and bulk density. The least limiting water range was determined from the adjustment of the curves, the bulk density data and the aeration porosity. The yield of soybean and maize in the 2013/14 crop was determined from the harvest of the useful area of each plot. Chiseling every three years did not provide improvements to the physical quality of Red Latosol after 21 years under this tillage system. The crop rotation adopted over 21 years overcame the effect of soil tillage systems on maintaining the physical quality of Red Latosol. The no-tillage system with crop rotation provided the greatest least limiting water range after 21 years and increased maize productivity in the 2013/14 crop. There was no relation between the optimum water range and the yield of the soybean, corn, wheat and white oats accumulated during ten years.

Index terms: conventional tillage; chiseling; no-tillage; crop rotation; least limiting water range.

INTRODUÇÃO

A qualidade física do solo é muito influenciada pelas operações de preparo do solo. O preparo convencional (PC) geralmente promove perdas de solo, de nutrientes e de carbono orgânico (CO) por erosão, devido ao intenso revolvimento do solo, além de causar compactação do solo em subsuperfície. Devido à intensa erosão e degradação dos solos, o sistema de plantio direto (PD) foi introduzido na década de 1960 em substituição ao PC e corresponde, atualmente, à aproximadamente 117 milhões de hectares no mundo, sendo 37 milhões em solos brasileiros (FEBRAPDP, 2014). No Brasil, o Paraná é o estado pioneiro na utilização do sistema, com cerca de 5,5 milhões de hectares cultivados sob PD (FEBRAPDP, 2014).

No PD, o solo é revolvido somente na linha de plantio pelos sistemas de abertura do sulco para a deposição de sementes e fertilizantes pela semeadora (Drescher et al., 2011; Seben Júnior et al., 2014). Dentre os inúmeros benefícios do PD destacam-se menores perdas de solo por erosão, o acúmulo e preservação do CO em superfície (Medeiros et al., 2011) e melhoria da estrutura do solo (Girardello et al., 2014). Contudo, são reportados alguns prejuízos à qualidade física do solo, como aumento da densidade do solo (ρ_s) em superfície (Drescher et al., 2011) e eventuais prejuízos ao desenvolvimento radicular, o que pode comprometer a produtividade das culturas (Cavaliere et al., 2006).

Uma alternativa que vem sendo adotada pelos produtores para atenuar os possíveis prejuízos do PD aos solos consiste na escarificação periódica do solo, melhorando suas condições físicas, diminuindo a densidade do solo (ρ_s) e incorporando CO em profundidade (Calonego & Rosolem, 2011). Entretanto, são contraditórios os resultados sobre quanto tempo perdura o efeito da escarificação nos atributos físicos do solo e qual seria o tempo ideal após o início do PD para adotar tal manejo. De acordo com Drescher et al. (2011), a escarificação tem efeito passageiro na melhoraria da qualidade física do solo. Segundo os autores, os efeitos da escarificação na ρ_s podem ser detectados por até dois anos e na macroporosidade são inferiores a seis meses. Rosa et al. (2008) consideraram que a escarificação é eficiente para melhorar a macroporosidade dos solos, tendo efeitos benéficos por até quatro anos.

Outro ponto discutido é a real necessidade de escarificação dos solos sob PD, pois com o tempo, a estrutura do solo sob PD pode apresentar condições favoráveis aos processos físicos necessários para funções agrônômicas e ambientais. Calonego & Rosolem (2011), avaliando a qualidade física de um Nitossolo Vermelho de textura argilosa sob PD, com rotação de culturas e escarificação a cada três anos, relataram que a rotação de culturas girassol (*Helianthus annuus*), crotalária (*Crotalaria juncea*), triticales (*Triticosecale rimpau*), milheto (*Pennisetum americanum*) e girassol adotada no PD durante três anos, teve efeito similar à escarificação realizada a cada três anos em reduzir a ρ_s . Os autores concluíram que tanto a escarificação efetuada a cada três anos quanto a rotação de culturas teve efeito positivo na qualidade física do solo estudado.

Para avaliar o impacto que os sistemas de preparo têm na física do solo, utilizam-se propriedades físicas do solo com potencial para quantificar a qualidade física, as quais são denominadas de indicadores de qualidade física do solo (IQFS).

O Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), definido por Tormena et al. (1998) é um IQFS que considera o conteúdo de água no solo em que são mínimas as limitações de disponibilidade de água, aeração e resistência à penetração radicular num determinado valor de densidade, é amplamente utilizado para o quantificar a qualidade física do solo, sendo sensível às alterações na estrutura do solo (Lima et al., 2012; Gubiani et al., 2013). Em solos com degradação estrutural é observado redução do IHO devido ao aumento da ρ_s . Valores de ρ_s que conferem IHO=0 são chamados de densidade do solo crítica (ρ_{sc}) e quanto maior a frequência de valores de $\rho_s > \rho_{sc}$ mais degradado está o solo (Cavaliere et al., 2006; Lima et al., 2012).

Diversos trabalhos citam a eficiência do IHO em avaliar a qualidade física do solo (Calonego & Rosolem, 2011; Lima et al., 2012; Gubiani et al., 2013; Gonçalves et al., 2014; Cecagno et al., 2016). Porém, poucos trabalhos atrelam IHO à produtividade das culturas. Benjamin et al. (2003), ao avaliaram o IHO de um Argissolo sob rotação de culturas com trigo (*Triticum sativum*), milho (*Zea mays*), girassol e milheto concluíram que houve relação positiva entre o IHO e a produtividade do trigo, fato que não foi observado para as demais culturas. Os autores consideram que práticas que aumentam o IHO tem potencial de melhorar a produtividade das culturas. Todavia, Gubiani et al. (2013) não obtiveram relação do IHO com produtividade de grãos de milho em um Latossolo Vermelho distroférico sob PD, PD+Escarificação e PD+Compactação adicional. Mas o

IHO foi eficiente para detecção da compactação do solo. Logo, cabem ajustes na metodologia do IHO para verificar a relação dos IQFS e produtividade das culturas (Gonçalves et al., 2014; van Lier e Gubiani, 2015; Cecagno et al., 2016).

Em termos metodológicos, o valor de resistência à penetração (RP) limitante ao crescimento radicular ainda é uma questão a ser pesquisada, este pode variar conforme a cultura e o sistema de manejo adotado na área. Tormena et al. (1998), consideraram o valor de 2,0 MPa como RP limitante ao crescimento radicular, valor que vem sendo adotado em vários trabalhos para a determinação do IHO (Medeiros et al., 2011; Guimarães et al., 2013; Chen et al., 2015). Porém, diversos trabalhos utilizam valores de RP limitante distintos ao proposto anteriormente para a determinação do IHO, como: 2,5 MPa (Cavaliere et al., 2006; Lima et al., 2012; Moreira et al., 2014); 3,0 MPa (Cavaliere et al., 2011; Silva et al., 2015); e 3,5 MPa (Seben Júnior et al., 2014). Diversos trabalhos consideram o valor de 3,5 MPa como RP limitante ao crescimento radicular, em PD devido às condições estruturais do sistema (Moraes et al., 2014, 2017), favorecido pela: rede de bioporos formada, melhorando o crescimento radicular (Cavaliere et al., 2009; Moraes et al., 2014); maior aporte de CO em superfície, aumentando a disponibilidade de água às plantas. Em solos sob PC é recomendado manter o valor de 2,0 MPa como RP limitante (Moraes et al., 2014). Em solos sob PD+Escarificação, Moraes et al. (2014), recomendaram o valor de 3,0 MPa como RP limitante ao crescimento radicular. Valores intermediários ao recomendado no PD e PC são utilizados nos sistemas escarificados devido aos solos sob este manejo permanecerem maior parte do tempo sem revolvimento. O que atrela as vantagens do PD, entretanto por serem escarificados pode haver algum prejuízo à estrutura, característica de PC. Como a escarificação não pulveriza o solo, o valor adotado em solos no sistema está mais próximo daquele adotado em PD.

Neste contexto, um solo agrícola só pode ser considerado degradado se os parâmetros adotados para a quantificação do IHO forem os recomendados para o manejo adotado, visto que os manejos são distintos e proporcionam condições particulares aos solos. Utilizar um valor de RP limitante diferente do recomendado para o manejo pode acarretar em desvios das estimativas do IHO e levar a erros na tomada de decisão baseado em sua descrição.

A hipótese deste trabalho foi que a longo prazo a redução das operações de preparo do solo promove melhoria da qualidade física do solo e o sistema que promove melhorias da qualidade física do solo promove incrementos na produtividade das culturas. Teve-se por objetivo avaliar a qualidade física de um solo conduzido por 21 anos, sob sistemas de preparo e determinar a produtividade da soja e do milho na safra 2013/14.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no município de Ponta Grossa-PR (25° 5' 42" S e 50° 9' 43" O), em que o clima da região, de acordo com Köppen, é temperado úmido (Cfb) com a temperatura média de 18 °C no mês mais frio, 22 °C no mês mais quente e, ocorrências de geada no inverno; a precipitação mensal no período de 2004 à 2014 está apresentada na Tabela 1. O relevo é suave ondulado e o solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico de classe textural argilosa (Tabela 2).

Tabela 1: Precipitação mensal (milímetros) de 10 anos antes da avaliação do experimento no município de Ponta Grossa – PR.

| Ano/Mês | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Jan | 174 | 234 | 139 | 210 | 130 | 296 | 174 | 177 | 147 | 87 | 252 |
| Fev | 70 | 38 | 106 | 202 | 75 | 156 | 206 | 263 | 135 | 272 | 109 |
| Mar | 135 | 78 | 68 | 115 | 198 | 87 | 240 | 98 | 116 | 127 | 182 |
| Abr | 191 | 104 | 10 | 98 | 202 | 18 | 147 | 99 | 352 | 96 | 115 |
| Mai | 232 | 81 | 11 | 120 | 91 | 49 | 103 | 31 | 53 | 101 | 123 |
| Jun | 73 | 69 | 40 | 9 | 112 | 108 | 58 | 122 | 304 | 337 | 220 |
| Jul | 149 | 54 | 28 | 181 | 39 | 325 | 102 | 128 | 82 | 130 | 54 |
| Ago | 14 | 54 | 48 | 16 | 189 | 94 | 38 | 357 | 20 | 25 | 45 |
| Set | 77 | 265 | 200 | 36 | 43 | 271 | 55 | 32 | 151 | 144 | 215 |
| Out | 215 | 242 | 95 | 44 | 190 | 220 | 202 | 179 | 118 | 98 | 60 |
| Nov | 92 | 92 | 133 | 124 | 110 | 204 | 122 | 120 | 119 | 59 | 160 |
| Dez | 176 | 38 | 119 | 247 | 123 | 195 | 234 | 198 | 134 | 96 | 379 |
| Total | 1598 | 1295 | 997 | 1322 | 1502 | 1803 | 1681 | 1804 | 1731 | 1572 | 1914 |

Tabela 2: Valores médios de areia grossa, areia fina, areia total, silte, argila e densidade de partículas (ρ_p) do Latossolo Vermelho distrófico.

| | Areia | | | Silte | Argila | ρ_p g cm ⁻³ |
|----------|--------|------|--------------------|-------|--------|--------------------------------|
| | Grossa | Fina | Total | | | |
| | | | g kg ⁻¹ | | | |
| | | | 0,00-0,15 m | | | |
| C | 183 | 192 | 375 | 106 | 519 | 2,59 |
| E | 200 | 190 | 390 | 131 | 479 | 2,57 |
| D | 196 | 185 | 381 | 90 | 529 | 2,62 |
| | | | 0,15-0,30 m | | | |
| C | 167 | 181 | 348 | 121 | 531 | 2,58 |
| E | 187 | 190 | 377 | 100 | 523 | 2,59 |
| D | 175 | 175 | 350 | 70 | 571 | 2,61 |

C = Preparo convencional; E = Plantio Direto com escarificação (uma escarificação a cada três anos); D = Plantio direto.

Até o ano de 1967 a área estava sob mata, nativa quando ocorreu a conversão para lavoura. Durante as três primeiras safras de inverno o solo foi cultivado com arroz (*Oryza sativa*) utilizando o preparo convencional do solo - PC (uma aração e duas gradagens) e mantido em pousio durante as safras de verão. Na terceira safra de verão o solo foi cultivado com soja (*Glycine max*) em PC e a sucessão soja/arroz sob PC foi adotada até o ano de 1981, quando se iniciou o sistema de plantio direto (PD) na área com o cultivo de soja e trigo nas safras de verão e inverno, respectivamente. Em março de 1993 o solo da área começou a ser preparado para a instalação do experimento. Para isso foram aplicados e incorporados ao solo 4,5 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico e 400 kg ha⁻¹ de fosfato magnesiano. A semeadura da aveia-preta (*Avena strigosa*) para cobertura na safra de inverno ocorreu em maio de 1993 e partir desta data houve rotação de culturas entre as safras, com milho (*Zea mays*), ervilhaca (*Lathyrus sativus*) e soja nas safras de verão e aveia-preta, aveia-branca (*Avena sativa*) e trigo (*Triticum sativum*) nas safras de inverno. O cultivo foi em sistema tri-anual de rotação de culturas, em que houve cultivo de soja e milho para grãos e ervilhaca para cobertura do solo durante a safra de verão (setembro-outubro) e na safra de inverno (maio-junho) houve cultivo de trigo para grãos e aveia-branca ou aveia-preta para cobertura do solo, sendo a ordem de cultivo: aveia-preta/milho/aveia-branca/soja/trigo/soja/ervilhaca/aveia-preta. O experimento foi em blocos ao acaso, com três tratamentos e três repetições, cada parcela ocupou uma área de 8,33 m de largura × 25,0 m de comprimento e a bordadura foi de 1,0 m em todos os lados da parcela.

Os tratamentos estudados foram: Preparo Convencional – C; Preparo com Escarificação – E; e Plantio Direto - D. No tratamento C o solo foi mobilizado com uma

aração e duas gradagens até a profundidade de 0,20 m antes do plantio de cada safra; no tratamento E as plantas foram cultivadas sob PD e a cada três anos era realizado uma escarificação mecânica até a profundidade de 0,30 m antes do plantio da safra de inverno. No tratamento D, a semeadura foi sob PD com reduzido revolvimento do solo, somente na linha de plantio provocado pela haste da semeadora.

A semeadura da soja ocorreu na primeira quinzena de novembro de 2013 e a colheita em abril de 2014. Utilizou-se o híbrido NA5909RG, na densidade de plantio de 325000 plantas ha⁻¹, com espaçamento entre linhas de 0,40 m. Após a colheita da soja, em 16 de maio de 2014 foi semeado aveia-preta para cobertura do solo, utilizando o cultivar “Agro Coxilha”, na densidade de plantio de 2070000 plantas ha⁻¹, com espaçamento entre linhas de 0,17 m. Ao atingir altura de aproximadamente 0,25 m a aveia-preta foi dessecada com Glyphosato (1200 g ha⁻¹). A semeadura do milho ocorreu em 18 de setembro de 2014 utilizando o híbrido P30F53YM, na densidade de plantio de 75000 plantas ha⁻¹, espaçadas entre linhas de 0,17 m. A colheita do milho foi realizada em março de 2015. A cultura da soja recebeu como adubação de base 300 kg ha⁻¹ de 00-20-20 (N-P-K) no momento da semeadura. A cultura do milho recebeu como adubação de base 300 kg ha⁻¹ de 12-32-00 (N-P-K) + 1 kg ha⁻¹ de Zn no momento da semeadura e uma adubação de cobertura no início do florescimento da cultura com 320 kg ha⁻¹ de uréia e 150 kg ha⁻¹ de KCl.

A coleta das amostras de solo ocorreu em 16 de maio de 2014, antes da escarificação no tratamento E e do revolvimento no tratamento C. Foram abertas duas trincheiras na área útil da parcela e amostradas as camadas de 0,00-0,15 e 0,15-0,30 m. Em cada trincheira foram coletadas amostras deformadas de solo, assim como, seis amostras indeformadas de solo por camada, em cilindros de metal (0,035 m de altura × 0,05 m de diâmetro), totalizando 216 amostras indeformadas no experimento. No campo as amostras indeformadas foram envoltas em filme plástico e encaminhadas ao laboratório para serem processadas.

As amostras deformadas foram secas em estufa de circulação de ar à 60 °C durante 24 horas e, após o período, foram passadas em peneiras de 2 mm, para a determinação da textura do solo com o método densímetro de Bouyoucus, densidade de partículas (ρ_p) com o método proposto por Gubiani et al. (2006) (Tabela 1), e conteúdo de carbono orgânico total (COT) com o método de Walkley-Black (Figura 1).

Após serem processadas em laboratório, as amostras indeformadas de solo foram saturadas elevando-se uma lâmina d'água até 2/3 da altura do cilindro durante 48 horas. As amostras saturadas foram pesadas para a determinação da umidade volumétrica na saturação (θ_s). Todas as amostras saturadas foram submetidas aos potenciais de -20 e -60 hPa em mesa de tensão e pesadas após atingirem o equilíbrio em cada potencial. Depois de serem equilibradas no potencial de -60 hPa as amostras foram divididas em dois grupos. Cada grupo contou com seis amostras de cada trincheira. O primeiro grupo de amostras foi submetido aos potenciais de -80; -100; -250; -330; -1000 hPa e o segundo grupo aos potenciais de -5000 e -15000 hPa em câmara de Richards, com auxílio de placa porosa (Klute, 1986).

Após serem equilibradas no potencial de -15000 hPa, as amostras dos dois grupos foram re-saturadas conforme descrito anteriormente e submetidas a seis tempos de secagem (0,34; 1,0; 3,0; 4,5; 6,0 e 7,5 horas) em estufa à 45 °C, para criar um gradiente de umidade. Uma amostra por trincheira foi submetida a cada tempo de secagem, para determinação da resistência à penetração radicular (RP), seguindo os procedimentos de Moreira et al. (2014).

A RP foi determinada em laboratório com um penetrômetro de bancada (ângulo de 30° e diâmetro do cone de 0,004 m), conforme Tormena et al. (1998). A umidade referente a resistência à penetração (θ_{RP}) se deu pela pesagem das amostras antes de serem submetidas à penetrometria. Após a determinação da RP as amostras foram secas em estufa a 105 °C durante 36 horas, para a obtenção da massa seca do solo e calculada densidade do solo (ρ_s) (Grossman e Reinsch, 2002).

Com os dados de RP, θ_{RP} e θ referente a cada potencial, foram ajustadas as equações da curva de retenção de água no solo (CRAS) e da curva de resistência à penetração do solo (CRP). A CRAS foi ajustada com o modelo proposto por van Genuchten (1980), conforme a Equação 1:

$$\theta = \theta_R + \frac{(\theta_s - \theta_R)}{\{1 + [\alpha \cdot |\psi|]^n\}^{1-1/n}} \quad (1)$$

em que: θ = umidade volumétrica referente ao potencial ($m^3 m^{-3}$); θ_s = umidade volumétrica na saturação ($m^3 m^{-3}$); ψ = potencial mátrico da água no solo em módulo

(hPa); θ_R = umidade volumétrica residual ($m^3 m^{-3}$), α e n são os parâmetros de ajuste da equação.

A CRP, que sofre influência de θ e ρ_s , foi ajustada pelo modelo não linear de Busscher (1990), conforme a Equação 2:

$$RP = f \theta^d \rho_s^e \quad (2)$$

A forma linearizada da Equação 3, está expressa na Equação 3:

$$\ln RP = \ln f + (d \ln \theta) + (e \ln \rho_s) \quad (3)$$

em que: RP = resistência à penetração radicular (MPa), θ = umidade volumétrica de água no solo ($m^3 m^{-3}$) no momento que se determinou a RP (θ_{RP}), ρ_s = densidade do solo ($g cm^{-3}$), f , d e e são os parâmetros de ajuste da equação.

O intervalo hídrico ótimo (IHO) foi determinado com base nos procedimentos descritos por Tormena et al. (1998) e Moreira et al. (2014). Os valores de umidade adotados foram os seguintes: umidade na capacidade de campo (θ_{CC}), referente ao valor de umidade ajustado para o potencial de -100 hPa utilizando a CRAS (Moreira et al., 2014); a umidade no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}), referente ao valor de umidade ajustado para o potencial de -15000 hPa (Moreira et al., 2014). A determinação da umidade em que a RP atinge o valor crítico de 2,0 MPa, 3,0 MPa e 3,5 MPa foi realizada isolando θ e fixando o valor de RP utilizando a Equação 2. A umidade que garanta pelo menos 10% de poros com ar (Grable e Siemer, 1968) foi obtida por meio da Equação 4:

$$\theta_{AR} = \left[1 - \left(\frac{\rho_s}{\rho_p} \right) \right] - 0,10 \quad (4)$$

em que: θ_{AR} = umidade volumétrica para manter 10% de poros com ar no solo; ρ_s = densidade do solo ($g cm^{-3}$); ρ_p = densidade de partículas ($g cm^{-3}$).

Com os parâmetros obtidos foi determinado o IHO, considerando as condições propostas a seguir: Se $\theta_{AR} \geq \theta_{CC}$ e $\theta_{RP} \leq \theta_{PMP}$: IHO = $\theta_{CC} - \theta_{PMP}$; Se $\theta_{AR} \geq \theta_{CC}$ e $\theta_{RP} \geq \theta_{PMP}$: IHO = $\theta_{CC} - \theta_{RP}$; Se $\theta_{AR} \leq \theta_{CC}$ e $\theta_{RP} \leq \theta_{PMP}$: IHO = $\theta_{AR} - \theta_{PMP}$; Se $\theta_{AR} \leq \theta_{CC}$ e $\theta_{RP} \geq \theta_{PMP}$: IHO = $\theta_{AR} - \theta_{RP}$.

A produtividade de soja e milho na safra de 2013/14 foi obtida a partir dos dados da colheita da área útil de cada parcela; os dados estão expressos em kg ha⁻¹.

Os modelos da CRAS e da CRP foram ajustados na rotina PROC GLM e PROC REG no *software* SAS (SAS Institute, 2002). A densidade crítica do solo (ρ_{sc}) foi obtida por meio da intersecção do limite inferior e superior do IHO. Foram testadas a distribuição de normalidade dos dados de COT, ρ_s e produtividade de soja e milho com o teste de Shapiro-Wilk, e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), obtido no *software* SAS (SAS Institute, 2002).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os sistemas de preparo promoveram teores de carbono orgânico total (COT) similares na camada 0,00-0,15 e 0,15-0,30 m (Figura 1). A ausência de diferença significativa entre os tratamentos nas camadas avaliadas pode ser atribuída à adição de material vegetal similar para todos os tratamentos, advindo da rotação de culturas, com aveia-preta/milho/aveia-branca/soja/trigo/soja/ervilhaca/aveia-preta, durante 21 anos no experimento. Os resultados estão de acordo com Piva et al. (2012) que não detectaram diferenças no teor de COT na camada de 0,00-0,20 m de um Latossolo Bruno sob PD e PC. Os autores também atribuíram os resultados à rotação de culturas, visto que não houve menor teor de COT no PC, que expõe o resíduo vegetal à ação dos microrganismos.

O COT determinado na camada 0,00-0,15 m indica que a rotação de culturas adotada na área estudada superou o efeito das operações de preparo, ocorridas em C e E, indicando que a rotação de culturas promoveu a estabilização do sistema após 21 anos. Shahbaz et al. (2017) verificaram que o incremento de COT é linear à adição de material vegetal no solo. O aporte de COT na camada de 0,15-0,30 m, nos tratamentos C e E, foi influenciado pela ação de revolvimento que incorporaram material vegetal no solo, além de beneficiar o crescimento radicular, o que favorece o incremento de COT em subsuperfície (Shahbaz et al., 2017).

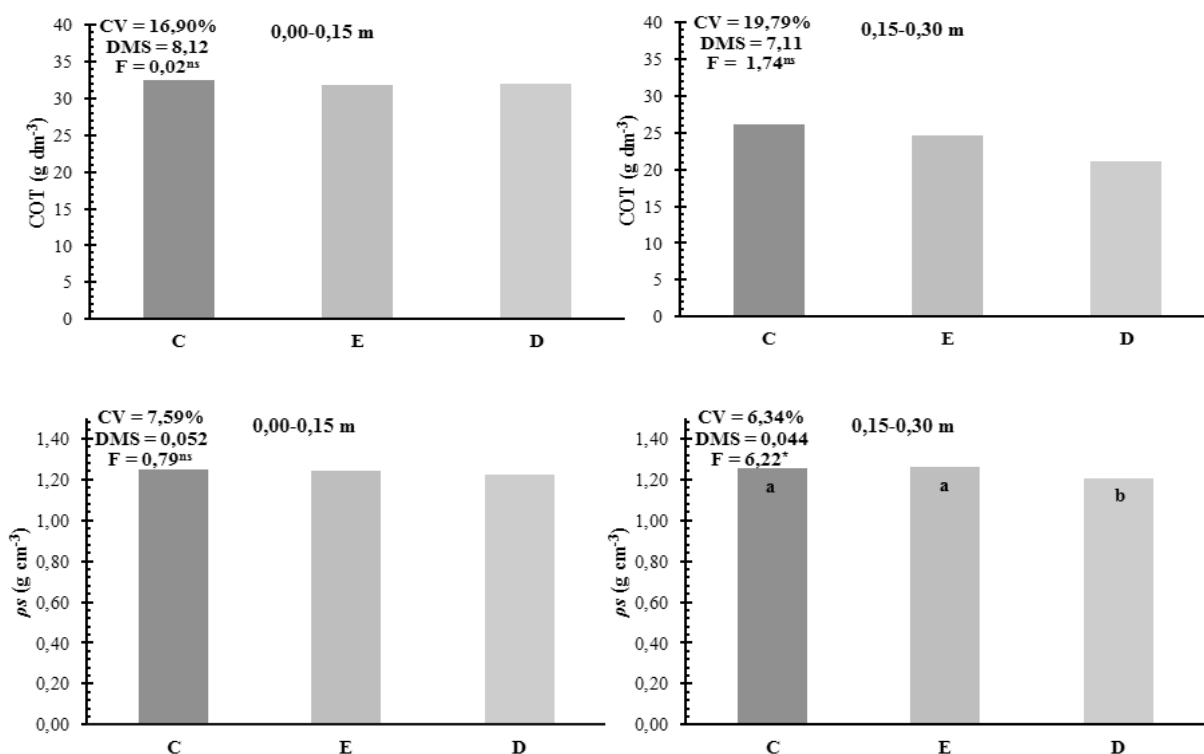


Figura 1: Conteúdo de carbono orgânico total (COT) na camada 0,00-0,15 e 0,15-0,30 m e densidade do solo (ρ_s) na camada 0,00-0,15 e 0,15-0,30 m do Latossolo Vermelho, com redução nas operações de preparo. C = Preparo convencional; E = Plantio direto com escarificação (uma escarificação a cada três anos); D = Plantio direto. CV = coeficiente de variação (%); DMS = Diferença mínima significativa; F = Teste F; ^{ns} = não significativo. Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os sistemas de preparo não promoveram diferenças significativas na ρ_s determinada na camada 0,00-0,15 m porém promoveram diferença na camada 0,15-0,30 m, sendo o menor valor obtido em D (Figura 1). O sistema radicular das culturas mantido no solo, o alto teor de COT em superfície advindos de 21 anos de rotação de culturas, a intensa ação biológica e os ciclos de umedecimento e secagem de solo mais intenso na camada superficial favoreceram os valores similares da ρ_s na camada 0,00-0,15 m (Drescher et al., 2011; 2016). O revolvimento do solo em C e E, aliado ao tráfego de maquinários para as operações de plantio das culturas proporcionaram as maiores ρ_s , na camada de 0,00-0,15 m nos tratamentos, mesmo com teores de COT similares a D e sob rotação de culturas. O revolvimento destrói a estrutura do solo e a pressão das máquinas forçam o arranjo das partículas (Medeiros et al., 2011; Drescher et al., 2016), o que favoreceu o aumento da ρ_s após 21 anos de introdução dos sistemas de preparo.

Os efeitos deletérios do PC à estrutura do solo são frequentemente relatados na literatura, porém o efeito da escarificação ainda é pouco discutido. No experimento, o efeito da escarificação em reduzir a ρ_s do tratamento E não perdurou após três anos da operação, o que também foi verificado por Drescher et al. (2016). Segundo os autores, o efeito da escarificação na ρ_s perdura por até uma safra agrícola (± 5 meses).

Na camada de 0,15-0,30 m, a maior ρ_s foi determinada nos tratamentos C e E, diferindo dos demais (Figura 2B). A compactação da camada subsuperficial ocorreu devido ao revolvimento do solo. A amostragem foi feita no centro da camada 0,15-0,30 m (aproximadamente 0,22 m), e a camada é influenciada pela ação dos implementos agrícolas, grade, arado e escarificador (Mentges et al., 2010; Drescher et al., 2011; 2016). Em sistemas de preparo com escarificadores, a compactação em subsuperfície tem sido observada e constatada como efeito negativo da operação, visto que em vários casos não há muito benefício ao solo (Rosa et al., 2008; Drescher et al. 2011; Calonego & Rosolem, 2011). Entretanto, Mentges et al. (2010) ao avaliarem a ρ_s de um Argissolo Vermelho-Amarelo de textura franco arenosa (188 g kg⁻¹ de argila) sob PD+Escarificação, relataram que a escarificação compactou o solo apenas na profundidade de trabalho da haste. No presente estudo, mesmo após 21 anos, os sistemas C e D apresentaram ρ_s estatisticamente iguais na camada de 0,15-0,30 m, com pequeno incremento para o C.

Os ajustes da curva de resistência do solo à penetração (CRP) e curva de retenção de água no solo (CRAS) estão apresentados na Tabela 3. O ajuste do modelo da CRP foi significativo para todos os tratamentos nas duas camadas pelo teste F ($p \leq 0,0001$), explicando até 83% da variabilidade da RP. A RP aumenta com a ρ_s e reduz com θ , conforme relatado na literatura (Cavaliere et al., 2006; Medeiros et al., 2011; Guimarães et al., 2013).

Na camada 0,00-0,15 m, o tratamento D apresentou maiores valores de RP, seguido de E e C, conforme constatado por Guimarães et al. (2013). O maior valor da RP no tratamento D é atribuído às forças de cimentação e agregação do solo (Medeiros et al., 2011; Moraes et al., 2017). Moraes et al. (2017), ao compararem PD com diferentes anos de implantação (3 anos, 11 anos e 24 anos), observaram RP maior no tratamento com 24 anos nas mesmas condições de ρ_s e θ , comparado ao tratamento com 11 anos de implantação. De acordo com os autores, o PD proporciona estrutura de solo mais resistente com ligações fortes entre as partículas, devido ao não revolvimento e

incremento de COT. Medeiros et al. (2011) observaram maiores valores de RP de Latossolo Vermelho no PD em relação ao PC, nas mesmas condições de ρ_s e θ , atribuído à coesão do solo que o PD proporcionou.

Tabela 3: Equações de ajuste da curva de resistência do solo à penetração radicular (CRP) e da curva de retenção de água no solo (CRAS).

| | | CRP | |
|---|--|--|--|
| | | 0,00-0,15m | 0,15-0,30m |
| C | | RP=0,026 $\rho_s^{6,059} \theta^{-2,319}$ R ² =0,78 F=59,16** | RP=0,062 $\rho_s^{6,14} \theta^{-1,406}$ R ² =0,57 F=21,63** |
| E | | RP=0,035 $\rho_s^{7,180} \theta^{-2,060}$ R ² =0,82 F=78,6** | RP=0,055 $\rho_s^{3,956} \theta^{-2,213}$ R ² =0,83 F=78,6** |
| D | | RP=0,066 $\rho_s^{5,989} \theta^{-1,613}$ R ² =0,82 F=73,6** | RP=0,071 $\rho_s^{2,712} \theta^{-2,253}$ R ² =0,79 F=62,1** |
| | | CRAS | |
| C | | $\theta=0,099 (0,547-0,099)/[(1+ (0,021 \psi)^{1,432}]^{0,301}$ R ² =0,99 F=4212** | $\theta=0,100 (0,529-0,100)/[(1+ (0,047 \psi)^{1,354}]^{0,262}$ R ² =0,99 F=4804** |
| E | | $\theta=0,153 (0,555-0,153)/[(1+ (0,021 \psi)^{1,407}]^{0,289}$ R ² =0,99 F=4629** | $\theta=0,146 (0,506-0,146)/[(1+ (0,039 \psi)^{1,380}]^{0,275}$ R ² =0,99 F=2314** |
| D | | $\theta=0,087 (0,565-0,087)/[(1+ (0,047 \psi)^{1,383}]^{0,277}$ R ² =0,99 F=3204** | $\theta=0,145 (0,550-0,145)/[(1+ (0,035 \psi)^{1,378}]^{0,274}$ R ² =0,99 F=6558** |

θ = umidade volumétrica do solo ($m^3 m^{-3}$); ρ_s = densidade do solo ($g cm^{-3}$); ψ = potencial mátrico da água no solo (hPa). F = significância do modelo. R² = coeficiente de determinação. C = Preparo Convencional; E = Plantio Direto com escarificação (uma escarificação a cada três anos); D = Plantio direto.

Na camada 0,15-0,30 m, houve aumento da influência de θ na RP do tratamento D, evidenciado pelo parâmetro e. No tratamento C a maior influência foi da ρ_s em relação aos demais devido a menor influência da umidade. O tratamento E apresentou maior valor de RP em relação aos demais devido à maior ρ_s determinada na camada. A maior dependência da ρ_s está associada à estrutura dos Latossolos, que aumenta o contato das partículas argila-argila favorecendo a compactação do solo quando intensamente revolvido ou trafegado (Seben Júnior et al., 2014).

O modelo da curva de retenção de água no solo (CRAS) proposto por van Genuchten (1980) explicou praticamente todo o fenômeno de retenção de água do Latossolo Vermelho (R²>0,99) e foi significativo entre os sistemas de preparo (F), assim como os parâmetros n , θ_r e α do modelo, visto que a estimativa do intervalo dos parâmetros não incluía o valor de zero (Glantz e Slinker, 1990). A ρ_s não apresentou efeito na CRAS.

A diferença detectada na ρ_s entre os tratamentos não causou alteração na distribuição de poros do solo, o que não comprometeu a CRAS. Cavalieri et al. (2006) ao avaliarem a influência da ρ_s na retenção de água de um Latossolo Vermelho Distrófico, sob operações de preparo reduzidas, observaram que após dois anos de experimento, o PC e

escarificado a cada ano promoveram os menores valores de ρ_s e disponibilidade de água em relação ao PD. Os autores atribuíram os resultados à alta frequência de poros de maior diâmetro nos tratamentos revolvidos, drenando e reduzindo a disponibilidade de água nos primeiros anos de implantação. No presente estudo, após 21 anos, a rotação de culturas adotada promoveu benefícios à estrutura do solo, superando as operações de preparo. Calonego & Rosolem (2011) relatam que alguns sistemas de PD com rotação de culturas previnem o aumento da ρ_s de forma tão eficiente quanto a escarificação e, por isso, o PD não reduz a qualidade física do solo.

O intervalo hídrico ótimo (IHO) determinado nas camadas 0,00-0,15 e 0,15-0,30 m, nos três sistemas avaliados (Figura 2), teve o limite superior definido pela umidade do solo na capacidade de campo (θ_{CC}), indicando que os sistemas de preparo não comprometeram a porosidade de aeração do solo. Porém, houve estreita amplitude do IHO no tratamento E, na camada de 0,00-0,15 m, em que o limite superior do IHO foi determinado pela umidade para manter 10% de poros com ar (θ_{AR}), o que reflete prejuízos à aeração do solo em E, sob altas densidades. O limite inferior do IHO nas duas camadas, em todos os tratamentos avaliados, foi definido por θ_{RP} , independente da RP limitante adotada (Figura 2). Quando o limite inferior do IHO passa a ser definido por θ_{RP} , significa que a resistência à penetração pode estar limitando o crescimento radicular (Cavaliere et al., 2011; Gonçalves et al., 2014).

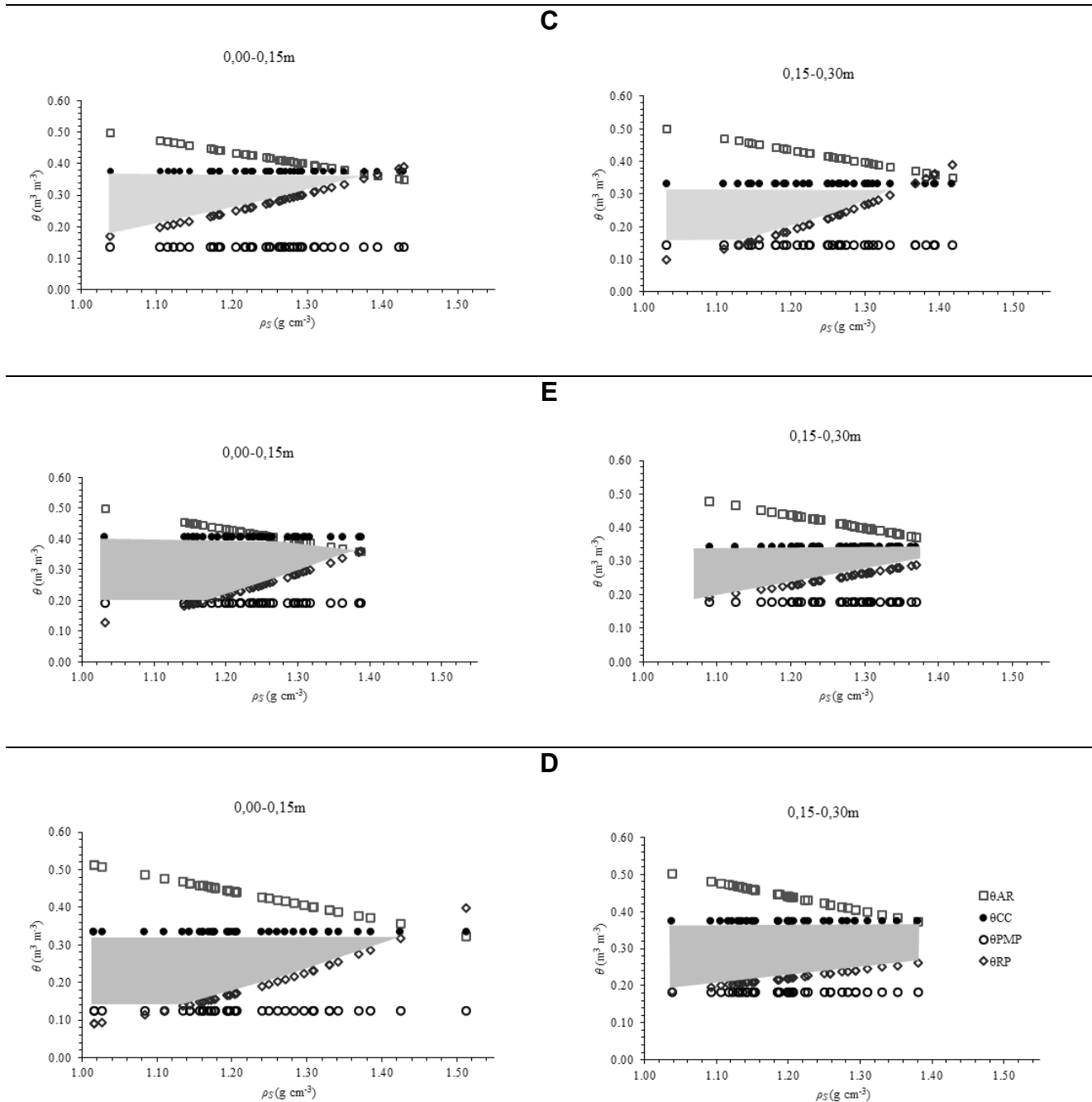


Figura 2: Intervalo Hídrico Ótimo do Latossolo Vermelho nas camadas 0,00-0,15 m e 0,15-0,30 m, nos três sistemas de preparo avaliados. C = Preparo convencional; E = Plantio Direto com escarificação (uma escarificação a cada três anos); D = Plantio direto.

O conteúdo de água do IHO na amplitude de ρ_s estudada foi menor que a água disponível ($\theta_{CC} - \theta_{PMP}$), indicando que os sistemas de preparo causaram impacto negativo na qualidade física do solo. Quando ocorre o estreitamento do IHO a partir de determinada ρ_s , o valor é definido como densidade de alerta (ρ_{sa}). A ρ_{sa} é útil para

monitorar a qualidade do solo e definir se alguma intervenção mecânica deverá ser feita na área (Guimarães et al., 2013). No presente estudo, a ρ_{sa} observada na camada 0,00-0,15 m foi 1,03 g cm⁻³ em C; 1,22 em E e 1,13 g cm⁻³ em D. Na camada de 0,15-0,30 m os valores da ρ_{sa} foram de 1,15 cm⁻³ em C; 1,08 g cm⁻³ em E e 1,11 g cm⁻³ em D. A ρ_{sa} do experimento variou entre 1,03-1,22 g cm⁻³ estando a $\rho_s > \rho_{sa}$, sugerindo monitoramento da ρ_s em cada safra, após a colheita. A obtenção da ρ_s é fácil, rápida, tem baixo custo e permite avaliar as condições de compactação do solo. Assim determinações periódicas seriam de grande valia para monitorar a qualidade física do solo. Neste contexto, se a frequência de ρ_{sa} aumentar de uma safra para a outra, é recomendado o cultivo de nabo-forrageiro (*Raphanus sativus*) combinado com a aveia, frequentemente utilizado na região dos Campos Gerais, para reduzir a compactação do solo. O consórcio reduziria a ρ_s e a RP, potencializando e prolongando a duração da escarificação mecânica (Nicoloso et al., 2008), o manejo teria baixo custo de implantação.

O valor da RP limitante ao crescimento radicular gera discussões na literatura e pode aumentar ou diminuir a faixa do IHO (Klein e Câmara, 2007; Gubiani et al., 2013), sendo primordial conhecer o sistema de manejo e a cultura a ser trabalhada no solo para definir qual seria a RP limitante mais indicada (Leão et al., 2006; Moraes et al., 2014). Utilizar os mesmos valores de RP para solos ou situações de manejo que proporcionem condições distintas, pode gerar interpretações equivocadas sobre a qualidade física do solo, pois a evolução do solo pode variar conforme a condição de manejo a que está submetido. Em solos sob PD, o valor da RP limitante pode ser maior do que 2,0 MPa, conforme sugerem Tormena et al. (1998), devido a rede de bioporos formada pela manutenção do sistema radicular das culturas, favorecendo o fluxo de água e formando canais para o desenvolvimento das raízes, mesmo em condições de alta ρ_s (Cavaliere et al., 2009; Medeiros et al., 2011; Moraes et al., 2014). Moraes et al. (2014) recomendaram o valor 3,5 MPa como limitante ao desenvolvimento de raízes em PD. Para o PC os autores recomendam manter o valor de 2,0 MPa, devido às condições estruturais distintas ao PD, atribuído ao revolvimento, que favorece a drenagem de água e a compactação do solo. Em solos sob PD+Escarificação, Moraes et al. (2014), recomendaram avaliar se o sistema está mais próximo do PD ou PC. Os autores consideram que se a escarificação ocorrer a cada dois ou três anos, o sistema está mais próximo das condições estruturais de PD, assim a RP limitante será 3,0 MPa.

A cultura e o seu sistema radicular também devem ser levados em consideração na determinação da RP crítica. Leão et al. (2006) comentam que o valor da RP limitante das gramíneas pode ser elevado devido ao abundante e agressivo sistema radicular, que se desenvolvem satisfatoriamente em condições de alta RP. Girardello et al. (2014) discorrem que culturas com sistema radicular pivotante, como a soja, o valor crítico de RP deve ser mais baixo do que o adotado para as gramíneas.

O valor da RP crítica adotada para determinação do IHO é variável na literatura. Medeiros et al. (2011) avaliando o IHO de um Latossolo Vermelho de textura muito argilosa, sob PD e PC conduzido à 11 anos com sucessão aveia-preta e milho, consideraram RP limitante de 2,0 MPa. Cavalieri et al. (2006) consideraram RP=2,5 MPa para o desenvolvimento da mandioca (*Manihot esculenta*) e Cavalieri et al. (2011) adotaram 3,0 MPa como RP limitante ao desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*). No presente trabalho a avaliação da qualidade física do solo por meio do IHO se deu utilizando os valores de RP limitante de 2,0 MPa para o C, 3,0 MPa para o E e de 3,5 MPa para o D.

O IHO da camada 0,00-0,15 m atingiu a ρ_{sc} no tratamento C em 8,5% das amostras, o valor foi de 1,39 g cm⁻³. Em E a ρ_{sc} foi observada em 2,7% das amostras e foi igual a 1,38 g cm⁻³. Em D esta condição foi determinada em 2,7% das amostras e o valor foi de 1,51 g cm⁻³. Medeiros et al. (2011) considerando 2,0 MPa como RP limitante, observaram que a ρ_{sc} no PD e no PC em um Latossolo Vermelho foi de 1,1 g cm⁻³ em ambos sistemas, porém os autores relataram que o tratamento em PD proporcionou melhores condições estruturais do que o PC. No presente trabalho os valores de ρ_{sc} em C e E foram próximos, com menor frequência em E. No D a ρ_{sc} foi maior em relação aos demais, indicando comprometimento da qualidade física do solo em condições de altas densidades, o que não ocorreu nas amostras analisadas. A ρ_s média do tratamento D foi menor em relação aos demais, apontando que rotação de culturas não diminui a qualidade física do solo em superfície após 21 anos. O preparo convencional, com uma aração e duas gradagens, e a escarificação a cada três anos, foi prejudicial à qualidade física do solo. Mesmo com a frequência de ρ_{sc} similar ao D, o tratamento E proporcionou prejuízos a qualidade do solo, pois o valor da ρ_{sc} foi similar ao C, que foi o sistema com menos qualidade física do solo.

Para a camada de 0,15-0,30 m, o tratamento C proporcionou ρ_{sc} em 16,6% das amostras, sendo o valor igual a 1,37 g cm⁻³. Os tratamentos E e D não proporcionaram

ρ_{sc} , porém todas as amostras dos tratamentos estão dentro da faixa de ρ_{sa} , indicando que podem ocorrer limitações ao desenvolvimento radicular, principalmente em baixos conteúdos de água no solo, sugerindo o monitoramento da ρ_s , conforme discutido anteriormente. Ao considerar $RP=2,0$ MPa para determinação do IHO em C, verificou-se que este foi o tratamento com menor qualidade física do solo, sendo mais prejudicial em subsuperfície do que em superfície, evidenciado pela alta frequência de valores de ρ_{sc} , mesmo em condições de baixa ρ_s . Mishra et al. (2015), observaram por meio do IHO, menor qualidade física no tratamento sob PC quando comparado ao PD, em um solo argiloso na Índia, sob rotação de culturas arroz-algodão-trigo, mesmo quando as condições de ρ_s foram similares entre os tratamentos. Conforme os autores o revolvimento da camada superficial que favorece a compactação da camada de solo abaixo da profundidade de trabalho dos implementos agrícolas, reduziu a qualidade física em solos sob preparo convencional (Castellini & Ventrella, 2012; Aziz et al., 2013).

Ao analisar o volume de água no IHO dos três sistemas avaliados, baseado nas informações anteriores e adotando o valor RP limitante indicado para cada sistema de manejo, verificou-se que camada 0,00-0,15 m, que os tratamentos E e D proporcionaram maior volume de água no IHO em relação à C. A camada 0,15-0,30 m do tratamento D proporcionou maior volume de água no IHO, sendo C e E similares, na camada. O plantio direto teve as melhores condições para o desenvolvimento do sistema radicular das plantas, após 21 anos sob rotação de culturas.

Os valores médios da produtividade da soja e do milho da safra 2013/14 estão apresentados na Figura 3. A redução nas operações de preparo do solo não proporcionou diferenças significativas na produtividade da soja. Porém, a produtividade no tratamento D foi 381 kg ha^{-1} superior ao tratamento C.

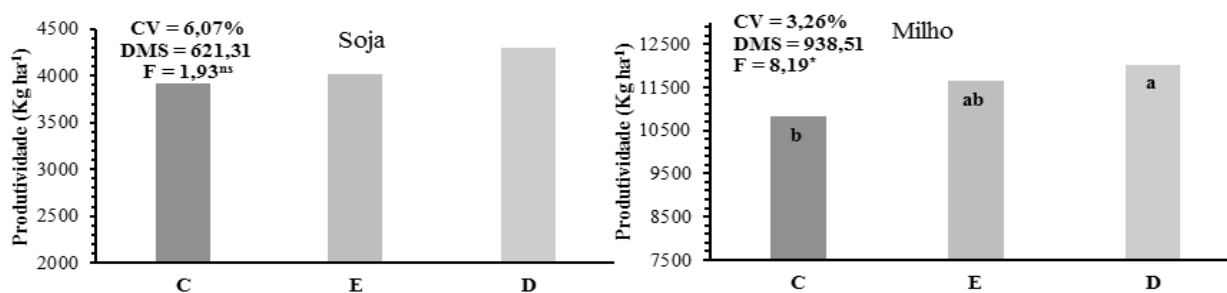


Figura 3: Produtividade média da soja e do milho na safra de 2013/14 no Latossolo Vermelho, com operações de preparo reduzidas. C = Preparo convencional; E = Plantio Direto com escarificação (uma escarificação a cada três anos); D = Plantio direto. CV = coeficiente de variação (%); DMS = Diferença mínima significativa; F = Teste F; ^{ns} = não significativo. Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os resultados estão em acordo com os obtidos por Santos et al. (2015), que sugerem que as características agrônômicas da soja são pouco sensíveis às operações de manejo do solo. Em conformidade com alguns autores, a cultura da soja é mais sensível às mudanças climáticas do que às alterações físicas no solo (Klein e Câmara, 2007; Girardello et al., 2014). Como a precipitação no ano agrícola foi acima do exigido pela soja (450-850 mm ciclo⁻¹), a produtividade não foi afetada pelas condições de solo impeditivas ao crescimento radicular da cultura. A produtividade obtida no experimento ficou acima da que foi observada por Girardello et al. (2014), em solo similar sob sistemas de plantio direto e preparo mínimo do solo. Os tratamentos com redução nas operações de preparo de solo promoveram diferenças significativas na produtividade do milho. Houve diferença entre os tratamentos D (12026 kg ha⁻¹) e C (10814 kg ha⁻¹). O tratamento E teve produtividade estatisticamente similar aos demais (11639 kg ha⁻¹), considerando que a precipitação ocorrida no ano agrícola de 2013/14 supriu a necessidade hídrica (550-800 mm ciclo⁻¹) e a adubação ocorreu conforme o recomendado para a cultura. As diferenças observadas decorrem dos tratamentos adotados na área, pois a cultura do milho é mais sensível às alterações na qualidade física do solo (Girardello et al., 2014). De acordo com Debiasi et al. (2010), a intensificação das operações de preparo de solo pode reduzir a produtividade do milho, visto que a cultura é afetada pelo nitrogênio (Andrioli et al., 2008). Em solos sob PD ocorre preservação física da matéria orgânica do solo, o que proporciona maior teor de N em solos sob PD, devido ao PD reduzir as perdas por volatilização (Loss et al., 2012; Stewart et al., 2017), favorecendo a maior produtividade de milho em D.

Durante todo o período de avaliação, especialmente no compreendido entre 2004-2014, não houve situações de déficit hídrico e a adubação ocorreu conforme o recomendado para as culturas, sugerindo que em condições de boa distribuição de chuvas e nutrição suficiente para o bom desenvolvimento da produção diminuiria a sensibilidade da relação entre o IHO e a produtividade das culturas, indicando que esta relação seria mais sensível em anos de baixa pluviosidade ou em situações de baixa fertilidade do solo. A rotação de culturas, com diversidade de material vegetal, promove maior atividade biológica no solo e conseqüentemente melhora da qualidade física do solo (Loss et al., 2012) o que não compromete o bom desempenho da agricultura na região dos Campos Gerais.

CONCLUSÕES

1. A escarificação a cada três anos não proporcionou melhorias à qualidade física do Latossolo Vermelho após 21 anos sob este sistema de preparo.
2. A rotação de culturas adotada durante 21 anos superou o efeito dos sistemas de preparo do solo em manter a qualidade física do Latossolo Vermelho.
3. O sistema de plantio direto com rotação de culturas proporcionou o maior intervalo hídrico ótimo após 21 anos e maior produtividade de milho na safra de 2013/14.
4. Não houve relação entre o intervalo hídrico ótimo e a produtividade das culturas da soja, milho, trigo e aveia-branca acumulada durante dez anos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRIOLI, I.; BEUTLER, N. A.; CENTURION, J. F.; ANDRIOLI, F. F.; COUTINHO, E. L. M. Produção de milho em plantio direto com adubação nitrogenada e cobertura do solo na pré-safra. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1691-1698. 2008.

AZIZ, I.; MAHMOOD, T.; ISLAM, K. R. Effect of long term no-till and conventional tillage practices on soil quality. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 131, p. 28-35. 2013.

BENJAMIN, J. G.; NIELSON, D. C.; VIGIL, M. F. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. **Geoderma**, Amsterdã, v. 116, p. 137-148. 2003.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. Transcriptions of the Associate Society Agricultural Engineer, Hampton, v. 3, p. 519-524. 1990.

CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Least limiting water range in soil under crop rotations and chiseling. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 759-771. 2011.

CASTELLINI, M.; VENTRELLA, D. Impact of conventional and minimum tillage on soil hydraulic conductivity in typical cropping system in Southern Italy. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 124, p. 47–56. 2012.

CAVALIERI, K. M. V., DA SILVA, A. P., TORMENA, CA, LEÃO TP, DEXTER AR, HÅKANSSON I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 103, p. 158-164. 2009

CAVALIERI, K. M. V., TORMENA, C. A.; FILHO PSV, GONÇALVES ACA, DA COSTA ACS. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 137-147. 2006.

CAVALIERI, K. M. V.; CARVALHO, L. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L.; TORMENA, C. A. Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 35, p. 1541-1549. 2011.

CECAGNO, D.; COSTA, S. E. G. A.; ANGHINONI, I.; KUNRATH, T. R.; MARTINS, A. P.; REICHERT, J. M.; GUBIANI, P. I.; BALERINI F.; FINK, J. R.; CARVALHO, P. C. F. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 156, p. 54-62. 2016.

CHEN, G., WEIL, R. R.; HILL, R. L. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 136, p. 61-69. 2015.

DEBIASI, H.; LEVIEN, R., TREIN, C. R., CONTE, O.; KAMIMURA, K. M. Produtividade de soja e milho após cobertura de inverno e descompactação mecânica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, p. 603-612. 2010.

DRESCHER, M. S.; ELTEZ, F. L. F.; DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A. Persistência do efeito de intervenções mecânicas para a descompactação de solos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1715-1722. 2011.

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**, Brasília, v. 51, p. 159-168. 2016.

FEBRAPDP, Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha. Evolução do Sistema de Plantio Direto no Paraná [internet]. Foz do Iguaçu-PR: Federação Brasileira de Plantio Direto e Irrigação, 2015. Acesso em 1º/junho/2017, disponível em http://febrapdp.org.br/download/EVOLUCAO_DO_SPD_NO_PARANA_2014.pdf

GIRARDELLO, V. C.; AMADO, T. J. C.; SANTI, A. L.; CHERUBIN, M. R.; TEIXEIRA, T. G. Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, v. 1234-1244. 2014.

GLANTZ, S. A.; SLINKER, B. K. **Primer of applied regression and analysis of variance**. New York:McGraw- Hill, 1990. 777p.

GONÇALVES, W. G.; SEVERIANO, E. C.; SILVA, F. G.; COSTA, K. A. P.; GUIMARÃES JUNNYOR, W. S.; MELO, G. B. Least limiting water range in assessing compaction in a

brazilian cerrado Latosol growing sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 432-44. 2014.

Grable AR, Siemer EG. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 32, p. 180-186. 1968.

GROSSMAN, R. B.; REINSCH, T. G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Ed.) **Methods of soil analysis**. Madison:Soil Science Society of America, 2002. v.4. p. 201-28. (Book-Series, 5).

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Método alternativo para determinação da densidade de partículas do solo - exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, p. 664-668. 2006.

GUBIANI, P. I.; GOULART, R. Z.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Crescimento e produção de milho associados com o intervalo hídrico ótimo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 1502-1511. 2013.

GUIMARÃES, R. M. L.; TORMENA, C. A.; BLAINSKI E.; FIDALSKI, J. Intervalo hídrico ótimo para avaliação da degradação física do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. 2013; v. 37, p. 1512-1512. 2013.

KLEIN, V. A.; CÂMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 221-227. 2007.

Klute, A. Methods of soil analysis. Part 1. **Physical and mineralogical properties**. 2nd ed. Madison:ASA; 1986.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical after the

conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 88, p. 279-285. 2006.

LIMA, V. M. P.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; CURI, N.; EVANGELISTA, A. R. Intervalo hídrico ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 71-78. 2012.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A.; COUTINHO, F. S.; dos ANJOS, L. H. C. Particulate organic matter in soil under different management systems in the Brazilian Cerrado. **Soil Research**, Victoria, v. 50, p. 685–693. 2012.

MEDEIROS, J. C.; SILVA, A. P.; CERRI, C. E. P.; GIAROLA, N. F. B.; FIGUEIREDO, G. C.; FRACETTO, F. J. C. Linking physical quality and CO₂ emissions under long-term no-till and conventional-till in a subtropical soil in Brazil. **Plant Soil**, Berlin, v. 338, p. 5-15. 2011.

MENTGES, M. I.; REICHERT, J. M.; ROSA, D. P.; VIEIRA, D. A.; ROSA, V. T.; REINERT, D. J. Propriedades físico-hídricas do solo e demanda energética de haste escarificador em Argissolo compactado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, p. 315-321. 2010.

MISHRA, A. K.; AGGARWAL, P.; BHATTACHARYYA, R.; DAS, T. K.; SHARMA, A. R.; SINGH, R. Least limiting water range for two conservation agriculture cropping systems in India. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 150, p. 43-56. 2015.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R.; LUZ, F. B. Age-hardening phenomena in an oxisol from the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 170, p. 27-30. 2017.

MORAES, M. T., DEBIASI, H. CARLESSO R, FRANCHINI, J. C., SILVA VR. Critical limits of soil penetration resistance in a Rhodic Eutrudox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 288-298. 2014.

MOREIRA, W. H.; PETEAN, L. P.; BETIOLI JÚNIOR, E.; TORMENA, C. A.; FIGUEIREDO, G. C.; SILVA, A. P. Método alternativo para a quantificação do intervalo hídrico ótimo em laboratório. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 158-165. 2014.

NICOLOSO, R. S.; AMADO, T. J. C.; SCHNEIDER, S.; LANZANOVA, M. E.; GIRARDELLO, V. C.; BRAGAGNOLO, J. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1723-1734. 2008.

PIVA, J. T.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MORAES, A.; PAULETTI, V.; TOMAZI, M.; PERGHER, M. No-till reduces global warming potential in a subtropical Ferralsol. **Plant Soil**, Berlin, v. 361, p. 359-373. 2012.

ROSA, D. P.; REICHERT, J. M.; SATTTLER, A.; REINERT, D. J.; MENTGES, M. I.; VIEIRA, D. A. Relação entre solo e haste sulcadora de semeadora em Latossolo escarificado em diferentes épocas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, p. 395-400. 2008.

SANTOS, H. P.; FONTANELLI, R. S.; SILVA, S. R.; SANTI, A.; VERDI, A. C.; VERGAS, A. M. Long-term effects of four tillage systems and weather conditions on soybean yield and agronomic characteristics in Brazil. **Australian Journal of Crop Science**, Brisbane, v. 5, p. 445-452. 2015.

SAS INSTITUTE INCORPORATION. SAS/GRAPH[®] Software: Reference, Version 9. Cary, NC: SAS Institute Inc., 2002. v. 2 1272p.

SEBEN JUNIOR, G. F.; CORÁ, J. E.; LAL, R. Effect of Cropping Systems in No-Till Farming on the Quality of a Brazilian Oxisol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 1268-1280. 2014.

SHAHBAZ, M.; KUZYAKOV, Y.; HEITKAMP, F. Decrease of soil organic matter stabilization with increasing inputs: Mechanisms and controls. **Geoderma**, Amsterdã, v. 304, p. 76-82. 2017.

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

SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; SILVA, E. A.; FERREIRA, M. M.; NORTON, U. D.; CURI, N. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic latosol as affected by soil management. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 154, p. 103-113. 2015.

STEWART, C. E.; HALVORSON, A. D.; DELGADO, J. A. Long-term N fertilization and conservation tillage practices conserve surface but not profile SOC stocks under semi-arid irrigated corn. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 171, p. 9-18. 2017.

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

van GENUCHTEN M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898. 1980.

van LIER, Q. J.; GUBIANI, P. I. Beyond the “Least Limiting Water Range”: rethinking soil physics research in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 925-939. 2015.

CHAPTER II: INFLUENCE OF RYEGRASS MANagements ON PHYSICAL ATTRIBUTES OF A HAPLOHUMOX¹

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the influence of ryegrass managements on physical attributes of a Haplohumox. The experiment was carried out in a randomized block design with three treatments and three replicates, with different ryegrass management as treatment in no-tillage: silage ryegrass, ryegrass left as ground cover and ryegrass grazed, under no-tillage. After 9 years, the soil layers 0.00-0.05, 0.05-0.10, 0.10-0.20 and 0.20-0.30 m were sampled for determination of texture, total organic carbon, bulk density, macroporosity, microporosity, total porosity and resistance to root penetration. From texture and total organic carbon data were estimated the index of structural stability. Maximum bulk density and permanent wilting point were also estimated from pedotransfer function. Maize mass yield and ryegrass dry matter were determined from the harvesting of the plants inside of the plot area. After nine years of ryegrass management, there is an increase in the total organic carbon content in depth. The different ryegrass management do not influence the soil physical attributes and maintains the productivity of corn and ryegrass high, even under long term.

Index terms: *Lolium multiflorum*, no-tillage system, physical soil quality.

¹ Article submitted to “Pesquisa Agropecuária Brasileira” on 07/06/2017 under protocol #26011 and accepted for publication in the journal on 11/17/2017. Authors: Bruno Vizioli; Karina Maria Vieira Cavaleri-Polizeli and Gabriel Barth.

CAPÍTULO II: INFLUÊNCIA DE MANEJOS DO AZEVÉM NOS ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM LATOSSOLO BRUNO²

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de manejo do azevém nos atributos físicos de um Latossolo Bruno. O experimento foi em blocos ao acaso com três tratamentos e três repetições, em que os tratamentos foram os diferentes manejos do azevém em sistema de plantio direto: azevém para silagem, azevém como cobertura e azevém pastejado, em sistema de plantio direto. Após nove anos, foram amostradas as camadas 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, para a determinação da textura, carbono orgânico total, densidade do solo, macroporosidade, microporosidade, porosidade total e resistência à penetração de raízes. Com a textura e carbono orgânico total foi estimado o índice de estabilidade estrutural. A densidade máxima do solo e o ponto de murcha permanente foram também estimados a partir de funções de pedotransferência. A produtividade de massa da matéria seca do milho e do azevém foi determinada a partir da colheita da parcela. Após nove anos de manejo do azevém, há incremento no conteúdo carbono orgânico total em profundidade. Os tratamentos adotados, após nove anos, não influenciam os atributos físicos do solo estudado e mantém a produtividade do milho e do azevém altas.

Termos para indexação: *Lolium multiflorum*, sistema de plantio direto, qualidade física do solo.

² Artigo Submetido à “Pesquisa Agropecuária Brasileira” em 06/07/2017 sob o protocolo #26011 e aceito para a publicação na revista em 17/11/2017. Autores: Bruno Vizioli; Karina Maria Vieira Cavaliere-Polizeli e Gabriel Barth.

INTRODUCTION

The no-tillage system (NT) imposes high traffic load, soil disturbance only in sowing row, and the alternation of two annual crops, summer and winter crops, which may cause soil compaction (Mentges et al., 2016). Compaction is often reported in soils under NT (Moraes et al., 2014, 2016), which can damage the soil physical quality, due to air availability, reduction of water and nutrients available to the plants, reducing the volume of soil explored by the roots, as a consequence of the increase of bulk density and resistance to root penetration (Silva et al., 2014).

However, some authors report that the presence of straw on the surface, characteristic of NT, can attenuate the effect on reducing physical quality of the soil over time (Rosim et al., 2012; Moraes et al., 2016). Rosim et al. (2012) when evaluating resistance to root penetration (RP) of a Red Latosol of clayey texture under different amounts of millet straw (*Pennisetum glaucum*) in NT, concluded that the treatment with greater amount of straw provided less soil RP. According to the authors, the surface straw contributed to dissipate machinery traffic energy, besides that, promoting increase of soil moisture, which favors the reduction of RP.

Although, the benefits of the crop residues presence in the soil in the region of Campos Gerais in Parana state, one of the most important dairy basins in Brazil, cattle farmers remove the plants from the soil in the vegetative phase for the production of silage. In these regions, maize (*Zea mays*) cultivated during the summer is the most used crop for the production of silage (Mendonça et al., 2014). However, in order to keep the soil covered and to obtain extra income during the maize (winter) off season, it is common to sow a forage, being the brachiaria (*Urochloa* spp. – syn. *Brachiaria* spp.) the most used in tropical climates (Mendonça et al., 2014) and the ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) in soils of temperate regions (Petean et al., 2010; Auler et al., 2014). Maize-ryegrass succession is largely used for the production of silage in no-till system in the dairy basin of Castro-PR (Brazil), the most productive in the country (SEAD/DERAL, 2016). Ryegrass has been used by its adaptation to region's climate and, to provide more than one cut per crop, due to tillering and regrowth after the first cut.

Another common practice is to subject the crop to off-season grazing, which allows cattle to gain weight, better use of the soil and crop, avoiding silage production costs

(Petean et al., 2010; Mendonça et al., 2014). However, in both grazing and silage production, the soil is subjected to loads that may compromise its physical quality. Auler et al. (2014) when assessing the physical attributes of a clayey Haplohumox after seven years under NT with grazed ryegrass and silage usage, did not observe a significant difference between treatments in the bulk density and soil moisture, at 0.00-0.10 m layer. The authors attributed this result to the good structural condition that the treatments promoted to the soil during seven years, due to the absence of rotation and the presence of roots in the superficial layer. However, the authors did not assess soil physical attributes that allow the specific evaluation of the soil structure. Detailed soil physics evaluations are necessary in order to evaluate the influence of ryegrass management on the physical quality of the Haplohumox, especially under long term.

The long-term experiments may be the best way to evaluate the different uses and management of the soil in NT in the physical attributes, since the effects on these attributes can take years to be detected (Reichert et al., 2016) or not detected. Soils conducted under stable NT, which there are no significant variations over time in its attributes, bulk density and RP tend to decrease because of the increment of total organic carbon (TOC), mainly in the superficial soil layer, due to the presence of straw and to root system preservation of the plants (Auler et al., 2014).

In order to conclude that management systems can be adopted in a given region, it is recommended to evaluate crop performance, yield for example, to only assert that the management is sustainable. Auler et al. (2014) observed that the uses of ryegrass in cover, silage or grazed in NT promoted reduction of porosity and increase of soil bulk density. The treatments decreased soil physical quality without evaluating crop yield. In this context, evaluations that disregard biotic factors can reach partial conclusions about the real influence of the treatments in the crop yield.

The objective of this work was to evaluate the influence of ryegrass management on physical attributes of a Haplohumox.

MATERIAL AND METHODS

The studied area is located in the municipality of Castro, Campos Gerais, Paraná, Brazil (24°47'53"S; 49°57'42"W, 996 m sea level). The climate of the region, according to

Köppen, is temperate humid (Cfb), with occurrence of frost in winter, maximum average temperature during the years of 25°C and the minimum of 5°C. The accumulated rainfall in the agricultural year 2013/14 is in Figure 1. The relief is smooth wavy and the soil of the experimental area is a Latossolo Bruno distrófico típico, de textura argilosa (typical clayey Dystrophic Haplohumox) in according to brazilian soil classification (EMBRAPA, 2006).

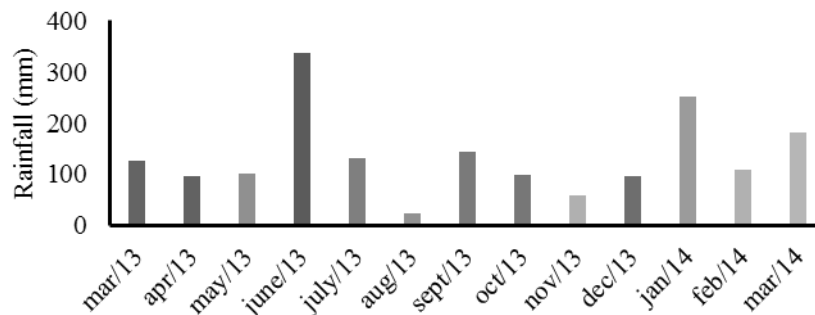


Figure 1. Accumulated rainfall in the evaluation period of the experiment, from March 2013 to March 2014.

The soil texture at the layers was: clay, 442 g kg⁻¹, silt, 128 g kg⁻¹ and sand, 430 g kg⁻¹ (0.00-0.05 m); clay, 478 g kg⁻¹, silt, 117 g kg⁻¹ and sand, 405 g kg⁻¹ (0.05-0.10 m); clay, 497 g kg⁻¹, silt, 104 g kg⁻¹ and sand, 399 g kg⁻¹ (0.10-0.20 m); clay, 528 g kg⁻¹, silt, 99 g kg⁻¹ and sand, 373 g kg⁻¹ (0.20-0.30 m), determined by the densimeter method of Bouyoucos. The chemical attributes determined prior to the installation of the experiment, in March 2004, were: pH (CaCl₂), 4.7, H+Al, 72 mmol_c dm⁻³, Al, 1 mmol_c dm⁻³, Ca, 37 mmol_c dm⁻³, Mg, 10 mmol_c dm⁻³, K, 4.8 mmol_c dm⁻³, CEC, 132.2 mmol_c dm⁻³, P, 85 mg dm⁻³, TOC, 29 g dm⁻³ and V, 42% (0.00-0.10 m); pH (CaCl₂), 4.6, H+Al, 72 mmol_c dm⁻³, Al, 2 mmol_c dm⁻³, Ca, 22 mmol_c dm⁻³, Mg, 8 mmol_c dm⁻³, K, 2.7 mmol_c dm⁻³, CEC, 104.2 mmol_c dm⁻³, P, 44 mg dm⁻³, COT 24 g dm⁻³ and V, 31% (0.10-0.20 m), in according to Auler et al. (2014).

Until the 1960s, the experimental area was under native vegetation, from then it has been used for agriculture, with two crops of wheat (*Triticum aestivum*) per year in the winter and two crop of soybean (*Glycine max*) in the summer. Soil tillage was conventional, with two plow and a gradation, in the layer of 0.00-0.20 m, until the set of the experiment in March of 2005.

The experiment was carried out with different ryegrass management under no-till (NT), in succession of crops (maize-ryegrass) in a randomized block design with three

treatments and three repetitions, with each plot occupying an area of 100 m² (10 × 10 m). The treatments consisted of silage ryegrass, ryegrass left as ground cover and ryegrass grazed. At the beginning of the experiment it was applied 5360 kg ha⁻¹ of limestone, by free sowing, being reapplied 8360 kg ha⁻¹ in March of 2009. In all treatments, sowing of ryegrass and maize were made in the last fortnight of May and the first fortnight of October, respectively. Annually 20 kg ha⁻¹ of maize seed was sowing at seeding depth up to 0.03 m, with spacing of 0.80 m between rows, using a no-till seed-fertilizer.

Nitrogen fertilization in maize culture was made with 165 kg ha⁻¹ in installment. Being the first application with 40 kg ha⁻¹ of 15-30-0 N-P-K, at the time of sowing and with 25-00-25 of N-P-K, at V4 stadium of the culture. Phosphorus and potassium were applied in the planting groove at the amount of 80 kg ha⁻¹ of P₂O₅ and 125 kg ha⁻¹ of K₂O. For the control of weeds was used the post emergent herbicide nicosulfuron (600 g ha⁻¹), at the stadium V3 of the culture.

In February, maize was mechanically harvested for silage when the grains were milky or solid with starch. The soil was kept in fallow until sowing of ryegrass in the first half of May. The sowing of ryegrass occurred annually, using a no-till fertilizer, 60 kg ha⁻¹ of seed in the depth of 0,03 m and row spacing of 0,17 m. For the ryegrass culture were applied, in all the harvests, 200 kg ha⁻¹ of the formulated N-P-K 10-20-20 as basic fertilization and 120 kg ha⁻¹ of N and 36 kg ha⁻¹ of K₂O in the tillering phase of the crop. Treatment silage ryegrass received more 55 kg ha⁻¹ of N after the first cut, in order to provide two cuts per crop. Maize-ryegrass succession occurred annually from May 2005 until May 2014 when the experiment completed nine years.

In treatment silage ryegrass, silage cutting occurred when the ryegrass reached about 0.30 m height, the cut of the plants occurred at 0,10 m above the soil, with a silage machine. In treatment ryegrass left as ground cover, ryegrass was desiccated with Glyphosate (1200 g ha⁻¹), when the plants reached 0.30 m height and, the aerial part together with the root system were kept in the soil until the maize planting. In grazed ryegrass, management livestock was in a rotational grazing system with European dairy cattle (Dutch cattle breed), the animal stocking rate adopted was 3 AU for seven days or until the ryegrass reaches a height lower than 0.10 m, the cattle return to the area was always 21 days after cattle exit. After the last cut at silage ryegrass and the last pasture at

ryegrass grazed the pasture was kept in the soil for 20 days and then desiccated with Glyphosate, as previously described.

After the summer harvest, on March 2014, deformed soil samples were collected at three points in the plot area, in the maize sowing row, in the layers 0.00-0.05; 0.05-0.10; 0.10-0.20 and 0.20-0.30 m. In the same site and layers, undisturbed soil samples were collected in volumetric metal cylinders ($\approx 97 \text{ cm}^3$), totaling 108 deformed and undisturbed samples. The undisturbed samples were packed and sent to the laboratory and then packed in plastic film and kept in cold rooms ($\pm 5^\circ \text{ C}$), about 15 days, in the absence of light, until processing. From the deformed samples, the total organic carbon content (TOC) was determined by chemical attack of sodium dichromate in sulfuric medium.

After the processing of the samples, which had the objective of eliminating the excess of soil from the edges of the cylinder, the undisturbed samples were saturated with water, weighed and submitted to the potential of -100 hPa in a chamber of Richards. After equilibrium, the samples were weighed and subjected to determination of resistance to root penetration (RP), using a penetrometer with 4 mm of cone diameter, angle of 60° and stick height of 50 mm. The cone tip was inserted into the center of the undisturbed sample at a speed of 0.001 m s^{-1} , and the data obtained by an automatic data acquisition system. The procedure used was in according to Tormena et al. (1998); then, the samples were dried in an oven for 24 hours at 105°C . The soil density (ρ_s) was obtained by the ratio of dried soil mass and the cylinder volume. Total porosity (TP) was obtained from the difference of mass of saturated soil by the mass of dried soil, divided by the volume of the cylinder. The microporosity (micro) was determined from the difference in the mass of moist soil after the equilibrium at -100 hPa by the mass of dried soil, divided by cylinder volume and macroporosity (macro) by the difference of TP and micro.

The relative density of the soil (ρ_R) was determined by the ratio of ρ_s and the maximum soil density (ρ_M). For this, ρ_M was estimated by the function: $\rho_M = 2.03133855 - 0.00320878 \cdot \text{OM} - 0.00076508 \cdot \text{Clay}$, proposed by Marcolin & Klein (2011), which estimates ρ_M in function of the clay content and soil TOC, for each sample analyzed. The function has been successful in the ρ_M estimation due to its accuracy and ease of obtaining the estimated data (Drescher et al., 2016).

The volume of water available (WA) was the volume of water in the soil between the field capacity (FC) and the permanent wilting point (PWP). The FC was determined in the

potential of -100 hPa (Haise et al., 1955; Tormena et al., 1998; Petean et al., 2010; Moraes et al., 2016). While PWP was estimated by the function: $PWP = 0.0003 \cdot \text{Clay} + 0.0118$, proposed by Klein et al. (2010), which has been used to estimate the PWP, considering that the determination, when done in the chamber of Richards, can take months in clay soils.

The structural stability of the soil was evaluated by the Structural Index (SI) according to the equation proposed by Reynolds et al. (2009): $SI = [(TOC \cdot 1.724) / (\text{Clay} + \text{Silt})] \cdot 100$. In Which, TOC, (g dm^{-3}), clay and silt contents (g kg^{-1}) and 1.724 is the constant to convert TOC in soil organic matter (OM).

The data were submitted to the normality test of Shapiro-Wilk and analysis of variance. When statistical difference was detected, the comparison between means was performed using the Tukey test ($p < 0.05$).

RESULTS AND DISCUSSION

The total organic carbon (TOC) levels were the same among treatments in the 0.00-0.05 m, indicating that in spite of treatment ryegrass left as ground cover, there was no greater contribution of TOC in this layer, in relation to the treatments silage ryegrass and ryegrass grazed, which removed the straw from the soil, in this layer (Table 1). The absence of difference in TOC between the treatments could be associated with the higher rate of straw decomposition in the first centimeters of the soil, since the maize and ryegrass plants density were similar, providing the same addition of TOC in the 0.00-0.05 m (Piva et al., 2012).

Table 1. Mean values of total organic carbon (TOC); soil density (ρ_S); estimated maximum density (ρ_M); relative soil density (ρ_R); macroporosity (Macro); microporosity (Micro), total porosity (TP); water available (WA) and structural index (SI) of a Haplohumox, submitted to different ryegrass management in a direct seeding system.

| Treatment | TOC g dm ⁻³ | ρ_S kg dm ⁻³ | ρ_M | ρ_R | Macro m ³ m ⁻³ | Micro m ³ m ⁻³ | TP m ³ m ⁻³ | WA m ³ m ⁻³ | SI % |
|----------------------|---------------------------|---------------------------------|--------------------|--------------------|---|---|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------|
| 0.00-0.05 m | | | | | | | | | |
| ryegrass for silage | 43.90 ^{ns} | 1.34 ^{ns} | 1.56ab | 0.86 ^{ns} | 0.09 ^{ns} | 0.43 ^{ns} | 0.52 ^{ns} | 0.29 ^{ns} | 13,16 ^{ns} |
| ryegrass in coverage | 45.83 | 1.28 | 1.59a | 0.81 | 0.11 | 0.42 | 0.53 | 0.29 | 13,63 |
| ryegrass grazed | 43.86 | 1.24 | 1.52b | 0.81 | 0.10 | 0.41 | 0.51 | 0.26 | 13,33 |
| CV (%) | 4.15 | 8.69 | 2.58 | 9.35 | 31.93 | 12.42 | 9.26 | 21.05 | 4,98 |
| MSD | 2.17 | 0.13 | 0.05 | 0.09 | 0.04 | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 2,55 |
| 0.05-0.10 m | | | | | | | | | |
| ryegrass for silage | 33.96a | 1.32 ^{ns} | 1.57 ^{ns} | 0.84 ^{ns} | 0.09 ^{ns} | 0.40 ^{ns} | 0.49 ^{ns} | 0.25 ^{ns} | 10,33 ^{ns} |
| ryegrass in coverage | 34.90a | 1.34 | 1.56 | 0.87 | 0.10 | 0.40 | 0.50 | 0.24 | 9,67 |
| ryegrass grazed | 31.70b | 1.37 | 1.56 | 0.88 | 0.11 | 0.41 | 0.52 | 0.24 | 8,80 |
| CV (%) | 5.22 | 4.50 | 1.57 | 4.42 | 31.39 | 6.82 | 5.54 | 12.30 | 8,99 |
| MSD | 2.06 | 0.07 | 0.03 | 0.05 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.04 | 3,09 |
| 0.10-0.20 m | | | | | | | | | |
| ryegrass for silage | 31.23a | 1.34 ^{ns} | 1.56 ^{ns} | 0.86 ^{ns} | 0.10 ^{ns} | 0.41 ^{ns} | 0.51 ^{ns} | 0.25 ^{ns} | 9,09 ^{ns} |
| ryegrass in coverage | 28.46b | 1.30 | 1.56 | 0.83 | 0.12 | 0.39 | 0.51 | 0.23 | 8,65 |
| ryegrass grazed | 28.70ab | 1.31 | 1.54 | 0.85 | 0.12 | 0.39 | 0.51 | 0.23 | 9,13 |
| CV (%) | 7.73 | 3.43 | 2.47 | 4.86 | 26.47 | 9.03 | 5.53 | 15.40 | 13,77 |
| MSD | 2.68 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.03 | 0.04 | 0.03 | 0.04 | 2,71 |
| 0.20-0.30 m | | | | | | | | | |
| ryegrass for silage | 25.33ab | 1.27 ^{ns} | 1.55 ^{ns} | 0.82 ^{ns} | 0.11 ^{ns} | 0.41 ^{ns} | 0.52 ^{ns} | 0.24 ^{ns} | 6,95 ^{ns} |
| ryegrass in coverage | 22.70b | 1.25 | 1.55 | 0.81 | 0.15 | 0.40 | 0.55 | 0.23 | 6,22 |
| ryegrass grazed | 26.23a | 1.26 | 1.54 | 0.82 | 0.13 | 0.39 | 0.52 | 0.22 | 7,25 |
| CV (%) | 10.20 | 4.40 | 2.19 | 4.16 | 24.70 | 7.93 | 6.25 | 12.75 | 12,41 |
| MSD | 2.97 | 0.06 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.03 | 1,92 |

^{ns} = no significant difference. Means followed by equal letters, do not differ, by Tukey test (p<0.05) probability. MSD = minimum significant difference.

There was effect of the treatments on the TOC levels in the layers: 0.05-0.10; 0.10-0.20 and 0.20-0.30 m. Treatments silage ryegrass and ryegrass left as ground cover provided a higher TOC content in the layer of 0.05-0.10 m in relation to the treatment ryegrass grazed, possibly due to the higher volume of roots that these treatments maintained in this layer (Table 1). The highest volume of roots when ryegrass left as ground cover is due to the presence of straw on the surface, and in silage ryegrass due to the fertilization of the cover in order to produce two cuts. Thus, it is natural that there is a greater mass of roots in this treatment, these being the main sources of TOC in depth (Shahbaz et al., 2017). The ryegrass grazed presented the lowest TOC value in relation to the others, probably due to animal trampling action, which may have impaired growth and root development between 0.05-0.10 m in depth. Generally, this layer suffers most by trampling, what affects the soil structure (Debiasi & Franchini, 2012).

However, grazed systems stimulate root growth in depth (Petean et al., 2010; Oliveira et al., 2016) increasing TOC in deeper layers of soil. This was observed in the 0.10-0.20 and 0.20-0.30 m layers, where treatments silage ryegrass and ryegrass grazed were statistically the same (Table 1). Certainly, these results are due to the higher fertilization of the silage ryegrass treatment and the grazing of the ryegrass grazed treatment, both stimulating the growth and development of roots. Below 0.05 m depth, TOC in treatments silage ryegrass and ryegrass left as ground cover were not significantly different. In this case, the stem of the ryegrass kept on the soil surface in ryegrass left promoted increase of TOC similar to in silage ryegrass in this layer, which had an increase in nutrients availability, due to the greater fertilization. Nevertheless, root growth stimulus due to grazing provided higher TOC increment in the deeper layers, corroborating with the results of Petean et al. (2010). The treatments provided increase of the TOC content in Haplohumox in relation to content determined in 2004, before experiment installation, resulting in 10% of increasing in COT content at the layer of 0.00-0.10 m and about 5% at the layer 0.10-0.20 m. This increase were attributed to maintenance of the root system of ryegrass and corn into the soil over nine years of experiment, and due to the absence of rotation provided by NT.

Mean values of ρ_s were statistically equal among the treatments in all strata evaluated, evidencing that the traffic of machinery and animal trampling in silage ryegrass and ryegrass grazed, respectively, did not compromise ρ_s in relation to C that received

less load. Another factor that must be considered in order to avoid significant differences in ρ_s , is the high TOC value in the superficial layers of the soil (Auler et al., 2014). It is known that TOC reduces ρ_s of soils because it dissipates the energy of machinery traffic and animal trampling (Reichert et al., 2016) and contributes to soil structuring, aggregation of mineral particles and formation of more stable aggregates (Oliveira et al., 2016).

Treatments did not promote significant differences in macro and microporosity and total porosity of the soil in all evaluated layers (Table 1). Values of macro ranged from 0.09 to $0.15\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$ maintaining sufficient porosity for the water drainage and aeration of the root system. By these results, may be inferred that ryegrass management did not affect these attributes, because the root system of the crops was kept in the soil during the whole period. Suggesting that the roots decomposition formed biopores, promoting increase and maintenance of macropores. Contrary to what has been frequently reported in soils under NT, caused by the absence of tilting, combined with the intense traffic of machinery in the soil (Chen and Weil, 2011). However, Silva et al. (2014) when evaluating the physical attributes of a clayey Haplohumox (595 g kg^{-1} of clay) conducted under crop-livestock integration in NT for 21 months concluded that the system did not cause significant changes in attributes after this period.

Auler et al. (2014) when evaluating this same experiment, after seven years of implantation, also did not observe significant differences in the macroporosity, microporosity and TP between treatments. However, it was observed lower values of macroporosity, than those determined, in this study ($0.08\text{-}0.12\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$), evidencing that this attribute had a small increment over time, obtaining average values very close to or above the limit of $0.10\text{ m}^3\text{ m}^{-3}$, which does not compromise the physical quality of the soil, as regards aeration. The rotational grazing system, as it happened in this experiment, has little negative impact on the physical quality of the soil, because it submits the soil to the load for short periods, providing recovery of eventual losses during fallow (Kuntz et al., 2013). These authors concluded that this type of grazing did not compacted a typical clayey Dystrophic Red Latosol (585 g kg^{-1} of clay), conducted for 12 years in NT.

Estimated ρ_M presented significant difference only in the 0.00-0.05 m layer (Table 1). The low amplitude of this variable (0.07 kg dm^{-3}) has been reported and attributed to high TOC levels in soils (Luciano et al., 2012), especially in the case of soils under NT.

The managements did not affect relative density (ρ_R) in soil layers, being the mean values of ρ_R within the range considered ideal for plant development, which is 0.80-0.90 (Marcolin & Klein, 2011; Drescher et al., 2016). Low values of ρ_R , that means very loose soils, can compromise water retention and soil-seed contact, reducing plant growth and consequently productivity (Mentges et al., 2016). Drescher et al. (2016) evaluated ρ_R of a typical clayey Dystrophic Red Latosol, under NT with maize-wheat succession for 27 years, using the same methods adopted in this work. They observed that ρ_R up until 0.89 did not compromise the development of plants, mainly by the wider and aggressive root system of grass when compared to other agricultural crops, such as soy.

The treatments did not promote differences in soil WA, despite treatments ryegrass left and ryegrass grazed that improved TOC content in the 0.20-0.30 m layer, no higher WA volume was observed in any treatment evaluated (Table 1). The observed result can be due to the use of two species of plants (maize and ryegrass) only. According to Bhattacharyya et al. (2006) cultivation systems with higher plant diversity confer greater availability of water to plants. Moraes et al. (2016) did not observe significant differences in the WA of a very clayey Dystroferric Red Latosol (755 g kg^{-1} of clay), on two NT conducted over 24 years (Wheat-Soy and Maize-Oats), attributing the results to the presence of two species, provided by the succession of cultures. The authors discuss that a system of rotation of crops (with great plant diversity) would be more beneficial in increasing soil WA compared to crop succession.

In the present study, WA values is an evidence that the physical quality of the Haplohumox nine years after was not compromised. According to Reynolds et al. (2007, 2009) WA higher than $0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ is indicative of soils with good physical quality and WA above this value did not compromise crop development and indicates that management did not affect the soil structure to the point of compromising the water availability to the plants. The high TOC content in the layer of 0.00-0.05 m may have favored the result observed in the present study, as the TOC favors water retention, either by retaining water molecules on its specific surface or by improving soil structure and aggregation (Saxton & Rawls, 2006). Thus, it can be inferred that soils with high levels of TOC in the upper layers can present WA volume similar to the deeper layers.

The SI did not present statistical difference among the treatments in all the studied layers (Table 1). As SI is an indicator for risk of erosion, the structure of this Haplohumox

is stable. According to Reynolds et al. (2009) SI >7% is indicative of soils with optimal structural stability and "low risk of erosion". Although the SI values of the layers 0.20-0.30 m are <7%, indicating "moderate risk of erosion", these results have little practical effect, since the layer 0.20-0.30 m is little affected by NT soil management operations in relation to erosion risk. In addition, SI values <7% in the 0.20-0.30 m are attributed to the lower amount of TOC in this layer, which influences the SI.

The RP, determined in the field capacity, did not present significant differences between the treatments, in the different layers studied (Figure 2). The values observed in this study are below the critical limit for the development, which is 3.5 MPa. This value has been used as a limiting factor for root growth in soils under NT (Moraes et al., 2014; Silva et al., 2014), due to the presence of biopores that favor growth of roots with low mechanical resistance (Moraes et al., 2017). Moraes et al., (2014) when evaluating the effect of different RP values on a Dystroferic Red Latosol, on crop productivity in two NT (Wheat-Soy and Oat-Maize), concluded that the PR of 3.5 MPa can be adopted as a limiting factor to root growth in soils with humidity conditions are close to field capacity.

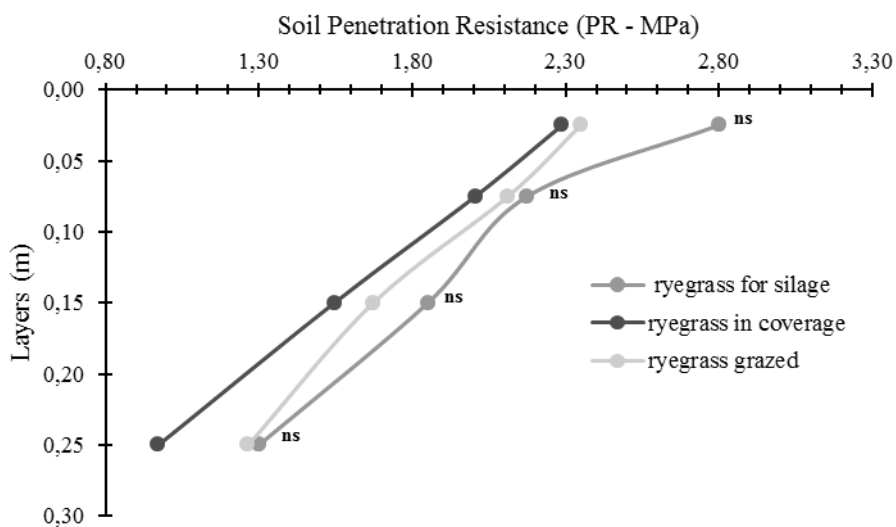


Figure 2. Mean values of soil resistance to penetration (RP) in field capacity, for the Haplohumox, submitted to the different ryegrass management in direct seeding system. ^{ns}, no significant difference, by Tukey test (p<0.05).

Higher RP values in the upper layers, is due to the greater cohesive strength and greater internal resistance of the aggregates, common in NT. Moraes et al. (2017), discussed that over the years, soils under NT there is a harder structure because of the

particles arrangement, absence of rotation and better aggregation because of the contribution of TOC. This can promote high values of RP even under conditions of low ps and high humidity.

The DMS of ryegrass was lower in the ryegrass grazed than in the silage ryegrass and ryegrass left treatments (Table 2). Pasture systems there is lower yields of DMS in relation to silage systems, since selective pasture by the cattle, which maintains the leaf area, reducing the tillering rate of ryegrass and, consequently, the DMS (Barth Neto et al., 2014). The DMS productivity of ryegrass was upper that determined by Barth Neto et al., (2014) in a medium-textured Red Argisol in Rio Grande do Sul (Brazil) under NT. Although ryegrass grazed presented the lowest DMS value of ryegrass, it did not compromise the development of livestock, without causing damages to the productive system.

Table 2. Mean values of dry matter mass yield (DMS) of ryegrass (*Lolium multiflorum*) and maize (*Zea mays*) determined in the crop of 2013/14 in the Haplohumox.

| Treatment | Ryegrass | | Maize |
|----------------------|---------------------|--|---------------------|
| | kg ha ⁻¹ | | |
| ryegrass for silage | 5638a | | 15770 ^{ns} |
| ryegrass in coverage | 5151a | | 15664 |
| ryegrass grazed | 3719b | | 15558 |
| CV (%) | 8.06 | | 14.95 |

Means followed by the equal letter in the column do not differ, by the Tukey test, (p<0.05). ^{ns}, no significant.

The DMS of maize was not significant among the treatments, presenting values within the indicated in the literature that are of 11760-17260 kg ha⁻¹ (Mendonça et al. 2014) due to the fact that sowing season and fertilization occurred according to the crop recommendation during all harvests (Piva et al., 2012; Auler et al., 2014). According to Oliveira et al. (2011), maize for silage productivity has a great influence from the maize cutting height. The authors evaluated the silage yield of several maize hybrids produced in a Red Dystroferric Latosol in Maringá-PR (Brazil) and obtained values ranging from 14560 kg ha⁻¹ when the cut occurred in 15 cm and 13000 kg ha⁻¹ in 0.35 m height.

Some physical factors that directly limit root growth (water availability, resistance to penetration and aeration) did not reach critical values in the present study, which may have favored high crop productivity. Thus, the management of ryegrass either for cover, grazing or silage did not compromise soil physical quality or crop development favoring the increase of TOC and improvement of soil structure.

CONCLUSIONS

1. There is effect of ryegrass management on total organic carbon increment in depth of the Haplohumox

2. The different ryegrass management adopted, after nine years, does not influence the studied soil physical attributes, as well it maintaining the soil physical quality and the high crop yield.

REFERENCES

AULER, A. C.; MIARA, S.; PIRES, L. F.; DA FONSECA, A. F.; BARTH, G. Soil physico-hydrical properties resulting from the management in Integrated Production Systems. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 45, n. 5 (especial), p. 976-989. 2014.

BARTH NETO, A.; SAVIAN, J. S.; SHONS, R. M. T.; BONNET, O. J. F.; CANTO, M. W.; MORAES, A.; LEMAIRE, G.; CARVALHO, P. C. F. Italian ryegrass establishment by self-seeding in integrated crop-systems: Effects of grazing management and crop rotation strategies. **European Journal Agronomy**, Amsterdã, v. 57, p. 77-83. 2014.

BHATTACHARYYA, R.; PRAKASH, V.; KUNDU, S.; GUPTA, H. S. Effect of tillage and crop rotations on pore size distribution and soil hydraulic conductivity in sandy clay loam soil of the Indian Himalayas. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 86, p. 129-140. 2006.

CHEN, G.; WEIL, R. R. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 117, p. 17-27. 2011.

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C. Atributos físicos do solo e produtividade da soja em sistema de integração lavoura-pecuária com braquiária e soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, p. 1180-1186. 2012.

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**, Brasília, v. 51, p. 159-168. 2016.

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

HAISE, H. R.; HAAS, H. J.; JENSEN, L. R. Soil moisture studies of some great plains soils: II. Field capacity as related to 1/3-atmosphere percentage, and 'minimum point' as related to 15-and 26-atmosphere percentages. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 19, p. 20-25. 1955.

KLEIN, V. A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T.; MARCOLIN, C. D. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, p. 1550-1556. 2010.

KUNTZ, M.; GONÇALVES, A. D. M.; REICHERT, J. M.; GUIMARÃES, R. M. L.; REINERT, D. J.; RODRIGUES, M. M. F. Compactação do solo na integração soja-pecuária de leite em Latossolo Argiloso com semeadura direta e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 699-1708. 2013.

LUCIANO, R. V.; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A.; BATISTELLA, B.; WARMLING, M. T. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 1733-1744. 2012.

MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, p. 349-354. 2011.

MENDONÇA, V. Z.; MELLO.; L. M. M.; PEREIRA, F. C. B. L.; SILVA, J. O. R.; YANO, E. H. Corn production for silage intercropped with forage in the farming-cattle breeding integration. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, p. 738-745. 2014.

MENTGES, M. I.; REICHERT, J. M.; RODRIGUES, M. F.; AWE, G. O.; MENTGES, L. R. Capacity and intensity soil aeration properties affected by granulometry moisture, and structure in no-tillage soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 263, p. 47-59. 2016.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R.; LUZ, F. B. Age-hardening phenomena in an oxisol from the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 170, p. 27-37. 2017.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. L.; LUZ, F. B. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 155, p. 351-362. 2016.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. Critical limits of soil penetration resistance in a Rhodic Eutrudox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 288-298. 2014.

OLIVEIRA, F. C. L.; JOBIM, C. C.; SILVA, M. S.; CALIXTO JÚNIOR, M.; BUMBIERIS JÚNIOR, V. H.; ROMAN, J. Produtividade e valor nutricional da silagem de híbridos de milho em diferentes alturas de colheita. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 40, p. 720-727. 2011.

OLIVEIRA, S. P.; CÂNDIDO, M. J. D.; WEBER, O. B.; XAVIER, F. S.; ESCOBAR, M. E. O.; OLIVEIRA, T. S. Conversion of forest in to irrigated pasture II. Changes in the physical properties of the soil. **Catena**, Amsterdã, v. 143, p. 70-77. 2016.

PETEAN, L. P.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J. Intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1515-1526. 2010.

PIVA, J. T.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MORAES, A.; PAULETTI, V.; TOMAZI, M.; PERGHER, M. No-till reduces global warming potential in a subtropical Ferralsol. **Plant Soil**, Berlin, v. 361, p. 359-373. 2012.

REICHERT, J. M.; ROSA, V. T.; VOGELMANN, E. S.; ROSA, D. P.; HORN, R.; REINERT, D. J.; SATTNER, A.; DENARDIN, J. E. Conceptual framework for capacity and intensity physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 158, p. 123-136, 2016.

REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; FOX, C. A.; YANG, X. M. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, Amsterdã, v. 152, p. 252-263. 2009.

REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; YANG, X. M.; FOX, C. A.; TAN, C. S.; ZHANG, T. Q. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 96, p. 316-330. 2007.

ROSIM, D. C.; MARIA, I. C.; SILVA, R. L.; SILVA, A. P. Compactação de um Latossolo Vermelho Distroférico com diferentes quantidades e manejos de palha em superfície. **Bragantia**, Campinas, v. 71, p. 502-508. 2012.

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 70, p. 1569-1578. 2006.

SECRETARIA DO ESTADO DE AGRICULTURA E ABASTECIMENTO/DEPARTAMENTO DE ECONOMIA RURAL. Leite – Análise da Conjuntura Agropecuária: ano 2015/16. Curitiba: Secretaria do Estado de Agricultura e Abastecimento, 2016 15p. Disponível em:

www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/.../bovinocultura_de_leite_2016.pdf. Acesso em: 16 ago 2017.

SHAHBAZ, M.; KUZYAKOV, Y.; HEITKAMP, F. Decrease of soil organic matter stabilization with increasing inputs: Mechanisms and controls. **Geoderma**, Amsterdã, v. 304, p. 76-82. 2017.

SILVA, H. A.; MORAES, A.; CARVALHO, P. C. F.; FONSECA, A. F.; CAIRES, E. F.; DIAS, C. T. S. Chemical and physical soil attributes in integrated crop-livestock system under no-tillage. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 45, p. 946-955. 2014.

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

CAPÍTULO III: RELAÇÕES ENTRE O CARBONO ORGÂNICO E A CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DE UM LATOSSOLO VERMELHO

RESUMO

As frações do carbono orgânico tem relação com os atributos físicos que afetam a retenção de água no solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar a distribuição de poros e a influência do carbono orgânico particulado e do carbono orgânico associado aos minerais, nos parâmetros da curva de retenção de água do solo. O delineamento foi em blocos ao acaso, com três tratamentos e três blocos. Os tratamentos foram os sistemas de preparo do solo: preparo convencional; plantio direto com escarificação a cada três anos e plantio direto. Foram amostradas as camadas de 0,00-0,15 e 0,15-0,30 m de um Latossolo Vermelho distrófico típico. O experimento tem 21 anos de implantação e vem sendo conduzido com rotação de culturas durante esse período. Em maio de 2014 foram coletadas amostras deformadas de solo para o fracionamento físico granulométrico do carbono orgânico, a determinação do conteúdo de carbono orgânico total, carbono orgânico particulado e carbono orgânico associado aos minerais. Amostras indeformadas para a determinação da porosidade total, macro e microporosidade, curva de retenção de água no solo. A curva de retenção de água no solo foi ajustada a partir de fórmulas matemáticas. A partir dos parâmetros de ajuste da curva de retenção de água no solo foi determinada a distribuição de poros entre os tratamentos. A influência do carbono orgânico particulado e do carbono orgânico associado aos minerais nos parâmetros das curvas de retenção de água no solo depende do sistema de preparo adotado na área. Os sistemas de preparo adotados no Latossolo Vermelho promoveram diferenças na distribuição de poros e na resistência à penetração radicular após 21 anos.

Termos de indexação: carbono orgânico particulado; carbono orgânico associado aos minerais; sistemas de preparo; distribuição de poros.

CHAPTER III: RELATIONSHIP BETWEEN THE ORGANIC CARBON AND THE WATER RETENTION CURVE OF A RED LATOSOL (OXISOL)

ABSTRACT

The fractions of organic carbon are relationship to the physical attributes that affect water retention in the soil. The objective of this work was to evaluate the pore size distribution and the influence of the particulate organic carbon and organic carbon associated with the minerals in the parameters of the water retention curve of the soil. The experimental design was in randomized blocks, with three treatments and three blocks. The treatments were soil preparation systems: conventional tillage; chiseling every three years and no-tillage. The layers of 0.00-0.15 and 0.15-0.30 m of a typical dystrophic Red Latosol were sampled. The experiment has been in place for 21 years and has been conducted with crop rotation during this period. In May 2014 deformed soil samples were collected for the granulometric physical fractionation of organic carbon, determination of the total organic carbon content, particulate organic carbon and organic carbon associated with the minerals. Undeformed samples for determination of total porosity, macro and microporosity, soil water retention curve. The water retention curve in the soil was adjusted from mathematical models. From the soil water retention curve adjustment parameters, the pore distribution was determined between the treatments. The influence of particulate organic carbon and organic carbon associated with minerals on soil water retention curve parameters depends on the preparation system adopted in the area. The preparation systems adopted in the Red Latosol promoted differences in pore distribution and resistance to root penetration after 21 years.

Index terms: particulate organic carbon; organic carbon associated with minerals; tillage systems; distribution of pores.

INTRODUÇÃO

A retenção de água pelos solos pode ser descrito pela curva de retenção de água no solo (CRAS), que é uma assíntota entre o conteúdo de água no solo (θ) e o potencial mátrico (ψ), sendo que o primeiro reduz de forma lenta e contínua com a redução do segundo (Han et al., 2010; Mota et al., 2017). A determinação da CRAS é importante para a avaliação da qualidade física do solo (Machado et al., 2008; Han et al., 2010), visto que reflete ações do manejo devido à alteração que ocorre nos atributos do solo.

Para fins científicos é usual fazer o ajuste da CRAS aos pontos amostrais utilizando equações matemáticas que descrevam o fenômeno, sendo o modelo proposto por van Genuchten (1980) o mais utilizado para este fim (Han et al., 2010). O modelo é empírico e tem cinco parâmetros, θ_s ; θ_r , α , n e m , em que cada um tem significado físico que governa a retenção de água no solo. O θ_s corresponde ao conteúdo de água que preenche toda a porosidade do solo ($\psi=0$ hPa) (van Genuchten, 1980; Han et al., 2010; Mota et al., 2017), sendo geralmente de fácil determinação em laboratórios. O θ_r está relacionado ao conteúdo de água retido em um potencial infinitamente negativo, alguns autores propuseram que o valor de θ_r seja o referente ao ponto de murcha permanente para a maioria das culturas ($\psi=-15000$ hPa) (Mota et al., 2017), embora tenham conceitos distintos (van Genuchten, 1980; Han et al., 2010; Mota et al., 2017). O parâmetro α está relacionado com o inverso do potencial mátrico em que há entrada de ar no maior poro do solo (van Genuchten, 1980). O parâmetro n determina a inclinação da CRAS, ou seja, é um índice da distribuição de poros (van Genuchten, 1980), sendo m estimado em função do parâmetro n por meio da restrição de Mualem (1976), ambos os parâmetros tem relação com a porosidade do solo (van Genuchten, 1980; Han et al., 2010).

A porosidade é um dos atributos do solo que mais tem influência na CRAS e pode ser afetada pelo manejo, pois altera a estrutura e o fluxo de ar e água no solo (Machado et al., 2008). Outro atributo pode ser facilmente influenciado pelo manejo e tem relação mais complexa com a CRAS é o conteúdo de carbono orgânico do solo (CO). Diversos autores descrevem a relação positiva entre a retenção de água no solo e o CO (Rawls et al., 2003; Bescansa et al., 2006; Machado et al., 2008; Mujdeci et al., 2017) e alguns fazem uso de correlações para estas avaliações (Rawls et al., 2003; Bescansa et al., 2006; Machado et al., 2008). Rawls et al. (2003) observaram que o aumento do CO

aumentou a retenção de água de um solo arenoso mais próximo do ponto de murcha permanente do que da capacidade de campo, devido à retenção na própria superfície específica do CO. Em um solo argiloso os autores observaram que o aumento foi mais próximo da capacidade de campo, atribuído à melhoria da estrutura do solo. Os autores concluíram que o incremento na retenção de água é mais pronunciado em solos arenosos. Nos solos argilosos o aumento do CO diminuiu a retenção de água em potenciais mais negativos, devido à competição das cargas do CO com as da argila, sendo uma relação que necessita de estudos mais aprofundados (Machado et al., 2008; Minasny & Mcbratney, 2017). Em solos brasileiros, Machado et al. (2008) observaram que há relação entre o conteúdo de CO e os parâmetros da CRAS, porém não determinaram sob qual parâmetro o CO tem influência.

Apesar das contribuições, os trabalhos citados anteriormente fizeram uso somente do conteúdo total de CO (COT), sem considerar os distintos estádios de decomposição que o mesmo se encontra no solo. Neste sentido, o fracionamento do CO é essencial para entender a relação deste atributo químico com a CRAS, podendo o fracionamento ser químico, físico denssimétrico e físico granulométrico. O fracionamento físico granulométrico consiste na separação das frações de CO por meio de peneiras (Cambardella e Elliot, 1992; Bayer et al., 2002; Six e Paustian, 2014), consistindo em uma das formas mais eficientes de avaliar o sistema de manejo do solo (Bayer et al., 2002; Winck et al., 2014; Six e Paustian, 2014; Ontl et al., 2015). Ao realizar o fracionamento físico granulométrico obtêm-se as frações de carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado aos minerais (COM), sendo o COP resultado de partículas maiores de resíduos vegetais, quase sempre observado em abundância nas camadas superficiais do solo e, o COM como sendo o último estágio de decomposição destes resíduos, associado às frações de silte e argila do solo (Cambardella e Elliot, 1992; Reis et al., 2014; Six e Paustian, 2014; Ontl et al., 2015).

Altos teores de COP são comuns na camada superficial do solo, em sistema de plantio direto (PD), devido à preservação física do resíduo vegetal no interior dos macroagregados (Aziz et al., 2013; Winck et al., 2014; Seben Júnior et al., 2016, Mujdeci et al., 2017), sendo a fração mais sensível ao manejo do solo, podendo ser utilizada como indicador de qualidade do solo. O que não está claro nos trabalhos é a relação que esta fração tem na retenção de água no solo, visto que pode haver efeito indireto, por melhoria

de estrutura, ou efeito direto, retendo água em sua superfície específica, sugestivamente em potenciais maiores. O COM, apesar de ser uma fração mais estável do COT, pode influenciar positivamente a retenção de água em potenciais menores, por favorecer a formação de microagregados mais estáveis (Choudhury et al., 2014; Ontl et al., 2015; Seben Junior et al., 2016). Neste sentido, seria interessante estudar a relação que as frações do COT têm nos parâmetros da CRAS, assim como as influências que estas frações têm em atributos físicos que afetam a retenção de água no solo.

Tem-se como objetivo neste trabalho foi avaliar a distribuição de poros e a influência do carbono orgânico particulado e carbono orgânico associado aos minerais, nos parâmetros da curva de retenção de água do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados apresentados no trabalho são de um experimento de longa duração realizado em Ponta Grossa, região dos Campos Gerais, Paraná, Brasil (25° 5' 42" S e 50° 9' 43" O), em um Latossolo Vermelho distrófico típico, textura argilosa (Tabela 1). A classificação climática da região, segundo Koppen, é Cfb (temperado úmido), com ocorrências de geadas no inverno, com temperatura média do mês mais frio é de 18° C e no mês mais quente de 22° C.

A área estava sob mata nativa até o ano de 1967, quando fora convertida em área de lavoura. O solo foi cultivado com a cultura do arroz (*Oryza sativa*) durante as três primeiras safras de inverno, sob preparo convencional (uma aração e duas gradagens, ≈ 0,20 m de profundidade) e mantido em pousio durante as duas safras de verão seguintes. Na terceira safra de verão o solo foi cultivado com soja (*Glycine max*). A sucessão arroz-soja em sistema de preparo convencional ocorreu até 1981, quando se iniciou o cultivo em sistema de plantio direto (SPD) na área, com soja e trigo (*Triticum aestivum*) para grãos, nas safras de verão e inverno, respectivamente.

Em março de 1993 iniciou-se o experimento. Para isso, 4,5 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico e 400 kg ha⁻¹ de fosfato magnesiano foram aplicados e incorporados com arado de aiveca, até a profundidade de 0,20 m. A semeadura da aveia-preta (*Avena strigosa*) ocorreu em maio de 1993, com finalidade de cobertura do solo durante a safra de inverno, a partir do cultivo houve rotação de culturas nas safras com: aveia-preta, aveia-branca (*Avena sativa*) e trigo nas safras de inverno e nas safras de verão, milho

(*Zea mays*), ervilhaca (*Lathyrus sativus*) e soja. As culturas do trigo, milho e soja tiveram a finalidade da produção de grãos. O cultivo da aveia-preta, aveia-branca e ervilhaca tiveram a finalidade de cobertura do solo. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com três tratamentos e três blocos, em que cada parcela ocupa área de 8,33 m de largura × 25,0 m de comprimento, com 1,0 m de bordadura em todos os lados da parcela.

Foram avaliados a redução nas operações de preparo do solo. Assim os tratamentos foram: Preparo Convencional - C; Plantio Direto com Escarificação - E; e Plantio Direto - D. Em C o solo foi revolvido com uma aração e duas gradagens ($\approx 0,20$ m de profundidade) antes do plantio de cada safra. No tratamento E as plantas foram cultivadas em sistema plantio direto, e a cada três anos era realizado uma escarificação mecânica ($\approx 0,30$ m de profundidade) antes do plantio da safra de inverno. Em D, a semeadura foi em sistema de plantio direto, onde o revolvimento do solo se deu somente na linha de plantio provocado pela haste da semeadora.

Em novembro de 2013 foi semeado soja e a colheita se deu em abril de 2014. Após a colheita foi semeado aveia-branca para cobertura do solo. Ao atingir altura de aproximadamente 0,25 m, a aveia-branca foi dessecada com glyphosato (1200 g ha^{-1}). A semeadura do milho ocorreu em setembro de 2014 e a colheita em março de 2015. As colheitas da soja e do milho foram em sistema mecanizado, com colhedoras e plataforma própria de cada cultura. A adubação de base da soja recebeu 300 kg ha^{-1} de 00-20-20 (N-P-K) no momento da semeadura; o milho 300 kg ha^{-1} de 12-32-00 (N-P-K) + 1 kg ha^{-1} de Zn, no momento da semeadura, e 320 kg ha^{-1} de uréia e 150 kg ha^{-1} de KCl em cobertura no início do florescimento da cultura. A caracterização físico-química do solo do experimento é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Caracterização físico-química do Latossolo Vermelho distrófico típico submetido aos preparos convencional (C), escarificado (E) e plantio direto (D).

| | pH | P | K | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | H ⁺ | H+Al | CTC | V | Argila | Silte | Areia Grossa | Areia Fina | ρ_p | ρ_s |
|----------|------|---------------------|------|-----------------------|------------------|----------------|------|-------------|------|--------|--------------------|--------------|------------|--------------------|----------|
| | | mg dm ⁻³ | | molc dm ⁻³ | | | | 0,00-0,15 m | % | | g kg ⁻¹ | | | g cm ⁻³ | |
| C | 4,65 | 4,3 | 0,25 | 2,88 | 1,25 | 6,00 | 6,22 | 10,6 | 42,7 | 519 | 106 | 183 | 192 | 2,59 | 1,27 |
| E | 4,32 | 6,6 | 0,26 | 2,15 | 0,90 | 7,06 | 7,55 | 10,9 | 30,5 | 479 | 131 | 200 | 190 | 2,57 | 1,27 |
| D | 4,80 | 9,8 | 0,26 | 2,62 | 1,32 | 4,93 | 5,43 | 9,6 | 42,5 | 529 | 90 | 196 | 185 | 2,63 | 1,23 |
| | | | | | | | | 0,15-0,30 m | | | | | | | |
| C | 4,93 | 1,62 | 0,32 | 2,55 | 1,20 | 4,82 | 4,88 | 8,9 | 45,5 | 531 | 121 | 167 | 181 | 2,59 | 1,22 |
| E | 4,87 | 0,85 | 0,26 | 2,50 | 0,90 | 4,73 | 4,80 | 8,5 | 43,4 | 523 | 100 | 187 | 190 | 2,59 | 1,29 |
| D | 5,00 | 1,95 | 0,26 | 2,45 | 1,17 | 4,53 | 4,72 | 8,6 | 44,4 | 571 | 79 | 175 | 175 | 2,61 | 1,19 |

pH em CaCl₂; P e K: extrator Mehlich-1; Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺: extrator KCl 1mol L⁻¹; H+Al: extrator de acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ à pH 7,0. CTC: capacidade de troca de cátions à pH 7,0. V: saturação por bases; Argila, Silte, Areia Grossa e Areia Fina: método do densímetro de Bouyoucus; ρ_p : densidade de partículas, método do balão volumétrico; ρ_s : densidade do solo seco, método do anel volumétrico.

Em maio de 2014 ocorreu a amostragem de solo, sendo abertas quatro trincheiras na área útil da parcela: duas na camada de 0,00-0,15; e duas na camada de 0,15-0,30 m. Em cada trincheira foram coletadas uma amostra deformada de solo e seis amostras indeformadas de solo, em cilindros volumétricos de metal (0,035 m de altura × 0,05 m de diâmetro), totalizando 36 amostras deformadas e 216 amostras indeformadas, que foram embaladas em plástico e levadas ao laboratório para serem processadas.

No laboratório, as amostras deformadas de solo foram secas em estufa de circulação de ar forçada à 60 °C, durante 24 horas e passadas em peneira de 2 mm de abertura de malha. Posteriormente, foi realizado o fracionamento físico granulométrico do carbono orgânico total do solo (COT), conforme proposto por Cambardella e Elliot (1992). Para a determinação uma alíquota de 20 g de solo seco foi submetida à agitação horizontal durante 16 horas, junto à 60 mL de uma solução de hexametáfosfato de sódio ($\text{NaPO}_3)_6$, 5 g L⁻¹. Após o período, a suspensão foi passada em peneira de 53 µm de abertura. O material retido na peneira foi considerado o carbono orgânico particulado (COP), associado à fração areia. Em seguida, o material foi seco em estufa de circulação de ar forçada durante 48 horas à 45 °C. Após este período o material foi pesado e triturado em gral de ágata. Para a determinação do COT uma alíquota de 20 g solo seco foi triturada em gral de ágata. A determinação do conteúdo de carbono em COT e COP foi via combustão seca no aparelho VARIO ELL III ELEMENTAR. O material que passou pela peneira de 53 µm, considerado carbono orgânico associado aos minerais (MOM), obtido pela diferença entre COT e COP.

As amostras indeformadas de solo foram preparadas em laboratório e saturadas elevando-se a lâmina d'água em 2/3 da altura do cilindro durante 48 horas. Após a saturação as amostras, as mesmas foram pesadas e submetidas aos potenciais de -20 e -60; -80; -100; -250; -500; -1000; -5000 e -15000 hPa em câmara de Richards com auxílio de placas porosas (Klute, 1986).

Atingido o equilíbrio hidráulico no potencial de -15000 hPa amostras foram secas em estufa à 105 °C durante 36 horas, após este período as amostras foram pesadas para a determinação da massa de solo seco. Posteriormente, foi calculada a densidade do solo seco (ρ_s), como sendo a razão da massa do solo seco na estufa pelo volume de cilindro de metal.

A porosidade total do solo (PT) foi obtida pela diferença da massa de solo saturado pela massa de solo seco, dividido pelo volume do cilindro volumétrico. A microporosidade (MICRO) foi obtida pela diferença da massa de solo úmido, após o equilíbrio hidráulico no potencial de -100 hPa, pela massa de solo seco, dividido pelo volume do cilindro volumétrico. A macroporosidade (MACRO) foi determinada pela diferença da PT pela MICRO.

Com a obtenção dos dados de umidade em cada potencial (θ) foi ajustado a curva de retenção de água no solo (CRAS), conforme a equação proposta por van Genuchten (1980), utilizando a função de restrição proposta por Mualem (1976), ($m=1 - 1/n$), Equação 1:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\{1 + [\alpha \cdot |\psi|]^n\}^m} \quad (1)$$

em que: θ = umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_s = umidade volumétrica do solo na saturação ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); ψ = potencial mátrico da água no solo (hPa), θ_r , α e n são os parâmetros de ajuste da equação.

A distribuição da frequência de poros foi obtida por meio da primeira derivada da equação de van Genuchten (1980), em função do potencial mátrico da água no solo. Equação 2:

$$\left(\frac{\partial\theta}{\partial\psi}\right) = \frac{n m \alpha^n \psi^{n-1} (\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \psi)^n]^{m+1}} \quad (2)$$

em que: θ_s = umidade volumétrica do solo na saturação ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); ψ = potencial mátrico da água no solo (hPa) e θ_r , α e n são os parâmetros de ajuste da equação e m é um parâmetro estimado em função da restrição proposta por Mualem (1976), ($m = 1 - 1/n$).

Foi testada a significância do modelo da CRAS no software SAS (SAS Institute, 2002), utilizando as rotinas PROC GLM e PROC REG. A normalidade dos dados de PT, MACRO, MICRO, COT, COP e COM foi testada pelo teste de Shapiro-Wilk pela rotina PROC NORMAL do *software* SAS (SAS Institute, 2002). As médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). A correlação de Pearson entre os dados de MACRO, θ_{cc} , COT, COP, COM, θ_s , θ_r , α e n foi obtida pelo comando PROC CORREL, do *software* SAS (SAS Institute, 2002).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na camada de 0,00-0,15 m os tratamentos não proporcionaram diferenças significativas na PT, COT e COP, porém houve diferença significativa entre os tratamentos para a COM, MICRO e a MACRO, sendo o menor valor médio de MICRO e o maior de MACRO proporcionado por D (Tabela 2).

Tabela 2: Valores médios de carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (COM), carbono orgânico total (COT), macroporos (MACRO) e microporos (MICRO) e porosidade total (PT) do Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo.

| Tratamentos | g dm ⁻³ | | | m ³ m ⁻³ | | PT |
|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|
| | COP | COM | COT | MACRO | MICRO | |
| 0,00-0,15 m | | | | | | |
| C | 9,60 | 16,92b | 26,53 | 0,09b | 0,46a | 0,55 |
| E | 8,75 | 18,10a | 26,85 | 0,10b | 0,45a | 0,55 |
| D | 9,13 | 16,98ab | 26,11 | 0,14a | 0,42b | 0,56 |
| CV (%) | 18,20 | 11,73 | 5,07 | 42,18 | 10,01 | 7,32 |
| F | 2,37 ^{ns} | 3,85 [*] | 2,71 ^{ns} | 13,21 [*] | 7,56 [*] | 1,71 ^{ns} |
| DMS | 0,93 | 1,14 | 0,75 | 0,03 | 0,02 | 0,02 |
| 0,15-0,30 m | | | | | | |
| C | 5,70a | 15,72b | 21,42a | 0,13 | 0,40 | 0,53ab |
| E | 3,23b | 16,91a | 20,14b | 0,12 | 0,38 | 0,50b |
| D | 4,88a | 16,05b | 20,93ab | 0,12 | 0,43 | 0,55a |
| CV (%) | 36,85 | 9,40 | 8,23 | 43,73 | 19,37 | 9,97 |
| F | 19,90 [*] | 16,23 [*] | 5,02 [*] | 0,09 ^{ns} | 2,72 ^{ns} | 6,66 [*] |
| DMS | 0,95 | 0,85 | 0,97 | 0,03 | 0,04 | 0,03 |

C = Preparo convencional; E = Plantio direto com escarificação (uma escarificação a cada três anos); D = Plantio direto. CV = coeficiente de variação (%); F = Teste F; DMS = Diferença mínima significativa; ^{ns} = não significativo. Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

O maior volume de MACRO é devido à maior massa de raízes que o sistema de plantio direto (PD) proporciona no solo, formando bioporos, que são contabilizados como MACRO (Fernandes et al., 2012). Os bioporos, aliado ao revolvimento mínimo do solo, restrito somente à linha de semeadura, favorece a funcionalidade do sistema agrícola, indicando que a drenagem da água e as trocas gasosas que ocorrem nesta condição não comprometem o desenvolvimento do sistema radicular das culturas (Cavaliere et al., 2009; Dal Ferro et al., 2014). A rotação de culturas adotada durante 21 anos no experimento, colaborou para a manutenção da MACRO nos tratamentos C e E, acima de 0,10 m³ m⁻³, recomendado como limite mínimo necessário para o desenvolvimento do sistema radicular.

Devido às operações de preparo adotadas em C e E era esperado maior volume de MACRO na camada de 0,00-0,15 m, conforme relado por Dal Ferro et al. (2014). Porém como a amostragem ocorreu ao fim do ciclo das culturas, o efeito das operações de preparo em promover aumento de MACRO não perduraram até a próxima safra, sendo o D, o tratamento mais eficiente em aumentar a MACRO do que a aração, gradagem e escarificação, que foram efêmeras nas condições deste experimento. Fernandes et al. (2012), observaram que rotação de culturas com soja/milheto/crotalária/soja em PD promoveu aumento da MACRO de um Latossolo Vermelho eutroférico e Latossolo Vermelho ácido, atribuído à diversidade de sistemas radiculares nos solos, que formam bioporos, favorecendo a manutenção e formação de macroporos. Os autores consideraram que a formação de MACRO também está associada com o tempo de implantação do sistema de rotação de culturas, com o estágio de decomposição, qualidade e diversidade do material vegetal. Assim, sistemas com maior diversidade de plantas e tempo de implantação tendem a apresentarem maior MACRO. Já o menor valor de MICRO em D na camada de 0,00-0,15 m é consequência da maior representatividade de macroporos na PT, correspondendo a 31,3% da PT em D.

Valores similares de COP entre os tratamentos com sistemas de preparo, na camada de 0,00-0,15 m, não são frequentemente observados em trabalhos que compararam PD com PC (Aziz et al., 2013; Blanco-Moure et al., 2013; Reis et al., 2014). O PD cria uma proteção física da fração do COT (Reis et al., 2014), proporcionando maiores teores de COP nos sistemas não revolvidos (Reis et al., 2014; Winck et al., 2014; Ontl et al., 2015). Contudo, a ausência de diferença estatística para o COP, pode ser atribuída a dois fatores. Primeiro, a espessura da camada amostrada (0,15 m), neste caso o efeito da maior adição de material vegetal em aumentar o conteúdo de COP, que é mais restrito aos primeiros centímetros de solo (Reis et al., 2014; Seben Júnior et al., 2016), estaria diluído na amostragem, visto que esta ocorreu sem a estratificação da camada. Para Assmann et al. (2014), quando a avaliação ocorre em camadas mais espessas há diluição do efeito do PD em aumentar o conteúdo de COP no solo. Segundo, é a adição de material vegetal é a mesma em todos os sistemas de preparo avaliados. Assim, após 21 anos de experimento, o efeito da rotação de culturas em aumentar os conteúdos de COP, devido ao aporte da mesma quantidade de resíduos na camada de 0,00-0,15 m em todos os tratamentos, superou o efeito deletério que o revolvimento adotado em C teve

em reduzir os conteúdos de COT, COP e COM (Reis et al., 2014; Seben Júnior et al., 2016). Já a diferença determinada em MOM em E indica que a escarificação adotada na área do experimento durante 21 anos favoreceu o aumento desta fração mais oxidada do COT. Maiores valores de MOM não representam benefícios à estrutura do solo, visto que esta é uma fração mais estável e oxidada do COT (Reis et al., 2014; Seben Junior et al., 2016).

Diversos trabalhos relatam os maiores conteúdos de COT e COP nas camadas mais superficiais dos solos (Rawls et al., 2003; Aziz et al., 2013; Blanco-Moure et al., 2013; Assmann et al., 2014; Reis et al., 2014; Seben Júnior et al., 2016), sendo o incremento de COT atribuído ao aumento de COP (Blanco-Moure et al., 2013; Winck et al., 2014). Winck et al. (2014) observaram maior teor de COP nas camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m em relação à camada de 0,10-0,20 m de um Latossolo Vermelho distrófico, conduzido há 21 anos sob PD com rotação de culturas (trigo/soja/milho/aveia-preta), no município de Ponta Grossa, Brasil. Os autores atribuíram o resultado à maior deposição de material vegetal em superfície, sendo os conteúdos influenciados pela decomposição da palhada e raízes das plantas, em especial as gramíneas. Os dados de COP obtidos estão próximos aos observados por Winck et al. (2014), considerando a camada de 0,00-0,20 m. Contudo, os autores relatam que a camada de 0,05 m tem maior conteúdo de COP, na qual se reduz com o aumento da profundidade. O COM, por ser uma fração mais oxidada e estável, tende a ser similar entre os sistemas de uso e manejo do solo, sendo uma fração pouco influenciada pelas ações de preparo do solo (Aziz et al., 2013; Reis et al., 2014; Seben Júnior et al., 2016).

Na camada de 0,15-0,30 m o tratamento D proporcionou maior volume de PT em relação ao tratamento E, devido ao maior volume de MICRO proporcionado pelo tratamento, correspondendo à 72,4% da PT. O não revolvimento do solo e maior volume de MACRO em superfície deste tratamento, favoreceu o crescimento de raízes em profundidade, afetando positivamente a porosidade em subsuperfície de solos sob PD.

Na camada 0,15-0,30 m, o tratamento E promoveu menor valor médio de MACRO em relação à e D, indicando que o efeito da escarificação em melhorar a qualidade física do solo não perdurou após três anos do manejo, deixando o solo em condição vulnerável à redução da MACRO. De acordo com Lozano et al. (2016), o efeito da escarificação em aumentar a macroporosidade é inferior a uma safra agrícola. Moraes et al. (2014), ao

avaliarem a capacidade de retenção de água, densidade do solo e a resistência à penetração radicular de um Latossolo Vermelho distroférico escarificado a cada ano e a cada três anos, observaram que o efeito da escarificação nos atributos avaliados não perdurou por mais dez meses em ambos tratamentos.

Os resultados do tratamento E apresentou, em algumas situações, a pior qualidade física em relação ao tratamento D, como maior ρ_s (Tabela 1), menor PT, COT e COP em subsuperfície (Tabela 2). A melhor qualidade física em D é atribuída à diversidade de plantas adotada durante 21 anos de experimento e ao revolvimento mínimo do solo proporcionado pelo PD. Calonego & Rosolem (2011), relataram que a rotação de culturas quando adotada de forma eficiente, pode superar o efeito deletério que as operações de preparo na qualidade física do solo. Os autores observaram resultados semelhantes do presente trabalho em Nitossolo Vermelho, com rotação de culturas.

Na camada de 0,15-0,30 m os tratamentos proporcionaram diferenças significativas no conteúdo de COT e COP, sendo os maiores valores proporcionados por C e D em relação ao E, o teor em D ficou intermediário aos demais tratamentos somente ao analisarmos COT. O sistema de preparo convencional (PC), com revolvimento intenso do solo, incorporaram material vegetal em profundidade (Choudhury et al., 2014; Reis et al., 2014), favorecendo o incremento de COP e, conseqüentemente, maior conteúdo de COT na camada 0,15-0,30 m.

Maiores conteúdos de COT e COP em sistemas de PC não são frequentemente reportados, visto que a fração do COT é mais abundante em PD, devido à proteção física e à ausência de revolvimento. Entretanto, como não houve redução do conteúdo de COT e COP na camada superficial, o incremento em profundidade no tratamento C pode favorecer a estrutura do solo, reduzir a ρ_s , aumentar a distribuição de poros e, conseqüentemente, favorecer a retenção de água (Mujdeci et al., 2017).

Quanto à retenção de água, o modelo da CRAS proposto por van Genuchten (1980) explicou praticamente todo o fenômeno da retenção de água do solo (Tabela 3). O modelo foi significativo para os tratamentos adotados, e apresentou significância entre os parâmetros de ajuste (Glantz e Slinker, 1990).

Tabela 3: Parâmetros de ajuste da curva de retenção de água no solo (CRAS), equação pela equação de van Genuchten (1980).

| | θ_s | θ_r | α | n | F | R ² |
|--------------------|------------|------------|----------|-------|-------------------------|----------------|
| 0,00-0,15 m | | | | | | |
| C | 0,547 | 0,099 | 0,021 | 1,432 | 4212,06 ^{****} | 0,994 |
| E | 0,554 | 0,153 | 0,021 | 1,407 | 4629,01 ^{****} | 0,994 |
| D | 0,565 | 0,087 | 0,047 | 1,383 | 3204,11 ^{****} | 0,992 |
| 0,15-0,30 m | | | | | | |
| C | 0,529 | 0,100 | 0,047 | 1,354 | 4804,39 ^{****} | 0,995 |
| E | 0,505 | 0,146 | 0,039 | 1,380 | 2314,12 ^{****} | 0,989 |
| D | 0,550 | 0,145 | 0,035 | 1,378 | 6558,25 ^{****} | 0,996 |

θ_s = volume de água na saturação ($m^3 m^{-3}$); α = parâmetro α de ajuste da CRAS (hPa); θ_r = volume de água residual, parâmetro de ajuste da CRAS ($m^3 m^{-3}$) e n = parâmetro de ajuste da CRAS (adimensional). C = Preparo Convencional; E = Plantio Direto escarificado a cada três anos e D = Plantio Direto.

O fenômeno da retenção de água no solo é um processo complexo e envolve diversos fatores, como a distribuição de poros (Figura 1), que tem maior sensibilidade para avaliar as alterações que o sistema de manejo causa nos solos (Carducci et al., 2013). Os resultados obtidos neste trabalho indicaram que a distribuição do diâmetro de poros foi influenciada pelos parâmetros de ajuste da CRAS e ocorreu de forma distinta entre os sistemas de manejo nas camadas avaliadas.

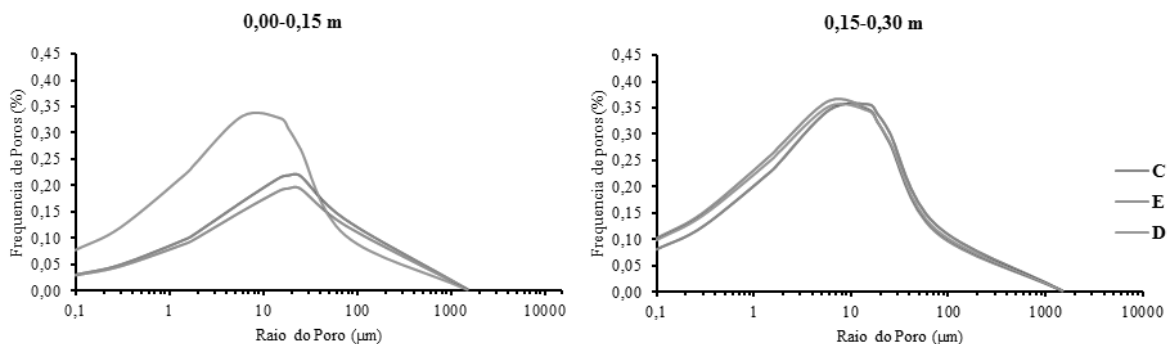


Figura 1: Curvas de distribuição de poros por camada em todos os tratamentos avaliados C = Preparo Convencional; E = Plantio Direto escarificado a cada três anos e D = Plantio Direto.

Na camada de 0,00-0,15 m o tratamento D teve maior frequência de poros de maior diâmetro, considerados poros estruturais (Carducci et al., 2013), proporcionando distribuição mais assimétrica. Por outro lado, os tratamentos C e E apresentaram distribuição da frequência de poros mais simétrica. Na camada 0,15-0,30 m a distribuição da frequência de poros em C apresentou comportamento assimétrico. Os resultados foram influenciados pelo menor valor dos parâmetros n e θ_r e maior valor de α no tratamento D e C, nas respectivas camadas. O maior valor do parâmetro n favorece a

distribuição de poros mais simétrica (van Genuchten e Nielsen, 1985; Machado et al., 2008). Como os tratamentos D e C apresentaram os menores valores deste parâmetro nas camadas avaliadas, a curva de distribuição da frequência de poros teve tendência concentrada nas extremidades. O menor valor de θ_r seria devido ao alto teor COT e aos baixos valores de ρ_s nos tratamentos (van Genuchten e Nielsen 1985; Machado et al., 2008; Han et al., 2010). Ralws et al. (2003) concluíram que altos teores de COT em solos argilosos prejudicam a retenção de água em potenciais mais negativos, por ocorrer a competição das cargas de argila e COT, ocasionando a repulsão da molécula de água. Baixos valores de ρ_s , apesar de visado em manejo do solo, decorre de poros de maior tamanho, com baixa retenção de água, estes também concentram a distribuição da frequência de poros mais à esquerda da curva, fato observado neste estudo.

A distribuição da frequência de poros determinada destoa do que é frequentemente observado em solos sob PD, em que há reduzido volume de poros de maior diâmetro na camada superficial, quando comparado ao PC (Bescansa et al., 2006; Fernandes et al., 2012; Moraes et al., 2016).

Os resultados observados apontam que na camada 0,00-0,15 m o sistema de rotação de culturas adotado durante 21 anos na área, aliado à ausência de revolvimento em D, sobressaiu ao sistema de preparo do solo, que ocorreu em C, destacado pela assimetria da distribuição em D. Moraes et al. (2016) comentaram que nos primeiros anos de implantação solos sob PD tendem a apresentarem volume reduzido de MACRO, devido ao tráfego de maquinários sobre o solo pulverizado, comprimindo as partículas e reduzindo os poros de maior diâmetro. Contudo, os autores, ao avaliarem os atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico, observaram maior macroporosidade nos tratamentos sob PD com maior tempo de implantação, em relação ao tratamento sob PC. Neste sentido, a explicação para os resultados observados é que ao longo de 21 anos o sistema de rotação de culturas em PD adotado no presente trabalho superou o PC em promover aumento de macroporos, devido principalmente à ação dos bioporos.

Os coeficientes de correlação de Pearson entre os atributos avaliados e os parâmetros da CRAS estão apresentados na Tabela 5. Para fins conceituais, o valor de PT foi tratado como o volume de água na saturação, θ_s e o valor de MICRO como o volume de água correspondente a capacidade de campo (θ_{cc}). A correlação foi significativa e negativa entre $\theta_s \times \alpha$ e $\theta_s \times n$ em E e positiva entre $\theta_s \times n$ e $\theta_s \times \theta_r$ em D. No

tratamento C não houve correlação significativa de θ_s com nenhum parâmetro da CRAS. A correlação com o parâmetro n indica alterações na distribuição de poros (Machado et al., 2008; van Genuchten e Nielsen, 1985; Han et al., 2010). Para α a correlação está ligada ao inverso do ψ , (van Genuchten, 1980; van Genuchten e Nielsen, 1985; Han et al., 2010). A correlação negativa com o parâmetro α representa relação positiva de θ_s com o ψ . Observou-se que o aumento de θ_s proporcionou o aumento da retenção de água em potenciais maiores, evidenciado também pelo maior coeficiente de correlação entre $\theta_s \times \theta_{cc}$ em todos os tratamentos (Tabela 5). A correlação positiva entre $\theta_s \times \theta_r$ em D é atribuído a maior distribuição de poros que o sistema proporcionou. O aumento da PT favorece a retenção de água tanto em potenciais mais positivos quando em potenciais muito negativos.

As frações do COT não se relacionaram com os atributos físicos estudados no tratamento C, mas no tratamento E houve correlação significativa do $COP \times \theta_s$ e $COP \times \theta_{cc}$ e COT. Em D as correlações significativas ocorreram entre $COP \times MACRO$ e $COM \times MACRO$ com ambos θ_s e $MACRO$, onde estes se correlacionaram com COT. Garcia et al. (2013) obtiveram boa correlação da PT com o COP, COM e COT de um Latossolo Vermelho de textura argilosa, conduzido há três anos sob PD com rotação de culturas: sorgo-soja-braquiária-feijão-sorgo-soja, não verificaram correlação entre $COP \times PT$ e $COM \times PT$, porém ao verificaram correlação positiva entre o $COT \times PT$, explicando o resultado pela ação conjunta das duas frações em melhorar a porosidade total daquele solo.

Tabela 5: Coeficientes de correlação de Pearson entre os atributos físicos do solo (MACRO, θ_{cc}), com as frações do carbono (COT, COP e COM) e com os parâmetros de ajuste da CRAS (θ_s , θ_{cc} , α , θ_r e n).

| | θ_s | MACRO | θ_{cc} | COT | COP | COM | α | θ_r | n |
|---------------------------------|------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Preparo Convencional – C | | | | | | | | | |
| θ_s | - | 0,091 ^{ns} | 0,667 ^{***} | 0,071 ^{ns} | 0,045 ^{ns} | 0,057 ^{ns} | -0,039 ^{ns} | 0,033 ^{ns} | 0,052 ^{ns} |
| MACRO | - | - | -0,680 ^{***} | -0,142 ^{ns} | - | -0,119 ^{ns} | 0,173 ^{ns} | -0,003 ^{ns} | -0,451 ^{***} |
| θ_{cc} | - | - | - | 0,159 ^{ns} | 0,100 ^{ns} | 0,131 ^{ns} | -0,158 ^{ns} | 0,026 ^{ns} | 0,376 ^{***} |
| COT | - | - | - | - | 0,820 ^{***} | 0,549 ^{***} | -0,505 ^{***} | -0,246 [*] | 0,408 ^{***} |
| COP | - | - | - | - | - | -0,026 ^{ns} | -0,409 ^{***} | -0,196 [*] | 0,435 ^{***} |
| COM | - | - | - | - | - | - | -0,284 ^{**} | -0,143 ^{ns} | 0,077 ^{ns} |
| α | - | - | - | - | - | - | - | 0,512 ^{***} | -0,565 ^{***} |
| θ_r | - | - | - | - | - | - | - | - | -0,175 ^{ns} |
| n | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Escarificado – E | | | | | | | | | |
| θ_s | - | -0,123 ^{ns} | 0,727 ^{***} | 0,371 ^{***} | 0,417 ^{***} | 0,022 ^{ns} | -0,341 ^{***} | -0,056 ^{ns} | -0,574 ^{***} |
| MAC | - | - | -0,770 ^{***} | -0,111 ^{ns} | - | -0,038 ^{ns} | 0,471 ^{***} | 0,231 ^{**} | -0,210 [*] |
| θ_{cc} | - | - | - | 0,315 ^{***} | 0,341 ^{***} | 0,041 ^{ns} | -0,545 ^{***} | -0,529 ^{***} | 0,109 ^{ns} |
| COT | - | - | - | - | 0,849 ^{***} | 0,510 ^{***} | -0,264 ^{**} | -0,433 ^{***} | 0,380 ^{***} |
| COP | - | - | - | - | - | -0,021 ^{ns} | -0,265 ^{**} | -0,402 ^{***} | 0,293 ^{**} |
| COM | - | - | - | - | - | - | -0,068 ^{ns} | -0,164 ^{ns} | 0,241 ^{**} |
| α | - | - | - | - | - | - | - | 0,620 ^{***} | -0,162 ^{ns} |
| θ_r | - | - | - | - | - | - | - | - | -0,049 ^{ns} |
| n | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Plantio Direto – D | | | | | | | | | |
| θ_s | - | 0,505 ^{***} | 0,439 ^{***} | 0,266 [*] | 0,074 ^{ns} | 0,301 ^{***} | 0,002 ^{ns} | 0,211 [*] | 0,274 ^{**} |
| MACRO | - | - | -0,553 ^{***} | 0,348 ^{***} | 0,205 [*] | 0,235 ^{**} | 0,342 ^{***} | 0,393 ^{***} | 0,550 ^{***} |
| θ_{cc} | - | - | - | -0,106 ^{ns} | - | 0,045 ^{ns} | -0,353 ^{***} | -0,205 [*] | -0,307 ^{***} |
| COT | - | - | - | - | 0,781 ^{***} | 0,392 ^{***} | 0,374 ^{***} | 0,046 ^{ns} | 0,373 ^{***} |
| COP | - | - | - | - | - | -0,267 ^{***} | 0,258 ^{**} | -0,073 ^{ns} | 0,203 [*] |
| COM | - | - | - | - | - | - | 0,198 [*] | 0,180 ^{ns} | 0,276 ^{ns} |
| α | - | - | - | - | - | - | - | 0,442 ^{***} | 0,547 ^{***} |
| θ_r | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,769 ^{***} |
| n | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

* = significativo $p < 0.10$; ** = significativo $p < 0.05$; *** = significativo $p < 0.01$; ns = não significativo. PT = porosidade total ($m^3 m^{-3}$); MAC = macroporosidade ($m^3 m^{-3}$); θ_{cc} = volume de água na capacidade de campo -100 hPa ($m^3 m^{-3}$); COT = carbono orgânico total ($g dm^{-3}$); COP = carbono orgânico particulado ($g dm^{-3}$); COM = carbono orgânico associado aos minerais ($g dm^{-3}$), α = parâmetro α de ajuste da CRAS (hPa); θ_r = volume de água residual, parâmetro de ajuste da CRAS ($m^3 m^{-3}$) e n = parâmetro de ajuste da CRAS (adimensional).

Os resultados sugerem que após 21 anos sob rotação de culturas, as frações COP e COM atuam de formas distintas em θ_s e PT, dependendo do sistema de preparo adotado. Como E tem menor volume de PT o aumento do COP aumenta o conteúdo de água na saturação, devido à retenção de água na sua superfície específica do COP (Rawls et al., 2003; Bescansa et al., 2006; Machado et al., 2008) e pela melhoria da estrutura do solo. Machado et al. (2008), relataram que a melhoria da estrutura do solo proporcionada pelo COT é responsável pela retenção de água em potenciais maiores de

solos cultivados. Em D o COM tem mais influência por estar associado à formação de microagregados mais estáveis e coesos (Seben Júnior et al., 2016), favorecendo a retenção de água em poros menores (Carducci et al., 2013), contribuindo para a retenção em potenciais mais negativos, próximos do θ_r .

A correlação entre MACRO e COT, COP e COM não ocorreu nos tratamentos C e E. Em D o aumento das frações do carbono (COT, COP e COM) tem efeito positivo na formação de macroporos em PD. Garcia et al. (2013) ao avaliarem a correlação da MACRO com o COP, COM e COT de um Latossolo Vermelho de textura argilosa, conduzido há três anos sob PD, com rotação de culturas (sorgo-soja-braquiária-feijão-sorgo-soja), verificaram correlação positiva entre o COP e a MACRO confirmando os resultados obtidos em D (Tabela 5). Entretanto, os autores não observaram efeito do COM após três anos de experimento, sobre a MACRO, o que após 21 anos foi verificado no trabalho. A correlação do COM com atributos físicos do solo como θ_s e MACRO, somente ocorreu em D, sugerindo que o longo tempo sob PD, com revolvimento somente na linha de plantio, propicia um efeito do COM na estruturação do solo, porém com o revolvimento, seja anual (C) ou esporádico (E), tal efeito não ocorre, demonstrando a ação deletéria do revolvimento sobre o comportamento do carbono no solo. A melhoria da estruturação dos solos, sob SPD, tem haver com o efeito do COP em melhorar a porosidade do solo (Garcia et al., 2013), mas que sob longo prazo o COM também pode beneficiar a estrutura.

O θ_{cc} teve correlação positiva do COP, e conseqüentemente do COT, somente no tratamento E. Nos tratamentos C e D não houve correlação desta variável com as frações do COT. Garcia et al. (2013) também verificaram relação positiva entre COP e o θ_{cc} (tratado pelos autores como MICRO, referente ao $\psi=-60\text{hPa}$) em PD. Contudo os autores verificaram que a relação positiva com o COP não refletiu em relação com o COT. A relação positiva de θ_{cc} e o COP, pode ser explicada pelas características do próprio sistema escarificado, considerando a camada de 0,00-0,30 m, o tratamento E foi o que apresentou o menor volume de MICRO ($0,418 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) em relação aos demais tratamentos, atribuído à maior ρ_s e ao menor conteúdo de COP ($11,980 \text{ g dm}^{-3}$) após 21 anos. Neste sentido, com o resultado da correlação obtida, pode-se sugerir práticas que aumentem o conteúdo de COP, para aumentar o volume de MICRO e conseqüentemente o θ_{cc} , resultando em maior retenção de água em potenciais mais altos em sistemas

escarificados. Já nos sistemas C e D, o revolvimento e a rede de bioporos, respectivamente, favorecem que a retenção de água em ψ mais altos tenham comportamento independente do COP.

O COT, COP e o COM apresentaram correlação negativa com o parâmetro α no tratamento C, já o COM não teve correlação com o parâmetro α em E, sendo a relação com o COT e o COP negativa neste tratamento. No tratamento D a correlação entre o COT, COP e COM foi positiva com o parâmetro α , logicamente o resultado em COT é decorrente das relações com o COP e o COM. A correlação negativa com o parâmetro α indica correlação positiva com o ψ , visto que α está relacionado com o inverso do ψ em que há entrada de ar no maior poro de solo (van Genuchten, 1980). Assim as correlações negativas em C e E indicam que o aumento de COT, COP e COM refletem menor retenção de água em potenciais mais negativos. Isso ocorre devido ao revolvimento adotado nestes tratamentos causar algum prejuízo à estrutura do solo, favorecendo a drenagem e prejudicando a retenção de água. Já correlação positiva em D reflete que a entrada de ar se dá em potenciais mais positivos, favorecendo a retenção de água em potenciais maiores, na faixa mais disponível às plantas.

O parâmetro θ_r correlacionou bem com a fração COM em nenhum dos tratamentos e em C e E o aumento do COP reduziu o θ_r , no tratamento D não houve correlação significativa deste parâmetro com nenhuma fração do COT. Segundo Machado et al. (2008) tais resultados são devido ao θ_r ser mais dependente da argila do que do COT. Os autores observaram redução do θ_r em um Latossolo Vermelho de textura argilosa com o aumento do COT. A relação antagônica entre o aumento de COT e a retenção de água em potenciais menores (θ_r) em solos argilosos, ocorre devido a competição de cargas de argila e COT que repelem as moléculas de água, não ficando retidas na superfície específica de nenhuma das partículas (Rawls et al., 2003; Minasny e McBratney, 2017). Minasny e McBratney, 2017, ao avaliarem mais de 60 trabalhos sobre a relação do COT com a disponibilidade de água nos solos, ressaltam que o incremento de COT é mais benéfico na retenção de água de solo arenoso devido à redução das cargas minerais. Os autores salientaram que o incremento de 10 g dm^{-3} de COT não apresentou efeito na retenção de água de solos argilosos. Como no solo estudado o conteúdo de argila é de aproximadamente 500 g kg^{-1} , o incremento de COT e COP em C e E pode ter efeito

negativo na retenção de água em potenciais menores, contudo em D a adição de COT, COP e COM não influencia o θ_r .

CONCLUSÕES

1. O carbono orgânico particulado e carbono orgânico associado aos minerais influenciam os parâmetros das curvas de retenção de água no solo.
2. Os sistemas de preparo adotados no Latossolo Vermelho promoveram diferenças na distribuição de poros após 21 anos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSMANN, J. M.; ANGHINONI, I.; MARTINS, A. P.; COSTA, S. E. V. G. A.; CECAGNO D.; CARLOS, F. S.; CARVALHO, P. C. F. Soil carbon and nitrogen stocks and fractions in a long-term integrated crop-livestock system under no-tillage in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdã, v. 190, p. 52-59. 2014.

AZIZ, I.; MAHMOOD, T.; ISLAM, K. R. Effect of long term no-till and conventional tillage practices on soil quality. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 131, p. 28-35. 2013.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L.; ERNANI, P. R. Stocks and humification degree of organic matter fractions as affected by no-tillage on a subtropical soil. **Plant and Soil**, Berlin, v. 238, p. 133-140. 2002.

BESCANSA, P.; IMAZ, M. J.; VIRTO, I.; ENRIQUE, A.; HOOGMOED, W. B. Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 87, p. 19-27. 2006.

BLANCO-MOURE, N.; GARCIA, R.; BIELSA, A. C.; LÓPEZ, M. V. Long-term no-tillage effects on particulate and mineral-associated soil organic matter under rainfed Mediterranean conditions. **Soil Use And Management**, Manchester, v. 29, p. 250-259. 2013.

CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Least limiting water range in soil under crop rotations and chiseling. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 759-771. 2011.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 56, p. 777-783. 1992.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; ZEVIANI, W. M.; LIMA, V. M. P.; SERAFIM, M. E. Bimodal pore distribution on soils under conservation management system for coffee crop. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, p. 291-302. 2013.

CAVALIERI, K. M. V., DA SILVA, A. P., TORMENA, C. A. LEÃO, T. P.; DEXTER, A. R.; HÅKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 103, p. 158-164. 2009.

CHOUDHURY, S. G.; SRIVASTAVA, S.; SINGH, R.; CHAUDHARI, S. K.; SHARMA, D. K.; SINGH, S. K.; SARKAR, D. Tillage and residue management effects on soil aggregation, organic carbon dynamics and yield attribute in rice-wheat cropping system under reclaimed sodic soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 136, p. 76-83. 2014.

dal FERRO, N.; SARTORI, L.; SIMONETTI, G.; BERTI, A.; MORARI, F. Soil macro-and microstructure as affected by different tillage systems and their effects on maize root growth. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã. v. 140, p. 55-65. 2014.

FERNANDES, C.; CORÁ, J. E.; MARCELO, A. V. Soil uses in the sugarcane fallow period to improve chemical and physical properties of two Latosols (Oxisols). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 283-294. 2012.

GARCIA, R. A.; LI, Y.; ROSOLEM, C. A. Soil Organic Matter and Physical Attributes Affected by Crop Rotation Under No-till. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 77, p. 17-24. 2013.

GLANTZ, S. A.; SLINKER, B. K. **Primer of applied regression and analysis of variance**. New York:McGraw- Hill, 1990. 777p.

HAN, X. W.; SHAO, M. A.; HORTON, R. Estimating van Genuchten Model Parameters of Undisturbed Soils Using an Integral Method. **Pedosphere**, Amsterdã, v. 20, p. 55-62. 2010.

KLUTE, A. Methods of soil analysis. Part 1. **Physical and mineralogical properties**. 2nd ed. Madison:ASA; 1986.

LOZANO, Z. A.; SORACCO, C. G.; VILLARREAL, R.; RESSIA, J. M.; SARLI, G. O.; FILGUEIRA, R. R. Soil physical quality and soybean yield as affected by chiseling and subsoiling of a no-till soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 40, p. 1-12. 2016.

MACHADO, J. L.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; SCAPIM, C. A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 495-502. 2008.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Limited effect of organic matter on soil available water capacity. **European Journal of Soil Science**, Manchester, v. 2000, p. 1-9. 2017.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. L.; LUZ, F. B. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 155, p. 351-362. 2016.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R.; LUZ, F. B. Age-hardening phenomena in an oxisol from the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 170, p. 27-30. 2017.

MOTA, J. C. A.; LIBARDI, P. L.; BRITO, A. S.; MORAES, O.; NASCIMENTO, I. V.; ALENCAR, T. L. Variabilidade espacial dos parâmetros da equação de van Genuchten em um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Agro@biente on-line**, Boa Vista, v. 11, p. 92-100. 2017.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, Washington, v. 12, p. 513-522. 1976.

MUJDECI, M.; ISILDAR A. A.; UYGUR, V.; ALABOZ, P.; UNLU, H.; SENOL, H. Cooperative effects of field traffic and organic matter treatments on some compaction-related soil properties. **Solid Earth**, Amsterdã, v. 8, p. 189-198. 2017.

ONTL, T. A.; CAMBARDELLA, C. A.; SCHULTE, L. A.; KOLKA, R. K. Factors influencing soil aggregation and particulate organic matter responses to bioenergy crops across a topographic gradient. **Geoderma**, Amsterdã, v. 255, p. 1-11. 2015.

RAWLS, W. J.; PACHEPSKY, Y. A.; RITCHIE, J. C.; SOBECKI, T. M.; BLOODWORTH, H. Effect of soil organic carbon on soil water retention. **Geoderma**, Amsterdã, v. 116, p. 61-76. 2003.

REIS, C. E. S.; DICK, D. P.; CALDAS, J. S.; BAYER, C. Carbon sequestration in clay and silt fractions of Brazilian soils under conventional and no-tillage systems. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 71, p. 292-301. 2014.

SAS INSTITUTE INCORPORATION. SAS/GRAPH[®] Software: Reference, Version 8. Cary, NC: SAS Institute Inc., 2000. v.2 1272p.

SEBEN JUNIOR, G. F.; CORÁ, J. E.; LAL, R. Physical quality of an Oxisol under no-tillage subjected to different cropping systems. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, p. 1568-1574. 2016.

SIX, J.; PAUSTIAN, K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdã, v. 68, p. A4-A9. 2014.

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

van GENUCHTEN, M. T.; NIELSEN, D. R. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. **Annales Geophysicae**, Monique, v. 3, n. 5, p. 615–628. 1985.

van GENUCHTEN M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898. 1980.

WINCK, B. R.; VEZZANI, F. M.; DIECKOW, J.; FAVARETTO N.; MOLIN, R. Carbono e nitrogênio nas frações granulométricas da matéria orgânica do solo, em sistemas de culturas sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 980-989. 2014.

CONCLUSÕES GERAIS

1. Os sistemas de uso e manejo do solo, conduzidos durante 21 anos, não causaram redução da qualidade física do solo estudado.
2. O sistema de plantio direto conduzido durante 21 anos com rotação de culturas promoveu a melhor condição de qualidade física do solo.
3. O manejo da palhada do azevém, em sistema de plantio direto, não compromete a qualidade física do solo.
4. As frações do carbono orgânico do solo influenciam os parâmetros da curva de retenção de água no solo, devido ser alterados pelo manejo do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS

ANDRIOLI, I.; BEUTLER, N. A.; CENTURION, J. F.; ANDRIOLI, F. F.; COUTINHO, E. L. M. Produção de milho em plantio direto com adubação nitrogenada e cobertura do solo na pré-safra. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1691-1698. 2008.

ASSMANN, J. M.; ANGHINONI, I.; MARTINS, A. P.; COSTA, S. E. V. G. A.; CECAGNO D.; CARLOS, F. S.; CARVALHO, P. C. F. Soil carbon and nitrogen stocks and fractions in a long-term integrated crop-livestock system under no-tillage in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdã, v. 190, p. 52-59. 2014.

AULER, A. C.; MIARA, S.; PIRES, L. F.; DA FONSECA, A. F.; BARTH, G. Soil physico-hydrical properties resulting from the management in Integrated Production Systems. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 45, n. 5 (especial), p. 976-989. 2014.

AZIZ, I.; MAHMOOD, T.; ISLAM, K. R. Effect of long term no-till and conventional tillage practices on soil quality. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 131, p. 28-35. 2013.

BARTH NETO, A.; SAVIAN, J. S.; SHONS, R. M. T.; BONNET, O. J. F.; CANTO, M. W.; MORAES, A.; LEMAIRE, G.; CARVALHO, P. C. F. Italian ryegrass establishment by self-seeding in integrated crop-systems: Effects of grazing management and crop rotation strategies. **European Journal Agronomy**, Amsterdã, v. 57, p. 77-83. 2014.

BAYER C, MARTIN-NETO L, MIELNICZUK J, PILLON CN, SANGOI L. Changes in Soil Organic Matter Fractions under Subtropical No-Till Cropping Systems. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 65, n. 5, p. 1473-1478. 2001.

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

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L.; ERNANI, P. R. Stocks and humification degree of organic matter fractions as affected by no-tillage on a subtropical soil. **Plant and Soil**, Berlin, v. 238, p. 133-140. 2002.

BENJAMIN, J. G.; NIELSON, D. C.; VIGIL, M. F. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. **Geoderma**, Amsterdã, v. 116, p. 137-148. 2003.

BESCANSÀ, P.; IMAZ, M. J.; VIRTO, I.; ENRIQUE, A.; HOOGMOED, W. B. Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 87, p. 19-27. 2006.

BHATTACHARYYA, R.; PRAKASH, V.; KUNDU, S.; GUPTA, H. S. Effect of tillage and crop rotations on pore size distribution and soil hydraulic conductivity in sandy clay loam soil of the Indian Himalayas. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 86, p. 129-140. 2006.

BLANCO-MOURE, N.; GARCIA, R.; BIELSA, A. C.; LÓPEZ, M. V. Long-term no-tillage effects on particulate and mineral-associated soil organic matter under rainfed Mediterranean conditions. **Soil Use And Management**, Manchester, v. 29, p. 250-259. 2013.

BLANCO-MOURE, N.; GRACIA, R.; BIELSA, A.; LÓPEZ, M. V. Long-term effect of no-tillage on soil organic matter fractions in rainfed Aragon (NE Spain). **Spanish Journal of Soil Sciences**, Madrid, v. 1, n. 1, p. 116-121. 2011.

BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. **Transcriptions of the Associate Society Agricultural Engineer**, Hampton, v. 3, p. 519-524. 1990.

CALONEGO, J. C.; RAPHAEL, J. P. A.; RIGON, J. P. G.; OLIVEIRA NETO, L.; ROSOLEM, C. A. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. **European Journal of Agronomy**, Amsterdã, v. 85, p. 31-37. 2017.

CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Least limiting water range in soil under crop rotations and chiseling. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 759-771. 2011.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 56, p. 777-783. 1992.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; ZEVIANI, W. M.; LIMA, V. M. P.; SERAFIM, M. E. Bimodal pore distribution on soils under conservation management system for coffee crop. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 33, p. 291-302. 2013.

CASTELLINI, M.; VENTRELLA, D. Impact of conventional and minimum tillage on soil hydraulic conductivity in typical cropping system in Southern Italy. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 124, p. 47-56. 2012.

CAVALIERI, K. M. V., DA SILVA, A. P., TORMENA, C. A. LEÃO, T. P.; DEXTER, A. R.; HÅKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a

Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 103, p. 158-164. 2009.

CAVALIERI, K. M. V., TORMENA, C. A.; FILHO PSV, GONÇALVES ACA, DA COSTA ACS. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 137-147. 2006.

CAVALIERI, K. M. V.; CARVALHO, L. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L.; TORMENA, C. A. Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1541-1549. 2011.

CAVAZZA, L.; PATRUNO, A.; CIRILLO, E. Effect of yearly oscillating water table on soil moisture retention curves. **Biosystems Engineering**, Amsterdã, v. 98, p. 257-265. 2007

CECAGNO, D.; COSTA, S. E. G. A.; ANGHINONI, I.; KUNRATH, T. R.; MARTINS, A. P.; REICHERT, J. M.; GUBIANI, P. I.; BALERINI F.; FINK, J. R.; CARVALHO, P. C. F. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 156, p. 54-62. 2016.

CHEN, G., WEIL, R. R.; HILL, R. L. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 136, p. 61-69. 2015.

CHEN, G.; WEIL, R. R. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 117, p. 17-27. 2011.

CHOUDHURY, S. G.; SRIVASTAVA, S.; SINGH, R.; CHAUDHARI, S. K.; SHARMA, D. K.; SINGH, S. K.; SARKAR, D. Tillage and residue management effects on soil aggregation, organic carbon dynamics and yield attribute in rice-wheat cropping system under reclaimed sodic soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 136, p. 76-83. 2014.

CHUNG, H.; GROVE, J. H.; SIX, J. Indications for soil C saturation in a temperate agroecosystem. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, p. 1132-1139. 2008.

COSTA, A.; ALBUQUERQUE, J. A.; MAFRA, A. L.; SILVA, F. R. Propriedades físicas do solo em um sistema de manejo na integração agricultura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 235-244. 2009.

dal FERRO, N.; SARTORI, L.; SIMONETTI, G.; BERTI, A.; MORARI, F. Soil macro-and microstructure as affected by different tillage systems and their effects on maize root growth. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 140, p. 55-65. 2014.

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C. Atributos físicos do solo e produtividade da soja em sistema de integração lavoura-pecuária com braquiária e soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, p. 1180-1186. 2012.

DEBIASI, H.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R.; CONTE, O.; KAMIMURA, K. M. Produtividade de soja e milho após cobertura de inverno e descompactação mecânica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, p. 603-612. 2010.

DORAN, J. W.; Parkin, T. B. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: DORAN, J. W.; Jones, A. J (Ed.). **Methods for Assessing Soil Quality**. Madison, SSSA, 1996, p. 25-37.

DRESCHER, M. S.; ELTEZ, F. L. F.; DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A. Persistência do efeito de intervenções mecânicas para a descompactação de solos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1715-1722. 2011.

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**, Brasília, v. 51, n. 2, p. 159-168. 2016.

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

FEBRAPDP, Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha. Evolução do Sistema de Plantio Direto no Paraná [internet]. Foz do Iguaçu-PR: Federação Brasileira de Plantio Direto e Irrigação, 2015. Acesso em 1º/junho/2017, disponível em http://febrapdp.org.br/download/EVOLUCAO_DO_SPD_NO_PARANA_2014.pdf

FERNANDES, C.; CORÁ, J. E.; MARCELO, A. V. Soil uses in the sugarcane fallow period to improve chemical and physical properties of two Latosols (Oxisols). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 283-294. 2012.

GARCIA, R. A.; LI, Y.; ROSOLEM, C. A. Soil Organic Matter and Physical Attributes Affected by Crop Rotation Under No-till. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 77, p. 17-24. 2013.

GIRARDELLO, V. C.; AMADO, T. J. C.; SANTI, A. L.; CHERUBIN, M. R.; TEIXEIRA, T. G. Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 1234-1244. 2014.

GLANTZ, S. A.; SLINKER, B. K. **Primer of applied regression and analysis of variance**. New York:McGraw- Hill, 1990. 777p.

GONÇALVES, W. G.; SEVERIANO, E. C.; SILVA, F. G.; COSTA, K. A. P.; GUIMARÃES JUNNYOR, W. S.; MELO, G. B. Least limiting water range in assessing compaction in a brazilian cerrado Latosol growing sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 432-44. 2014.

GRABLE A. R.; SIEMER, E. G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 32, p. 180-186. 1968.

GROSSMAN, R. B.; REINSCH, T. G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Ed.) **Methods of soil analysis**. Madison:Soil Science Society of America, 2002. v.4. p. 201-28. (Book-Series, 5).

GUBIANI, P. I.; GOULART, R. Z.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Crescimento e produção de milho associados com o intervalo hídrico ótimo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 1502-1511. 2013.

GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Método alternativo para determinação da densidade de partículas do solo - exatidão, precisão e tempo de processamento. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, p. 664-668. 2006.

GUIMARÃES, R. M. L.; TORMENA, C. A.; BLAINSKI E.; FIDALSKI, J. Intervalo hídrico ótimo para avaliação da degradação física do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. 2013; v. 37, p. 1512-1512. 2013.

HAISE, H. R.; HAAS, H. J.; JENSEN, L. R. Soil moisture studies of some great plains soils: II. Field capacity as related to 1/3-atmosphere percentage, and 'minimum point' as related to 15-and 26-atmosphere percentages. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 19, p. 20-25. 1955.

HAN, X. W.; SHAO, M. A.; HORTON, R. Estimating van Genuchten Model Parameters of Undisturbed Soils Using an Integral Method. **Pedosphere**, Amsterdã, v. 20, p. 55-62. 2010.

HARTEMINK, A. E. Soil chemical and physical properties as indicators of sustainable land management under sugar cane in Papua New Guinea. **Geoderma**, Amsterdã, v. 85, n. 4, p. 283-306. 1998.

KLEIN, V. A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T. Indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico típico sob plantio direto escarificado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 9, p. 2475-2481. 2009.

KLEIN, V. A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T.; MARCOLIN, C. D. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, p. 1550-1556. 2010.

KLEIN, V. A.; CÂMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 221-227. 2007.

KLUTE, A. Methods of soil analysis. Part 1. **Physical and mineralogical properties**. 2nd ed. Madison:ASA; 1986.

KUNTZ, M.; GONÇALVES, A. D. M.; REICHERT, J. M.; GUIMARÃES, R. M. L.; REINERT, D. J.; RODRIGUES, M. M. F. Compactação do solo na integração soja-pecuária de leite em Latossolo Argiloso com semeadura direta e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 699-1708. 2013.

LAL, R. Physical management of the soils of the tropics: priorities for the 21st century. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 165, p. 191-207. 2000.

LAL, R. Soil quality and sustainability. In: LAL, R.; BLUM, W. H.; VALENTIN, C.; STEWART, B. A. Ž (Ed.). **Methods for Assessment of Soil Degradation.**, Boca Raton CRC Press, 1997, pp. 17-30.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 88, p. 279-285. 2006.

LETEY, J. Relationship between Soil Physical Properties and Crop Production. In: STEWART, B. A. (Ed) **Advances in Soil Science**. New York, NY:Springer, 1985. v. 1, p. 277-294.

LIMA, V. M. P.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; CURI, N.; EVANGELISTA, A. R. Intervalo hídrico ótimo como indicador de melhoria da qualidade estrutural de Latossolo degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 71-78. 2012.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A.; COUTINHO, F. S.; dos ANJOS, L. H. C. Particulate organic matter in soil under different management systems in the Brazilian Cerrado. **Soil Research**, Victoria, v. 50, p. 685–693. 2012.

LOZANO, Z. A.; SORACCO, C. G.; VILLARREAL, R.; RESSIA, J. M.; SARLI, G. O.; FILGUEIRA, R. R. Soil physical quality and soybean yield as affected by chiseling and subsoiling of a no-till soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 40, p. 1-12. 2016.

LUCIANO, R. V.; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A.; BATISTELLA, B.; WARMLING, M. T. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 1733-1744. 2012.

MACHADO, J. L.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; SCAPIM, C. A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 495-502. 2008.

MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, p. 349-354. 2011.

MEDEIROS, J. C.; SILVA, A. P.; CERRI, C. E. P.; GIAROLA, N. F. B.; FIGUEIREDO, G. C.; FRACETTO, F. J. C. Linking physical quality and CO₂ emissions under long-term no-till and conventional-till in a subtropical soil in Brazil. **Plant Soil**, Berlin, v. 338, p. 5-15. 2011.

MENDONÇA, V. Z.; MELLO, L. M. M.; PEREIRA, F. C. B. L.; SILVA, J. O. R.; YANO, E. H. Corn production for silage intercropped with forage in the farming-cattle breeding integration. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, p. 738-745. 2014.

MENTGES, M. I.; REICHERT, J. M.; RODRIGUES, M. F.; AWE, G. O.; MENTGES, L. R. Capacity and intensity soil aeration properties affected by granulometry moisture, and structure in no-tillage soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 263, p. 47-59. 2016.

MENTGES, M. I.; REICHERT, J. M.; ROSA, D. P.; VIEIRA, D. A.; ROSA, V. T.; REINERT, D. J. Propriedades físico-hídricas do solo e demanda energética de haste escarificador em Argissolo compactado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, p. 315-321. 2010.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Limited effect of organic matter on soil available water capacity. **European Journal of Soil Science**, Manchester, v. 2000, p. 1-9. 2017.

MISHRA, A. K.; AGGARWAL, P.; BHATTACHARYYA, R.; DAS, T. K.; SHARMA, A. R.; SINGH, R. Least limiting water range for two conservation agriculture cropping systems in India. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 150, p. 43-56. 2015.

MORAES, M. T., DEBIASI, H. CARLESSO R, FRANCHINI, J. C., SILVA VR. Critical limits of soil penetration resistance in a Rhodic Eutrudox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 288-298. 2014.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R.; LUZ, F. B. Age-hardening phenomena in an oxisol from the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 170, p. 27-37. 2017.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. L.; LUZ, F. B. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 155, p. 351-362. 2016.

MOREIRA, W. H.; PETEAN, L. P.; BETIOLI JÚNIOR, E.; TORMENA, C. A.; FIGUEIREDO, G. C.; SILVA, A. P. Método alternativo para a quantificação do intervalo hídrico ótimo em laboratório. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 158-165. 2014.

MOTA, J. C. A.; LIBARDI, P. L.; BRITO, A. S.; MORAES, O.; NASCIMENTO, I. V.; ALENCAR, T. L. Variabilidade espacial dos parâmetros da equação de van Genuchten em um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Agro@biente on-line**, Boa Vista, v. 11, p. 92-100. 2017.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, Washington, v. 12, p. 513-522. 1976.

MUJDECI, M.; ISILDAR A. A.; UYGUR, V.; ALABOZ, P.; UNLU, H.; SENOL, H. Cooperative effects of field traffic and organic matter treatments on some compaction-related soil properties. **Solid Earth**, Amsterdã, v. 8, p. 189-198. 2017.

NICOLOSO, R. S.; AMADO, T. J. C.; SCHNEIDER, S.; LANZANOVA, M. E.; GIRARDELLO, V. C.; BRAGAGNOLO, J. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um Latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1723-1734. 2008.

NUNES, M. R.; DENARDIN, J. E.; PAULETTO, E. A.; FAGANELLO, A.; PINTO, L. F. S. Effect of soil chiseling on soil structure and root growth for a clayey soil under no-tillage. **Geoderma**, Amsterdã, v. 259, p. 149-155. 2015.

OLIVEIRA, F. C. L.; JOBIM, C. C.; SILVA, M. S.; CALIXTO JÚNIOR, M.; BUMBIERIS JÚNIOR, V. H.; ROMAN, J. Produtividade e valor nutricional da silagem de híbridos de milho em diferentes alturas de colheita. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 40, p. 720-727. 2011.

OLIVEIRA, S. P.; CÂNDIDO, M. J. D.; WEBER, O. B.; XAVIER, F. S.; ESCOBAR, M. E. O.; OLIVEIRA, T. S. Conversion of forest in to irrigated pasture II. Changes in the physical properties of the soil. **Catena**, Amsterdã, v. 143, p. 70-77. 2016.

ONTL, T. A.; CAMBARDELLA, C. A.; SCHULTE, L. A.; KOLKA, R. K. Factors influencing soil aggregation and particulate organic matter responses to bioenergy crops across a topographic gradient. **Geoderma**, Amsterdã, v. 255, p. 1-11. 2015.

OTSUBO, A. A.; BRITO, O. R.; PASSOS, D. P.; DE ARAÚJO, H. S.; MERCANTE, F. M.; OTSUBO, V. H. N. Formas de preparo de solo e controle de plantas daninhas nos fatores agronômicos e de produção da mandioca. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, p. 2241-2246. 2012.

PETEAN, L. P.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J. Intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférrico sob plantio direto em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 1515-1526. 2010.

PIVA, J. T.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MORAES, A.; PAULETTI, V.; TOMAZI, M.; PERGHER, M. No-till reduces global warming potential in a subtropical Ferralsol. **Plant Soil**, Berlin, v. 361, p. 359-373. 2012.

RAWLS, W. J.; PACHEPSKY, Y. A.; RITCHIE, J. C.; SOBECKI, T. M.; BLOODWORTH, H. Effect of soil organic carbon on soil water retention. **Geoderma**, Amsterdã, v. 116, p. 61-76. 2003.

REICHERT, J. M.; ROSA, V. T.; VOGELMANN, E. S.; ROSA, D. P.; HORN, R.; REINERT, D. J.; SATTTLER, A.; DENARDIN, J. E. Conceptual framework for capacity and intensity

physical soil properties affected by short and long-term (14 years) continuous no-tillage and controlled traffic. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 158, p. 123-136, 2016.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 102, p. 242-254, 2009.

REIS, C. E. S.; DICK, D. P.; CALDAS, J. S.; BAYER, C. Carbon sequestration in clay and silt fractions of Brazilian soils under conventional and no-tillage systems. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 71, p. 292-301. 2014.

REYNOLDS WD, BOWMAN BT, DRURY CF, TAN CS, LU X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, Amsterdã, v. 110, p. 131-146, 2002.

REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; FOX, C. A.; YANG, X. M. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, Amsterdã, v. 152, p. 252-263. 2009.

REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; YANG, X. M.; FOX, C. A.; TAN, C. S.; ZHANG, T. Q. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 96, p. 316-330. 2007.

ROSA, D. P.; REICHERT, J. M.; SATTTLER, A.; REINERT, D. J.; MENTGES, M. I.; VIEIRA, D. A. Relação entre solo e haste sulcadora de semeadora em Latossolo escarificado em diferentes épocas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, p. 395-400. 2008.

ROSIM, D. C.; MARIA, I. C.; SILVA, R. L.; SILVA, A. P. Compactação de um Latossolo Vermelho Distroférrico com diferentes quantidades e manejos de palha em superfície. **Bragantia**, Campinas, v. 71, p. 502-508. 2012.

SANTOS, H. P.; FONTANELLI, R. S.; SILVA, S. R.; SANTI, A.; VERDI, A. C.; VERGAS, A. M. Long-term effects of four tillage systems and weather conditions on soybean yield and agronomic characteristics in Brazil. **Australian Journal of Crop Science**, Brisbane, v. 5, p. 445-452. 2015.

SAS INSTITUTE INCORPORATION. SAS/GRAPH[®] Software: Reference, Version 9. Cary, NC: SAS Institute Inc., 2002. v. 2 1272p.

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 70, p. 1569-1578. 2006.

SEBEN JUNIOR, G. F.; CORÁ, J. E.; LAL, R. Effect of Cropping Systems in No-Till Farming on the Quality of a Brazilian Oxisol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 1268-1280. 2014.

SEBEN JUNIOR, G. F.; CORÁ, J. E.; LAL, R. Physical quality of an Oxisol under no-tillage subjected to different cropping systems. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, p. 1568-1574. 2016.

SECRETARIA DO ESTADO DE AGRICULTURA E ABASTECIMENTO/DEPARTAMENTO DE ECONOMIA RURAL. Leite – Análise da Conjuntura Agropecuária: ano 2015/16. Curitiba: Secretaria do Estado de Agricultura e Abastecimento, 2016 15p. Disponível em: www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/.../bovinocultura_de_leite_2016.pdf. Acesso em: 16 ago 2017.

SHAHBAZ, M.; KUZYAKOV, Y.; HEITKAMP, F. Decrease of soil organic matter stabilization with increasing inputs: Mechanisms and controls. **Geoderma**, Amsterdã, v. 304, p. 76-82. 2017.

SILVA JÚNIOR, M. L.; DESJARDINS, T.; SARRAZIN, M.; MELO, V. S.; MARTINS, P. F. S.; SANTOS, E. R.; CARVALHO, C. J. R. Carbon content in Amazonian Oxisols after

forest conversion to pasture. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 603-1611. 2009.

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

SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; SILVA, E. A.; FERREIRA, M. M.; NORTON, L. D.; CURI N. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic latosol as affected by soil management. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 154, p. 103-113. 2015.

SILVA, H. A.; MORAES, A.; CARVALHO, P. C. F.; FONSECA, A. F.; CAIRES, E. F.; DIAS, C. T. S. Chemical and physical soil attributes in integrated crop-livestock system under no-tillage. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 45, p. 946-955. 2014.

SINGH A, PHOGAT VK, DAHIYA R, BATRA SD. Impact of long-term zero till wheat on soil physical properties and wheat productivity under rice-wheat cropping system. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 140, p. 98-105. 2014;

SIX, J.; CONANT, R. T.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. **Plant Soil**, Berlin, v. 241, p.155-176. 2002.

SIX, J.; PAUSTIAN, K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdã, v. 68, p. A4-A9. 2014.

STEWART, C. E.; HALVORSON, A. D.; DELGADO, J. A. Long-term N fertilization and conservation tillage practices conserve surface but not profile SOC stocks under semi-arid irrigated corn. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã. 2017; 171:9-18.

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

van GENUCHTEN M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898. 1980.

van GENUCHTEN, M. T.; NIELSEN, D. R. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. **Annales Geophysicae**, Monique, v. 3, n. 5, p. 615–628. 1985.

van LIER, Q. J.; GUBIANI, P. I. Beyond the “Least Limiting Water Range”: rethinking soil physics research in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 925-939. 2015.

WILSON, M. G.; SASAL, M. C.; CAVIGLIA, O. P. Critical bulk density for a Mollisol and a Vertisol using least limiting water range: Effect on early wheat growth. **Geoderma**, Amsterdã. v. 192, p. 354-361. 2013.

WINCK, B. R.; VEZZANI, F. M.; DIECKOW, J.; FAVARETTO N.; MOLIN, R. Carbono e nitrogênio nas frações granulométricas da matéria orgânica do solo, em sistemas de culturas sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 980-989. 2014.