



Universidade Federal
de São João del-Rei

PAULA KAREN MOTA

**INDICADORES DA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM SISTEMAS
INTENSIFICADOS DE PRODUÇÃO DE GRÃOS NO
CERRADO MINEIRO**

SETE LAGOAS

2018

PAULA KAREN MOTA

**INDICADORES DA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM SISTEMAS
INTENSIFICADOS DE PRODUÇÃO DE GRÃOS NO
CERRADO MINEIRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós -
Graduação em Ciências Agrárias (PPGCA), da
Universidade Federal de São João del Rei, Campus
Sete Lagoas - MG, como parte das exigências para a
obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias
na área de concentração em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Montoani Silva

Coorientador 1: Dr. Émerson Borghi

Coorientador 2: Dr João Herbert Moreira Viana

SETE LAGOAS

2018

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB)
e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M687i Mota, Paula Karen.
Indicadores da qualidade física do solo em sistemas intensificados de produção de grãos no cerrado mineiro / Paula Karen Mota ; orientador Bruno Montoani Silva; coorientador Êmerson Borghi João Herbert Moreira Viana. -- Sete Lagoas, 2018.
48 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias) -- Universidade Federal de São João del-Rei, 2018.

1. física do solo. 2. manejo do solo. 3. água disponível para as plantas. I. Silva, Bruno Montoani, orient. II. João Herbert Moreira Viana, Êmerson Borghi, co-orient. III. Título.

PAULA KAREN MOTA

**INDICADORES DA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM SISTEMAS
INTENSIFICADOS DE PRODUÇÃO DE GRÃOS NO
CERRADO MINEIRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós -
Graduação em Ciências Agrárias (PPGCA), da
Universidade Federal de São João del Rei, Campus
Sete Lagoas - MG, como parte das exigências para
a obtenção do título de Mestre em Ciências
Agrárias na área de concentração em Produção
Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Montoani Silva
Coorientador 1: Dr. Émerson Borghi
Coorientador 2: Dr João Herbert Moreira Viana

Sete Lagoas, 16 de julho de 2018

Banca examinadora:

Prof. Dr. Junior Cesar Avanzi - UFLA
Prof. Dr. Diego Antônio França de Freitas - UFV

Prof. Dr. Bruno Montoani Silva - UFLA
Orientador

Dedico,
ao meu avô Petronilo Martins, pelos exemplos de vida e por sempre ter motivado
e orientado toda a nossa família sobre a importância dos estudos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, e por tudo, agradeço à Deus!

Ao meu noivo Israel, por ter sido tão essencial e cuidadoso em cada etapa deste mestrado. Obrigada pela paciência, pelo carinho, pela força e por acreditar tanto em mim, mesmo quando eu admitia o contrário! Você vivenciou todos os momentos e ter você ao meu lado, dividindo cada aflição e principalmente cada alegria, tornou o caminho muito mais brando e trouxe mais sentido para cada passo dado.

À toda minha família. Especialmente ao meu irmão que contribuiu de forma ímpar nessa minha jornada. Ao meu pai, Paulo, em memória. A minha mãe pelo suporte, grande exemplo, amor e por sempre me desafiar e estimular a lutar. Ao Eti, por todas alegrias, carinho e apoio. A minha cunhada, Malba, por quem carrego uma enorme admiração e gratidão, por ter trago mais amor à nossa família e nos presenteado com o Paulo e a Clara, nosso maior tesouro! A minha grande amiga, que também carrega o título de sogra, Nora, obrigada por todas as orações, todas palavras de conforto e incentivo, por todo carinho, paciência e atenção. A Thayná, pelo amparo, admiração e confiança que me dão uma força na qual ela mesma não imagina. A minha madrinha Lílian, pelas preces e tantos desejos de sucesso. Ao meu sogro Eber, por se tornar cada dia mais especial. A Jaqueline, por toda torcida e amor, e também por ter me dado o melhor presente que já ganhei. Ao Zeca e ao Júnior, pela companhia e alegria diária.

Às melhores amigas que a vida me deu: Pauline, Maíse, Camila e Jéslia, a importância que vocês representam para mim é sem medida! Obrigada por tamanha doação, vocês são essenciais e meus principais pontos de equilíbrio. Amo vocês profundamente!

Aos grandes profissionais que conheci na EPAMIG, em especial a Karina, que hoje é uma amiga tão presente, amorosa e cuidadosa. Vocês são muito especiais!

À minha professora da graduação, Gisela de Avellar, pela confiança e por ter despertado em mim a vontade de iniciar uma trajetória diferente da que vinha sendo construída.

A equipe do laboratório de física do solo por tornarem o trabalho mais alegre e por dividirem comigo tanto conhecimento, em especial a Maíse, a Gabriela, a Marina e o Eduardo. Maíse e Gabi, eu me perco ao buscar palavras para agradecê-las, vocês foram as melhores companheiras que eu poderia ter nesta etapa. Obrigada por terem me ensinado tanto!

À UFSJ, pela concessão da bolsa de estudos e pela grande oportunidade de crescimento.

Aos professores do PPGCA por toda dedicação com o ensino e pelo conhecimento doado, em especial a Ana Paula Madeira, Anderson Latini e João Carlos Borges, vocês foram divisores de água na minha formação e grandes exemplos da profissional que almejo ser.

Ao meu orientador, Bruno Montoani, por toda paciência nos meus momentos de dificuldade e por ter persistido confiante ao meu lado durante esses dois anos.

Ao meu Coorientador João Herbert que não apenas contribuiu com a condução intelectual do trabalho, como também compartilhou muito conhecimento e me orientou na minha primeira experiência como professora universitária.

Ao meu Coorientador Émerson Borghi por todas contribuições e melhorias propostas para o enriquecimento do meu trabalho.

A banca examinadora, pelo pronto atendimento e sugestões construtivas.

Aos professores Cláudio Manoel, Édio Costa, Samuel Petraccone, Eric Victor e Ana Paula Madeira pelo suporte oferecido no decorrer do semestre em que lecionei a disciplina de Gênese e formação do solo, vocês foram muito especiais e essa foi a experiência mais incrível que tive no período do mestrado. Com vocês, aprendi que ser professor é muito mais que exercer uma profissão, muito obrigada por toda troca de conhecimento e doação!

Aos técnicos de laboratório Édipo, Hosana e Edmilson por tanto empenho em nos atender e ajudar com as análises.

Aos professores Samuel Petraccone, pelo suporte no laboratório de solos e em campo; Washington Silva, por possibilitar o uso do penetrômetro de bancada e José Carlos Rufini por viabilizar as análises de Carbono Orgânico.

A secretária do PPGCA, Carla Patrícia Melo, que nunca mediu esforços em nos ajudar e que foi um grande anjo nesse período.

Aos colegas, em especial Mariela, Joelma, Dalila, Gisele, Mayara, Jéssica e Marcus, pelo companheirismo e por tornarem os estudos mais alegres.

E a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito Obrigada!

*“O caminho da vida pode ser o da liberdade e da beleza, porém nos extraviamos...
Nossos conhecimentos nos fizeram céticos, nossa inteligência, empedernidos e cruéis.
Pensamos em demasia e sentimos bem pouco.
Mais do que de máquinas, precisamos de humanidade.
Mais do que inteligência, precisamos de afeição e doçura.
Sem essas virtudes, a vida será de violência e tudo será perdido. ”*

Charles Chaplin

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	I
GENERAL ABSTRACT	II
INTRODUÇÃO GERAL	1
REFERÊNCIAS	4
ARTIGO	9
Resumo	9
Abstract	9
1. Introdução	10
2. Material e Métodos	11
2.1. Localização, caracterização e implantação da área experimental	11
2.2. Sistemas de manejo avaliados	12
2.3. Amostragem do solo	13
2.4. Análises laboratoriais	14
2.4.1. Atributos indicadores da qualidade física do solo	15
2.4.2. Estoque de Carbono no Solo (Est.C)	16
2.5. Produtividade relativa das culturas (Prod)	16
2.6. Análise estatística	17
3. Resultados e Discussão	17
3.1. Adequação dos indicadores de qualidade física do solo	17
3.2. Relações entre os indicadores de qualidade física do solo	21
3.3. Agrupamentos entres os manejos avaliados	26
4. Conclusões	29
5. Referências	30
CONSIDERAÇÕES FINAIS	37

INDICADORES DA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM SISTEMAS INTENSIFICADOS DE PRODUÇÃO DE GRÃOS NO CERRADO MINEIRO

RESUMO GERAL - Manejos que visam a conservação do solo e da água se tornam fundamentais para garantir a sustentabilidade das atividades agrícolas, especialmente em regiões que apresentam restrições climáticas, como ocorrência de veranicos e pluviosidade irregular, como no cerrado mineiro. Nesse sentido, é necessário desenvolver estratégias que promovam melhorias na qualidade física do solo a fim de favorecer o crescimento radicular e, conseqüentemente, aumentar a eficiência do consumo de água e promover ganhos de produtividade. Assim, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o potencial de sistemas intensificados de produção de grãos na promoção da melhoria da qualidade físico-hídrica do solo e, sua relação com o rendimento de grãos. A área experimental, localizada na Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas – MG, foi composta por seis tratamentos, divididos em seis faixas experimentais, com diferentes combinações de culturas e níveis de investimento em manejo da fertilidade do solo, sendo: T1: monocultura de soja, com nível médio de investimento em adubação; T2: monocultura de milho, com nível médio de investimento em adubação; T3: rotação milho e soja, com nível médio de investimento em adubação; T4: rotação milho e soja consorciado com braquiária (*Urochloa ruziziensis*), com nível médio de investimento em adubação; T5: rotação milho e soja consorciado com braquiária, com nível alto de investimento em adubação; T6: rotação milho e soja, com nível alto de investimento em adubação. Amostras indeformadas de solo foram coletadas em três pontos georreferenciados em cada faixa, nas profundidades de 0,00-0,05 m e 0,15-0,20 m na fase de implantação do plantio direto, na safra de 2015/2016 (2ª safra), a fim de avaliar indicadores da qualidade física do solo e verificar sua relação com o estoque de carbono no solo e a produtividade de grãos. Ao considerar os valores obtidos para densidade do solo, capacidade de água disponível, capacidade de água relativa, teor de carbono orgânico no solo e, sobretudo o índice S, a curto prazo, os manejos incluindo rotação e rotação + consórcio se diferenciaram dos monocultivos, apresentando melhoria na qualidade física do solo. No entanto, as diferenças encontradas demonstraram que as operações de preparo do solo não foram suficientes para corrigir o histórico de manejo intensivo da área. Os indicadores associados a distribuição de poros por tamanho e carbono orgânico foram os principais indicadores da qualidade física do solo responsáveis por discriminarem os sistemas intensificados dos monocultivos. Os resultados da análise de componentes principais demonstraram que os indicadores associados a maior disponibilidade de água para as plantas, na profundidade de 0,00-0,05 m, e maior aeração do solo na profundidade de 0,15-0,20 m foram os fatores físicos mais importantes para o crescimento vegetal. Não houve correlação significativa entre os atributos avaliados e a produtividade de grãos. Não foi possível diferenciar os sistemas rotacionados daqueles em que se acrescentou o consórcio e o aumento de investimento em fertilização.

Palavras-chave: manejo do solo; água disponível; rotação de culturas; consórcio; análise de componentes principais.

SOIL PHYSICAL QUALITY INDICATORS IN INTENSIFIED SYSTEMS OF GRAIN PRODUCTION IN THE CERRADO OF MINAS GERAIS

GENERAL ABSTRACT - Managements that aims soil and water conservation become fundamental to guarantee the sustainability of agricultural activity, especially in regions that present climatic constraints with occurrences of drought and irregular rainfall, such as in the Cerrado of Minas Gerais. In this sense, it is necessary to develop strategies that promote improvements in soil physical quality in order to favor root growth and, consequently, increase the efficiency of water use and promote productivity gains. The objective of the present work was to evaluate the potential of intensified grain production systems, in a region with water limitation, in the promotion of the improvement of the physical and water quality of the soil and its relationship with grain yield. The experimental area, located at Embrapa Milho and Sorgo, in Sete Lagoas - MG, was composed of six treatments, divided into six experimental sections, with different crop combinations and levels of investment in soil fertility management: T1: monoculture of soybean, with average level of investment in fertilization; T2: maize monoculture, with average level of investment in fertilization; T3: maize and soybean rotation, with average level of investment in fertilization; T4: rotation of maize and soybean intercropped with *Brachiaria* (*Urochloa ruziziensis*), with average level of investment in fertilization; T5: maize and soybean rotation intercropped with brachiaria, with high level of investment in fertilization; T6: maize and soybean rotation, with high level of investment in fertilization. Undisturbed soil samples were collected at three georeferenced points in each section, at depths of 0.00-0.05 m and 0.15-0.20 m during the no-tillage phase, in the 2015/2016 harvest, in order to evaluate the soil physical quality indicators and verify their relationship with soil carbon stock and grain yield. When considering the values obtained for bulk density, plant-available water capacity, relative water capacity, organic carbon content and above all the S index, in the short term, the operations including rotation and rotation + intercropping differed from the monocultures, showing improvement in the soil physical quality. However, the differences found demonstrate that soil tillage operations were not sufficient to correct the area's intensive management history. The indicators associated with pore distribution by size and organic carbon were the main soil physical quality indicators responsible for discriminating the intensified systems from the monoculture. The results of the principal component analysis showed that the indicators associated with greater water availability for the plants, in the depth of 0.00-0.05 m, and greater aeration of the soil in the depth of 0.15-0.20 m, were the most important physical factors for plant growth. There was no significant correlation between evaluated attributes and grain yield. It was not possible to differentiate rotated systems from those in which the consortium was added and the increase in investment in fertilization.

Keywords: soil management; plant available water; crop rotation; intercropping; principal component analysis.

INTRODUÇÃO GERAL

A região do cerrado apresenta restrições climáticas com ocorrência de veranicos e pluviosidade irregular, prejudicando drasticamente a produção de sequeiro e afetando as reservas de água para a agricultura irrigada. Os solos mais utilizados para este fim, pertencente à ordem dos Latossolos, ocorrem em relevo favorável à mecanização, são profundos, possuem baixa densidade e porosidade elevada, sendo bem drenados devido sua estrutura microgranular (Ferreira et al., 1999) e fisicamente favoráveis ao desenvolvimento das raízes (Silva et al., 2014). Entretanto, esses solos são caracterizados por apresentar limitações químicas em todo o perfil, com destaque para os baixos teores de cálcio e fósforo, e elevados teores de alumínio, principalmente em subsuperfície (Lopes e Cox, 1977; Rajj, 2008), o que limita o maior desenvolvimento das raízes e deixa as lavouras mais susceptíveis à déficits hídricos e incapazes de absorver água e nutrientes em maiores profundidades (Sousa e Lobato, 2004).

Diante dessa conjuntura, torna-se necessário o desenvolvimento de sistemas de produção mais resilientes frente aos estresses bióticos e abióticos derivados das limitações climáticas regionais. Manejos que preconizam a conservação do solo e da água podem se revelar uma importante estratégia e são necessários para garantir uma produção agrícola sustentável, uma vez que os efeitos de diferentes manejos refletem nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Campos-Herrera et al., 2008; Cecagno et al., 2016; Olibone et al., 2010), podendo promover melhorias na disponibilidade de água para as plantas (Bengough et al., 2011; Reichardt e Timm, 2004; Reichert et al., 2011; Tormena et al., 2017).

As estratégias para uso eficiente da água em sistemas agrícolas de produção devem focar a maximização do uso da água armazenada no solo (Serafim et al., 2013; Silva et al., 2015). Dentre essas estratégias, destaca-se no âmbito de manejo do solo, e de forma ampla: i) aumento da retenção de água no solo na faixa de disponibilidade à planta pela incorporação de matéria orgânica (Dalmago et al., 2009) e alteração da dinâmica de poros pelo sistema de preparo do solo (Bamberg et al., 2011; Oliveira et al., 2004); ii) maximização da infiltração e minimização do escoamento superficial da água no solo, pela utilização de cobertura vegetal interceptando e reduzindo o impacto da gota de chuva; iii) redução da evaporação e elevação da umidade superficial, através da manutenção de cobertura vegetal (Bragagnolo e Mielniczuk, 1990; Stone et al., 2006); e iv) condicionamento do solo visando uma maior exploração do perfil do solo pelo aumento do crescimento e distribuição radicular, permitindo

a absorção de água em maiores profundidades (Carlesso, 1995; McCulley et al., 2004; Raij, 2008).

É crescente a demanda por práticas que promovam a sustentabilidade dos ecossistemas, para isso, é fundamental o entendimento dos processos que afetam a qualidade física do solo (QFS) e identificar quais as práticas mais adequadas à manutenção ou melhoria dos sistemas de produção (Olibone et al., 2010). Nesse contexto, o sistema plantio direto (SPD) têm ganhado destaque mundial devido aos benefícios econômicos, ambientais e sociais apresentados (Derpsch et al., 2010).

Em geral, nos primeiros anos de implantação do SPD, quando comparados aos sistemas de preparo convencional, os solos apresentam maiores valores de densidade do solo e microporosidade e menores valores de macroporosidade e porosidade total nas camadas superficiais (Stone e Silveira, 2001). Entretanto, com o passar dos anos, pode ser observada uma redução na densidade do solo sob SPD, devido, em parte, ao aumento do teor de matéria orgânica em superfície, o que melhora a estrutura do mesmo (Aziz et al., 2013). É importante ressaltar que a intensidade das alterações químicas e físicas no solo depende do período de cultivo, do número de cultivos por ano e das espécies cultivadas (Stone e Silveira, 2001).

Contudo, mesmo sob SPD, estudos tem mostrado que a compactação do solo ocorre e pode ser limitante a produtividade dos cultivos, entre as razões, está o emprego contínuo da sucessão milho e soja (Trevisan et al., 2017), limitando a diversidade biológica do sistema. Pittelkow et al. (2015) observaram, em vários estudos, que as práticas de plantio direto podem reduzir a produtividade das culturas devido à compactação do solo. Dentre essas práticas, destaca-se o tráfego de máquinas agrícolas, geralmente mais intensos nos períodos de colheita, resultando em um ambiente desfavorável ao desenvolvimento das culturas (Kunz et al., 2013; Secco et al., 2009). A compactação pode afetar o crescimento das raízes, acelerar o processo de erosão do solo, diminuir a macroporosidade do solo e com isso a aeração e atividade microbiana resultando em redução do teor de matéria orgânica, impactar negativamente na produtividade dos cultivos, além de promover aumento nos custos de produção (Reichert et al., 2009; Trevisan et al., 2017).

Diante do exposto, a preocupação com áreas agrícolas que apresentam sinais de degradação se torna crescente. Guimarães Júnnyor et al. (2015) avaliaram a QFS e o rendimento da cultura do sorgo sacarino, em tratamentos submetidos a cinco níveis de compactação por tráfegos de um trator agrícola, e observou-se interferência da QFS, através da limitação de água no solo, na produtividade final e também na qualidade do produto.

Além da preocupação com a compactação do solo, para garantir o sucesso do SPD, é necessário manter o solo coberto por restos culturais ou por plantas vivas o ano inteiro, elevando assim o teor de matéria orgânica no solo e amenizando os efeitos da erosão (Albuquerque et al., 1995). A provisão de uma grande quantidade de resíduos sobre a superfície do solo e o uso adequado de plantas de cobertura são fatores essenciais para o aumento da eficiência do uso da água. A palhada reflete parte da radiação solar, mantém temperaturas mais amenas no solo, protege contra a ação do vento e preserva a estrutura superficial (Balesdent et al., 2000; Stone e Moreira, 2000). Além disso, a cobertura morta previne a desagregação pelo impacto da gota da chuva e o selamento superficial, favorecendo a infiltração (Dalla Nora, 2017). No entanto, em locais onde a precipitação anual não é bem distribuída, com períodos chuvosos caracterizados pela ocorrência de veranicos e que apresentam elevadas temperaturas, como ocorre no cerrado mineiro, a dificuldade na formação da palhada têm sido fator limitante para eficiência do SPD (Borghini et al., 2013).

Afim de sanar esses obstáculos, vários trabalhos têm mostrado benefícios no uso de espécies de capins perenes como cultura intercalar nas safras de grãos (Borghini et al., 2013, 2012, Crusciol et al., 2015). Calonego et al. (2011) demonstraram que, quando a braquiária foi consorciada com o milho, durante dois anos consecutivos, as condições estruturais do solo foram melhoradas, reduzindo sua resistência à penetração. Em outro estudo, ao avaliar o efeito da descompactação biológica do solo pela braquiária em um sistema de sucessão milho-soja, Flávio Neto et al. (2015) observaram que a braquiária promoveu melhoria estrutural do solo o que resultou em aumento da disponibilidade de água para a cultura da soja em sucessão.

A consorciação pode auxiliar na recuperação edáfica e apresentar resultados positivos no que diz respeito a melhoria da qualidade física e biológica do solo, a qual induz a formação de bioporos que contribuem para a infiltração e agregação (Calonego et al., 2017; Flávio Neto et al., 2015; Huang et al., 2015; Papadopoulos et al., 2014; Pariz et al., 2017, 2016; Silva et al., 2007). Como também, pode proporcionar maior disponibilidade de nutrientes no solo, resultando em melhorias na fertilidade e maiores rendimentos para as culturas em sucessão (Balbinot et al., 2017; Borghini et al., 2013; Calonego et al., 2012; Crusciol et al., 2015; Pariz et al., 2017) e com isso, garantir o desenvolvimento sustentável da agricultura (Chen et al., 2014; Safadoust et al., 2014).

Deste modo, aprimorar e difundir essas práticas agronômicas que melhoram as propriedades físicas do solo, é fundamental nesse contexto climático. O uso de sistemas de cultivo intensificados, em SPD com diversificação de espécies e maior produção de palhada,

vinculado à um manejo do solo que favoreça o crescimento radicular em profundidade e o equilíbrio nutricional, constitui importante ferramenta contra os efeitos decorrentes das adversidades climáticas e a favor da estabilidade da produção (Bengough et al., 2011; Calonego et al., 2017; Derpsch et al., 2010; Silva et al., 2015; Silva et al., 2014).

REFERÊNCIAS

Albuquerque, J.A., Reinert, D.J., Fiorin, J.E., Ruedell, J., Petreere, C., Fontinelli, F., 1995. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 19.

Aziz, I., Mahmood, T., Islam, K.R., 2013. Effect of long term no-till and conventional tillage practices on soil quality. *Soil Tillage Res.* 131, 28–35. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.03.002>

Balbinot, A.A., Dos Santos, J.C.F., Debiasi, H., Yokoyama, A.H., 2017. Contribution of roots and shoots of *Brachiaria* species to soybean performance in succession. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 52, 592–598. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000800004>

Balesdent, J., Chenu, C., Balabane, M., 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil Tillage Res.* 53, 215–230. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00107-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00107-5)

Bamberg, A.L., Cornelis, W.M., Timm, L.C., Gabriels, D., Pauletto, E.A., Pinto, L.F.S., 2011. Temporal changes of soil physical and hydraulic properties in strawberry fields. *Soil Use Manag.* 27, no--no. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00355.x>

Bengough, A.G., McKenzie, B.M., Hallett, P.D., Valentine, T.A., 2011. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *J. Exp. Bot.* 62, 59–68. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq350>

Borghi, É., Crusciol, C.A.C., Nascente, A.S., Mateus, G.P., Martins, P.O., Costa, C., 2012. Effects of row spacing and intercrop on maize grain yield and forage production of palisade grass. *Crop Pasture Sci.* 63, 1106–1113. <https://doi.org/10.1071/CP12344>

Borghi, E., Crusciol, C.A.C., Nascente, A.S., Sousa, V. V., Martins, P.O., Mateus, G.P., Costa, C., 2013. Sorghum grain yield, forage biomass production and revenue as affected by intercropping time. *Eur. J. Agron.* 51, 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.08.006>

Bragagnolo, N., Mielniczuk, J., 1990. Cobertura do solo por palha de trigo e seu relacionamento com a temperatura e umidade do solo. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 14, 369–374.

Calonego, J.C., Gil, F.C., Rocco, V.F., dos Santos, E.A., Augustinho, E., 2012. Persistence and nutrient release from maize, brachiaria and lablab straw. *Biosci. J.* 28, 770–781.

Calonego, J.C., Raphael, J.P.A., Rigon, J.P.G., Oliveira Neto, L. de, Rosolem, C.A., 2017.

Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. *Eur. J. Agron.* 85, 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.02.001>

Campos-Herrera, R., Gómez-Ros, J.M., Escuer, M., Cuadra, L., Barrios, L., Gutiérrez, C., 2008. Diversity, occurrence, and life characteristics of natural entomopathogenic nematode populations from La Rioja (Northern Spain) under different agricultural management and their relationships with soil factors. *Soil Biol. Biochem.* 40, 1474–1484. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.01.002>

Carlesso, R., 1995. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. *Ciência Rural.* <https://doi.org/10.1590/S0103-84781995000100035>

Cecagno, D., de Andrade Costa, S.E.V.G., Anghinoni, I., Kunrath, T.R., Martins, A.P., Reichert, J.M., Gubiani, P.I., Balerini, F., Fink, J.R., de Faccio Carvalho, P.C., 2016. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. *Soil Tillage Res.* 156, 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.10.005>

Chen, G., Weil, R.R., Hill, R.L., 2014. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. *Soil Tillage Res.* 136, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.09.004>

Crusciol, C.A.C., Mateus, G.P., Nascente, A.S., Martins, P.O., Borghi, E., Pariz, C.M., 2012. An innovative crop-forage intercrop system: Early cycle soybean cultivars and palisadegrass. *Agron. J.* 104, 1085–1095. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0002>

Crusciol, C.A.C., Mateus, G.P., Pariz, C.M., Borghi, E., Costa, C., da Silveira, J.P.F., 2011. Nutrition and yield behavior of sorghum hybrids with contrasting cycles intercropped with marandu grass. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 46. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000017>

Crusciol, C.A.C., Nascente, A.S., Borghi, E., Soratto, R.P., Martins, P.O., 2015. Improving soil fertility and crop yield in a tropical region with palisadegrass cover crops. *Agron. J.* 107, 2271–2280. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0603>

Dalla Nora, D., 2017. Melhoria dos atributos químicos da camada de enraizamento e seu efeito sobre a produtividade das culturas em sistema plantio direto. Universidade Federal de Santa Maria.

Dalmago, G. a., Bergamaschi, H., Bergonci, J.I., Krüger, C. a. M.B., Comiran, F., Heckler, B.M.M., 2009. Retenção e disponibilidade de água às plantas, em solo sob plantio direto e preparo convencional. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 13, 855–864. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000700007>

Derpsch, R., Friedrich, T., Kassam, A., Hongwen, L., 2010. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 3, 1–25. <https://doi.org/10.3965/j.issn.1934-6344.2010.01.001-025>

Ferreira, M.M., Fernandes, B., Curi, N., 1999. Mineralogia da fração argila e estrutura de

Latossolos da região sudeste do Brasil. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 23, 507–514. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000100004>

Flávio Neto, J., Severiano, E.D.C., Costa, K.A. de P., Guimarães Junnyor, W.S., Gonçalves, W.G., Andrade, R., 2015. Biological soil loosening by grasses from genus *Brachiaria* in crop-livestock integration. *Acta Sci. Agron.* 37, 375. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v37i3.19392>

Guimarães Júnnyor, W. da S., Severiano, E. da C., Da Silva, A.G., Gonçalves, W.G., Andrade, R., Martins, B.R.R., Custódio, G.D., 2015. Desempenho do sorgo sacarino em função da compactação do solo e época de semeadura em safrinha no cerrado brasileiro. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 39, 1744–1754. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20150121>

Huang, M., Liang, T., Wang, L., Zhou, C., 2015. Effects of no-tillage systems on soil physical properties and carbon sequestration under long-term wheat-maize double cropping system. *Catena* 128, 195–202. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.02.010>

Kunz, M., Gonçalves, A.D.M. de A., Reichert, J.M., Guimarães, R.M.L., Reinert, D.J., Rodrigues, M.F., 2013. Compactação do solo na integração soja-pecuária de leite em Latossolo argiloso com semeadura direta e escarificação. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 37, 1699–1708. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000600026>

Lopes, A.S., Cox, F.R., 1977. A Survey of the Fertility Status of Surface Soils Under “Cerrado” Vegetation in Brazil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41, 742–747. <https://doi.org/10.2136/sssaj1977.03615995004100040026x>

McCulley, R.L., Jobbágy, E.G., Pockman, W.T., Jackson, R.B., 2004. Nutrient uptake as a contributing explanation for deep rooting in arid and semi-arid ecosystems. *Oecologia* 141, 620–628. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1687-z>

Olibone, D., Encide-Olibone, A.P., Rosolem, C.A., 2010. Least limiting water range and crop yields as affected by crop rotations and tillage. *Soil Use Manag.* 26, 485–493. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00301.x>

Oliveira, G.C., Dias, M.S., Resck, D.V.S., Curi, N., 2004. Caracterização química e físico-hídrica de um latossolo vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 28, 327–336. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000200011>

Papadopoulos, A., Bird, N.R.A., Whitmore, A.P., Mooney, S.J., 2014. Does organic management lead to enhanced soil physical quality? *Geoderma* 213, 435–443. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.033>

Pariz, C.M., Costa, C., Crusciol, C.A.C., Meirelles, P.R.L., Castilhos, A.M., Andreotti, M., Costa, N.R., Martello, J.M., Souza, D.M., Protes, V.M., Longhini, V.Z., Franzluebbbers, A.J., 2017. Production, nutrient cycling and soil compaction to grazing of grass companion cropping with corn and soybean. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 108, 35–54. <https://doi.org/10.1007/s10705-016-9821-y>

Pariz, C.M., Costa, C., Crusciol, C.A.C., Meirelles, P.R.L., Castilhos, A.M., Andreotti, M., Costa, N.R., Martello, J.M., Souza, D.M., Sarto, J.R.W., Franzluebbbers, A.J., 2016.

Production and soil responses to intercropping of forage grasses with corn and soybean silage. *Agron. J.* 108, 2541–2553. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.02.0082>

Pittelkow, C.M., Linquist, B.A., Lundy, M.E., Liang, X., van Groenigen, K.J., Lee, J., van Gestel, N., Six, J., Venterea, R.T., van Kessel, C., 2015. When does no-till yield more? A global meta-analysis. *F. Crop. Res.* 183, 156–168. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.07.020>

Raij, B. van, 2008. Gesso na agricultura, Campinas: Instituto Agronômico.

Reichardt, R., Timm, L.C., 2004. Solo Planta Atmosfera: conceitos, processos e aplicações, Solo Planta Atmosfera: conceitos, processos e aplicações. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Reichert, J.M., Albuquerque, J.A., Gubiani, P.I., Kaiser, D.R., Minella, J.P.G., Reinert, D.J., 2011. Hidrologia do solo, disponibilidade de água às plantas e zoneamento agroclimático. *Tópicos em ciência do solo* 1–54.

Reichert, J.M., Suzuki, L.E.A.S., Reinert, D.J., Horn, R., Håkansson, I., 2009. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Tillage Res.* 102, 242–254. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002>

Safadoust, A., Feizee, P., Mahboubi, A.A., Gharabaghi, B., Mosaddeghi, M.R., Ahrens, B., 2014. Least limiting water range as affected by soil texture and cropping system. *Agric. Water Manag.* 136, 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.01.007>

Secco, D., Reinert, D.J., Reichert, J.M., Silva, V.R. Da, 2009. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. *Ciência Rural* 39, 58–64. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782009000100010>

Serafim, M.E., Oliveira, G.C. de, Lima, J.M. de, Silva, B.M., Zeviani, W.M., Lima, V.M.P., 2013. Disponibilidade hídrica e distinção de ambientes para cultivo de cafeeiros. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 17, 362–370. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000400002>

Silva, B.M., da Silva, E.A., de Oliveira, G.C., Ferreira, M.M., Serafim, M.E., 2014. Plant-Available Soil Water Capacity: Estimation Methods and Implications. *Rev. Bras. Cienc. Do Solo* 38, 464–475. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200011>

Silva, B.M., Oliveira, G.C., Serafim, M.E., Silva, É.A., Ferreira, M.M., Norton, L.D., Curi, N., 2015. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic latosol as affected by soil management. *Soil Tillage Res.* 154, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.06.013>

Silva, B.M., Santos, W.J.R., Oliveira, G.C., Lima, J.M., Curi, N., Marques, J.J., 2015. Soil moisture space-time analysis to support improved crop management. *Cienc. e Agrotecnologia* 39, 39–47.

Silva, M.B., Kliemann, H.J., Da Silveira, P.M., Lanna, A.C., 2007. Atributos biológicos do solo sob influência da cobertura vegetal e do sistema de manejo. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 42, 1755–1761. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007001200013>

Sousa, D.D., Lobato, E., 2004. Cerrado: correção do solo e adubação. Planaltina: Embrapa

Cerrados.

Stone, L.F., Da Silveira, P.M., Alves Moreira, J.A., Pereira Braz, A.J.B., Marques, P., Aloísio, J., Moreira, A., 2006. Evapotranspiration of irrigated common bean under no-tillage on different cover crop mulches. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 41, 577–582. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000400005>

Stone, L.F., Moreira, J.A.A., 2000. Effects of soil tillage systems on the water use and on common bean yield. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 35, 835–841. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2000000400022>

Stone, L.F., Silveira, P.M., 2001. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 25, 395–401. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000200015>

Teixeira, W., Toledo, M.C.M.D., Fairchild, T.R., Taioli, F., 2000. Decifrando a Terra Capítulo - 8.pdf, Decifrando a Terra. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Tormena, C.A., Karlen, D.L., Logsdon, S., Cherubin, M.R., 2017. Corn stover harvest and tillage impacts on near-surface soil physical quality. *Soil Tillage Res.* 166, 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.09.015>

Trevisan, R.G., Freddi, O. da S., Wruck, F.J., Tavanti, R.R., Peres, F.S.C., 2017. Variabilidade de atributos físicos do solo e do arroz cultivado sob plantas de cobertura em sistema de integração lavoura-pecuária. *Bragantia* 76, 145–154. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.596>

ARTIGO

Indicadores da qualidade física do solo em sistemas intensificados de produção de grãos no cerrado mineiro

Resumo: Manejos conservacionistas podem aumentar a disponibilização de água do solo para as plantas, essencial para sustentabilidade da produção de grãos no Cerrado. Objetivou-se avaliar indicadores da qualidade física do solo e verificar sua relação com o estoque de carbono no solo e a produtividade de grãos no Cerrado mineiro. Amostrou-se em três pontos georreferenciados de seis faixas contendo sistemas de monocultura de soja (1) e de milho (2) em nível de médio investimento em adubação, rotação soja-milho em nível médio (3) e alto investimento em adubação (6) e rotação soja-milho consorciado com braquiária em nível médio (4) e alto investimento em adubação (5), em Sete Lagoas no ano de 2016, na fase de implantação do plantio direto. Os tratamentos 3, 4, 5 e 6 apresentaram melhoria na qualidade física do solo em relação ao monocultivo. Indicadores da distribuição dos poros e carbono orgânico foram os principais responsáveis por discriminarem os sistemas intensificados. Atributos relacionados a disponibilidade de água foram importantes para o crescimento vegetal na profundidade de 0,00-0,05 m, enquanto que para profundidade de 0,15-0,20 m destacou-se a maior aeração do solo. A produtividade não se correlacionou com os atributos avaliados.

Palavras-chave: manejo do solo, limitação hídrica, rotação de culturas, consórcio, análise de componentes principais

Soil physical quality indicators in intensified systems of grain production in the Cerrado of Minas Gerais

Abstract: Conservation management is important because it favors root growth and increases the efficiency of soil water consumption. The objective of this study was to evaluate soil physical quality indicators and to verify their relationship with soil carbon stock and grain yield in the cerrado of Minas Gerais. It was sampled in three georeferenced points for each of the six sections containing monoculture of soybean, with average level of investment in fertilization (1), maize monoculture, with average level of investment in fertilization (2), maize and soybean rotation, with average level of investment in fertilization (3), rotation of maize and soybean intercropped with brachiaria, with average level of investment in fertilization (4), maize and soybean rotation intercropped with brachiaria, with high level of investment in fertilization (5), maize and soybean rotation, with high level of investment in fertilization (6). 3, 4, 5 and 6 showed improvement in soil physical quality in relation to monoculture systems. Soil pore arrangement and organic carbon content were mainly responsible for discriminating the intensified systems. Attributes related to water distribution were important for plant growth in the depth of 0.00-0.05 m, while for the depth of 0.15-0.20 m the highest aeration of the soil was highlighted. Productivity did not correlate with assessed attributes.

Key words: soil management, drought, crop rotation, intercropping, principal component analysis

1. Introdução

A região do Cerrado destaca-se em produção de grãos no Brasil. Todavia, essa região apresenta restrições climáticas com ocorrência de veranicos e pluviosidade irregular, prejudicando drasticamente a produção de sequeiro e afetando as reservas de água para a agricultura irrigada. Assim sendo, manejos conservacionistas que possibilitam aumento na capacidade do solo em disponibilizar água para as plantas, em conjunto com o incentivo do desenvolvimento radicular à maiores profundidades, podem tornar menos severos os efeitos prejudiciais dos veranicos sobre as culturas (Bengough et al., 2011) e serem decisivos no sucesso da atividade agrícola (Silva et al., 2014; Silva et al., 2015).

No entanto, práticas conservacionistas, como o sistema plantio direto (SPD), apresentam limitações nessas regiões devido à dificuldade na formação da palhada, que dentre outros conhecidos benefícios, auxilia na incorporação de matéria orgânica no solo contribuindo para melhoria da qualidade física do solo (QFS) (Borghetti et al., 2013). Outro problema comumente enfrentado é a compactação do solo, a qual pode afetar o crescimento das raízes, acelerar o processo de erosão do solo, diminuir o teor de matéria orgânica e com isso reduzir a produtividade dos cultivos, além de promover aumento nos custos de produção (Pittelkow et al., 2015; Trevisan et al., 2017).

Afim de garantir a eficiência do SPD, vários trabalhos têm mostrado benefícios no uso de espécies de capins perenes como cultura intercalar nas safras de grãos (Borghetti et al., 2013, 2012, Crusciol et al., 2015, 2012, 2011). A consorciação apresenta resultados positivos no que diz respeito a melhoria da qualidade física e biológica do solo (Calonego et al., 2017; Pariz et al., 2017, 2016; Silva et al., 2007), além de proporcionar maior disponibilidade de nutrientes no solo, resultando em melhorias na fertilidade e maiores rendimentos para as culturas em sucessão (Balbinot et al., 2017; Borghetti et al., 2013; Calonego et al., 2012; Crusciol et al., 2015; Pariz et al., 2017).

Deste modo, o conhecimento dos efeitos de práticas de manejo na QFS, na fase de estabelecimento do SPD, é fundamental nesse contexto climático. Assim, o presente estudo visou avaliar indicadores da QFS, e verificar sua relação com o estoque de carbono no solo e a produtividade de grãos em função da adoção de práticas de manejo que visam intensificar o cultivo em sistemas de produção de grãos. Testou-se a hipótese de que sistemas intensificados, com adoção de consorciação, rotação de culturas e alto investimento em fertilização do solo, na implantação do SPD, proporcionam melhoria na QFS e, conseqüentemente, podem impactar na produtividade de grãos no Cerrado mineiro.

2. Material e Métodos

2.1. Localização, caracterização e implantação da área experimental

O experimento foi conduzido em uma área de sequeiro destinada a produção de grãos pertencente a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) - Milho e Sorgo, no município de Sete Lagoas, em Minas Gerais (19°45' S, 44°17' W, altitude média de 735,3 m) (Figura 1). O clima é subtropical úmido (Cwa) segundo Köppen, com temperatura média anual de 22,1 °C e índice pluviométrico anual médio de 1.382,7 mm, apresentando volume concentrado de chuvas entre os meses de outubro a abril. A área experimental contempla 4,4 ha, e o solo classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (Embrapa, 2013), correspondente a Typic Haplustox (Staff, 1999) contendo 190, 120 e 690 g kg⁻¹ de areia, silte e argila respectivamente, e mineralogia com predomínio de caulinita. Nos 20 anos anteriores à implantação do experimento, a área era utilizada para o plantio de milho e soja.

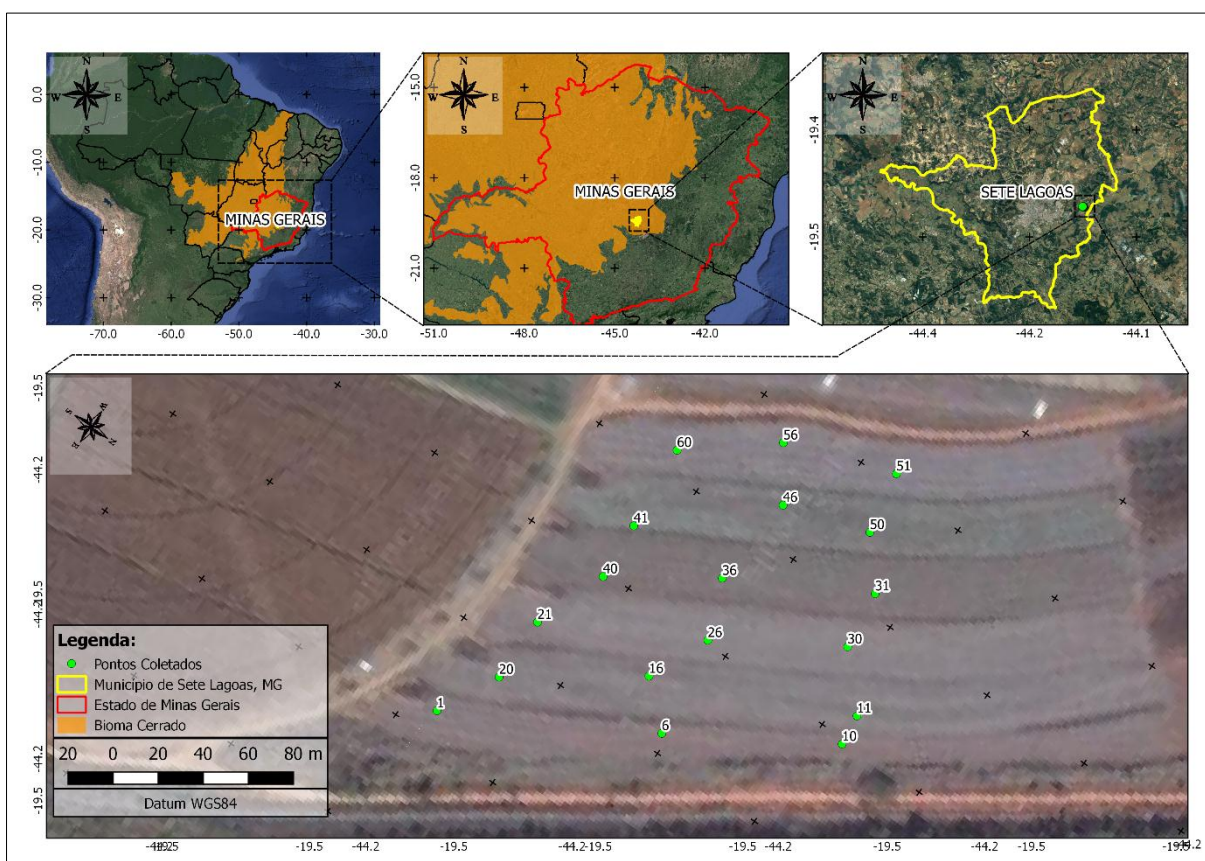


Figura 1: Localização da área experimental. As coordenadas geográficas dos pontos de coleta foram apresentadas na Tabela 2. Crédito: Elaborada por Pedro Arthur de Azevedo Silva.

A implantação do experimento ocorreu no ano de 2014, sendo que a análise química precedeu a semeadura do experimento e foi realizada na profundidade de 0,00-0,20 m no mês

de julho/2014. Os resultados demonstraram os seguintes valores para pH em água: 5,9; carbono orgânico total: 20 g kg⁻¹; teores de P e K (Mehlich 1): 2 e 17 mg dm⁻³, respectivamente; Ca: 3,8 cmol_c dm⁻³; saturação por bases: 39% e saturação por Al: 4,7%.

A partir de agosto de 2014 foram realizadas operações de mobilização do solo com o intuito de eliminar as possíveis camadas compactadas devido ao histórico da área de sucessivos cultivos de grãos, além de incorporação de corretivos e fertilizantes, a fim de favorecer o futuro estabelecimento do sistema plantio direto (SPD). Destaca-se que as operações iniciais visaram alcançar profundidade superior aos preparos de solo praticados na região (0,20 m). Portanto, realizou-se a subsolagem em área total até a profundidade de 0,35 m. Em setembro de 2014 foi efetuado a calagem com aplicação de 4 t ha⁻¹ de calcário, dividida em 2 aplicações: a primeira incorporada com arado de aiveca e a segunda com grade aradora. Em outubro de 2014 foram realizadas aplicações de gesso agrícola (3 t ha⁻¹), fertilizante contendo 3,9% de enxofre, 1,8% de boro, 0,85% de cobre, 2% de manganês e 9% de zinco (93 kg ha⁻¹), cloreto de potássio (306 kg ha⁻¹) e superfosfato simples (1.100 kg ha⁻¹), incorporados com grade niveladora. Todas as operações de construção da fertilidade e preparo do solo ocorreram na ausência de chuva e as quantidades calculadas para realizar a correção e o manejo da fertilidade do solo seguiram as recomendações de Sousa e Lobato (2002).

Em novembro/2014, realizou-se o controle de plantas daninhas, utilizando 3 kg ha⁻¹ de glifosato e 75 mL ha⁻¹ de carfentrazona-etílica. Em dezembro/2014, após o estabelecimento das chuvas, realizou-se a semeadura das culturas em função dos tratamentos empregados.

2.2. Sistemas de manejo avaliados

A área experimental foi dividida em 6 faixas contendo tratamentos que variaram de acordo com os sistemas de cultivo combinados com diferentes níveis de investimento em adubação. Os sistemas de cultivo consistiram em monocultura, rotação e tratamentos que combinaram rotação de culturas e consórcio dentro de uma mesma faixa (Tabela 1). Já os níveis de investimento em adubação foram baseados nas demandas para elevadas produtividades de grãos de milho e de soja (Resende et al., 2016), sendo as necessidades nutricionais completamente (alto nível de investimento) ou parcialmente atendidas (médio nível de investimento) (Tabela 1). As condições climáticas predominantes na região de Sete Lagoas não permitem a opção de cultivos em safrinha. Deste modo, a definição dos tratamentos foi baseada na realização de rotação anual com soja e introdução da braquiária (*Urochloa ruziziensis*) em consórcio para incrementar a produção de palhada favorecendo os cultivos

seguintes, sobretudo em relação ao melhor aproveitamento da água das chuvas e redução de perdas de produtividade devido à ocorrência de veranicos.

Tabela 1: Caracterização dos tratamentos em função dos sistemas de cultivo e dos níveis de investimento em adubação em razão das quantidades de nitrogênio (N), fósforo (P₂O₅) e potássio (K₂O) pelas culturas semeadas em cada ano agrícola.

Tratamentos	Nível de investimento em adubação	Ano agrícola	Verão	Outono-primavera	Adubação kg ha ⁻¹		
					N	P ₂ O ₅	K ₂ O
1	Médio	2014/15	Soja	Pousio	8,2	82	82
		2015/16	Soja	Pousio	7	70	70
2	Médio	2014/15	Milho	Pousio	33,2	116,2	66,4
		2015/16	Milho	Pousio	24	84	48
3	Médio	2014/15	Milho	Pousio	33,2	116,4	66,4
		2015/16	Soja	Pousio	7	70	70
4	Médio	2014/15	Milho + Braquiária	Braquiária	33,2	116,2	66,4
		2015/16	Soja + Braquiária	Braquiária	7	70	70
5	Alto	2014/15	Soja + Braquiária	Braquiária	9,6	95,8	95,8
		2015/16	Milho + Braquiária	Braquiária	36	126	72
6	Alto	2014/15	Soja	Pousio	9,6	95,8	95,8
		2015/16	Milho	Pousio	36	126	72

2.3. Amostragem do solo

Foram coletadas amostras indeformadas de solo em cilindros metálicos com dimensões e massa previamente determinados, em março de 2016, quando o solo estava sob uso das culturas semeadas em novembro de 2015 (safra 2015/2016). As profundidades de amostragem foram 0,00-0,05 m e 0,15-0,20 m. Para tal, previamente foram realizados ensaios de resistência a penetração com penetrômetro de impacto e as duas camadas selecionadas obtiveram os maiores valores de resistência à penetração, o que sugeriu uma maior limitação do solo ao crescimento de raízes.

Em cada tratamento foram determinados três pontos georreferenciados (Tabela 2) de forma aleatória nas faixas de cultivo (Figura 1). Em cada um desses pontos foi coletado um conjunto de sete cilindros por profundidade, perfazendo quatorze cilindros por tratamento e 252 no total. As amostras foram parafinadas, com o intuito de preservar a umidade do solo e a qualidade física das amostras até o momento da análise.

Tabela 2: Coordenadas geográficas dos pontos de coleta.

Tratamentos	Pontos coletados	Posição	Altitude (m)
1	1	S19° 27.502' W44° 10.412'	729,5
	6	S19° 27.452' W44° 10.440'	730,7
	10	S19° 27.413' W44° 10.464'	732,0
2	11	S19° 27.414' W44° 10.472'	731,3
	16	S19° 27.463' W44° 10.450'	733,0
	20	S19° 27.494' W44° 10.428'	733,4
3	21	S19° 27.494' W44° 10.445'	733,7
	26	S19° 27.456' W44° 10.466'	733,9
	30	S19° 27.426' W44° 10.485'	734,9
4	31	S19° 27.428' W44° 10.500'	735,9
	36	S19° 27.462' W44° 10.481'	736,1
	40	S19° 27.487' W44° 10.464'	736,9
5	41	S19° 27.488' W44° 10.479'	738,0
	46	S19° 27.460' W44° 10.505'	738,5
	50	S19° 27.438' W44° 10.512'	738,3
6	51	S19° 27.441' W44° 10.528'	740,1
	56	S19° 27.469' W44° 10.518'	739,8
	60	S19° 27.490' W44° 10.501'	739,7

2.4. Análises laboratoriais

As amostras foram preparadas, saturadas (por meio do aumento gradual da lâmina de água, em bandeja), pesadas para a determinação da umidade na saturação (SAT) e separadas em 7 grupos contendo 36 amostras. Cada uma das 7 amostras foi submetida a um potencial matricial diferente para a construção da curva de retenção de água (CRA). Foram adotados os seguintes potenciais (Ψ): -4 kPa, -6 kPa e -10 kPa, em mesa de tensão automatizada da marca EcoTech e -33 kPa, -100 kPa, -500 kPa e -1500 kPa no extrator de Richards (Donagemma et al., 2011; Klute, 1986). As amostras permaneceram nos equipamentos até que atingissem o equilíbrio hídrico em cada um dos potenciais e então foram pesadas e levadas à estufa com temperatura média de 105° C por 24 horas ou até obtenção de peso constante, para a determinação do conteúdo de água volumétrica no solo (θ) em cada potencial.

Os dados de θ e o potencial matricial foram ajustados ao modelo proposto por Van Genuchten (1980) para modelar a curva de retenção de água no solo, conforme eq. 1.

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

Em que θ é o conteúdo de água volumétrico no solo; θ_s é o conteúdo de água no solo na saturação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); θ_r é o conteúdo de água no solo residual ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) Ψ é potencial

matricial (kPa); n , α e m [$1-(1/n)$], são parâmetros de ajuste da curva de retenção de água no solo obtidos através do programa RET-C (Van Genuchten et al., 1991).

Com o solo excedente dos anéis volumétricos realizou-se a análise textural do solo para caracterizar cada uma das faixas destinadas aos tratamentos (Tabela 3). Utilizou-se o método da pipeta, com solução de NaOH como dispersante químico e agitação lenta de 40 rpm, por 16 horas segundo Donagemma et al. (2011).

Tabela 3: Teores de areia, silte e argila para cada tratamento avaliado em um Latossolo Vermelho distrófico típico submetido ao cultivo de grãos em sequeiro.

Tratamentos	Areia	Silte		Argila
		----- % -----		
1	11	9		80
2	10	14		76
3	11	14		75
4	11	12		77
5	12	14		74
6	11	18		71

2.4.1. Atributos indicadores da qualidade física do solo

A densidade do solo (D_s , mg m^{-3}) foi calculada pela relação entre massa do solo seco em estufa e o volume total de solo. A porosidade total (P_t , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) foi considerada como equivalente a umidade na saturação (θ_s). A microporosidade (Micro, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) foi determinada como o conteúdo de água do solo no potencial de -6 kPa, conforme método mais indicado para solos tropicais (Grohmann, 1960), e a macroporosidade (Macro, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) foi determinada pela diferença entre P_t e Micro.

A capacidade de água disponível (CAD, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) foi determinada pela diferença entre a capacidade de campo (CC) estimada pelo conteúdo de água retido a -6 kPa, conforme sugerido para Latossolos muito argilosos oxídicos do Cerrado (Silva et al., 2014), e o ponto de murcha permanente (PMP) a -1.500 kPa. A partir da CAD, foi calculado os valores de água prontamente disponível (APD), considerando a fração de depleção para a cultura do milho (fator $p = 0,54$) e da soja (fator $p = 0,59$), conforme Allen et al. (1998).

A capacidade relativa de água (RWC, adimensional) indica a capacidade do solo em armazenar água e ar em relação ao volume total de poros (Reynolds et al., 2009), e foi calculado pela eq. 2:

$$RWC = \left(\frac{CC}{\theta_s} \right) = \left[\frac{(CAD+PMP)}{\theta_s} \right] \quad (2)$$

Em que CC é a capacidade de campo, θ_s é a umidade na saturação, CAD é a capacidade de água disponível e PMP é o ponto de murcha permanente.

O índice S foi calculado conforme proposto por Dexter (2004), a partir dos dados modelados de retenção de água no modelo de Van Genuchten (1980).

2.4.2. Estoque de Carbono no Solo (Est.C)

Para a quantificação do carbono orgânico total (CO) nas amostras de solo, utilizou-se o método de Walkley-Black modificado (Jackson, 1958), de acordo com os procedimentos descritos por Donagemma et al. (2011). A partir dos valores de CO calculou-se o percentual de matéria orgânica do solo (MO), considerando o fator de Van Bemmelen (eq. 3) (Raij, 1969).

$$M. O. = CO \times 1,724 \quad (3)$$

O estoque de carbono (Est.C, mg ha⁻¹) foi calculado para as profundidades de 0,00-0,05 m e 0,15-0,20 m, em que:

$$Est. C = \frac{Ds \times CO \times E}{10} \quad (4)$$

Onde Ds é a densidade do solo, CO é o teor de carbono orgânico e E é a espessura da camada considerada (cm).

2.5. Produtividade relativa das culturas (Prod)

A produtividade das culturas em cada tratamento foi calculada a partir da coleta de todos os grãos contidos em três linhas de três metros de comprimento em cada ponto georreferenciado e estimada em kg ha⁻¹. A partir da produtividade máxima estimada para cada cultura (milho ou soja), foram calculadas as produtividades relativas (Prod), pela proporção em relação ao tratamento com maior produtividade, de acordo com o cálculo descrito por Borghi et al. (2013).

2.6. Análise estatística

Por se tratar de uma amostragem com pseudo-repetições, em função da restrição de casualização inerente ao experimento conduzido em grandes faixas (Cecagno et al., 2016), os dados de cada atributo do solo foram submetidos a análise estatística multivariada, sendo que as duas profundidades foram avaliadas separadamente pela análise de componentes principais (ACP). Nessa análise, o intuito foi explicar a estrutura de variância e covariância dos dados por meio da construção de combinações lineares que são chamadas de componentes principais (CP). Assim, todos os atributos de cada manejo podem ser avaliados simultaneamente.

Adicionalmente, para aprimorar o estudo dos gráficos de dispersão, realizou-se a análise de agrupamentos, gerando dendrogramas formados por níveis de dissimilaridade medidos pela distância euclidiana média, através do método de Ward. Dessa forma, possibilita-se a distinção entre os manejos avaliados.

A fim de constatar os resultados obtidos pela ACP, efetuou-se também análises de correlação de Pearson entre as variáveis estudadas a um nível de probabilidade de 5%. Previamente, a normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk. Todas as análises foram realizadas com o auxílio do Programa R (R Development Core Team, 2011), sendo utilizado o pacote “ggbiplot” para gerar o gráfico da ACP, o pacote “vegan” para construir o dendrograma e o pacote “agricolae” para as análises de correlação.

3. Resultados e Discussão

3.1. Adequação dos indicadores de qualidade física do solo

Os valores dos indicadores da QFS foram confrontados com valores considerados adequados, sem restrições para o crescimento de plantas, conforme disponíveis na literatura (Tabela 4). Diante disso, considera-se como intervalo ótimo para solos de textura média a argilosa, presença de macroporos com volume entre $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Reynolds et al., 2008). Constatou-se que os valores médios de Macro estiveram acima de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em todos os tratamentos nas duas profundidades avaliadas, podendo haver excesso de aeração no solo, e os valores mínimos estiveram acima de $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, indicando ausência de limitação por aeração.

Tabela 4: Valores máximo, mínimo e médio encontrados para diferentes sistemas de manejo de solos agrícolas nas profundidades de 0-0,05 m e 0,15-0,20 m, produtividade relativa das culturas e intervalo ótimo apontado na literatura para os indicadores de qualidade física do solo.

Trat.	Ds	Micro	Macro	RWC	CAD	APD	SAT	n	S	CO	Est. C	Prod	
1	0,00-0,05 m												
	Máx	1,230	0,444	0,132	0,849	0,130	0,076	0,553	1,431	0,055	2,18	12,54	100,0
	Mín	1,088	0,414	0,077	0,758	0,127	0,075	0,519	1,289	0,041	2,04	11,86	
	Méd	1,173	0,430	0,105	0,804	0,129	0,076	0,533	1,358	0,048	2,09	12,23	
	0,15-0,20 m												
	Máx	1,158	0,407	0,125	0,781	0,127	0,075	0,549	1,539	0,059	2,09	12,08	
Mín	1,067	0,406	0,114	0,764	0,094	0,055	0,520	1,272	0,039	1,75	9,41		
2	0,00-0,05 m												
	Máx	1,123	0,413	0,180	0,775	0,171	0,092	0,608	1,226	0,050	2,25	11,68	81,1
	Mín	0,994	0,401	0,119	0,689	0,069	0,037	0,545	1,077	0,015	2,08	11,17	
	Méd	1,071	0,408	0,155	0,726	0,128	0,069	0,580	1,144	0,037	2,14	11,42	
	0,15-0,20 m												
	Máx	1,085	0,409	0,161	0,785	0,121	0,066	0,562	1,573	0,068	2,45	13,15	
Mín	1,064	0,389	0,112	0,716	0,111	0,060	0,544	1,221	0,042	1,99	10,59		
3	0,00-0,05 m												
	Máx	1,051	0,392	0,213	0,688	0,142	0,084	0,602	1,882	0,115	2,79	12,84	97,7
	Mín	0,922	0,374	0,177	0,637	0,118	0,070	0,591	1,199	0,052	2,39	12,53	
	Méd	0,986	0,385	0,198	0,660	0,126	0,074	0,596	1,490	0,079	2,59	12,69	
	0,15-0,20 m												
	Máx	1,011	0,409	0,242	0,687	0,134	0,079	0,589	1,977	0,120	2,50	12,42	
Mín	0,908	0,357	0,173	0,597	0,128	0,075	0,578	1,567	0,080	2,28	10,34		
4	0,00-0,05 m												
	Máx	1,098	0,437	0,161	0,784	0,160	0,094	0,585	1,330	0,063	2,83	15,53	92,8
	Mín	1,036	0,410	0,120	0,721	0,140	0,083	0,561	1,188	0,045	2,64	13,69	
	Méd	1,066	0,422	0,147	0,743	0,150	0,089	0,571	1,278	0,055	2,72	14,49	
	0,15-0,20 m												
	Máx	1,167	0,457	0,149	0,843	0,171	0,101	0,565	1,462	0,066	2,49	14,46	
Mín	1,068	0,392	0,085	0,725	0,126	0,074	0,545	1,144	0,040	2,45	13,09		
5	0,00-0,05 m												
	Máx	1,058	0,419	0,224	0,738	0,178	0,096	0,612	1,819	0,120	2,68	14,15	100,0
	Mín	0,969	0,387	0,148	0,636	0,135	0,073	0,560	1,245	0,067	2,59	12,55	
	Méd	1,000	0,399	0,190	0,679	0,163	0,088	0,592	1,494	0,085	2,62	13,11	
	0,15-0,20 m												
	Máx	1,063	0,433	0,206	0,739	0,199	0,107	0,627	1,773	0,116	2,63	12,78	
Mín	0,971	0,378	0,148	0,647	0,151	0,082	0,598	1,187	0,056	2,34	12,41		
6	0,00-0,05 m												
	Máx	1,145	0,450	0,198	0,773	0,171	0,092	0,586	1,586	0,086	2,76	15,77	86,4
	Mín	0,979	0,386	0,132	0,662	0,145	0,078	0,568	1,386	0,065	2,07	10,15	
	Méd	1,056	0,416	0,162	0,720	0,155	0,084	0,575	1,483	0,075	2,42	12,84	
	0,15-0,20 m												
	Máx	1,151	0,432	0,170	0,774	0,143	0,077	0,589	1,705	0,084	2,55	14,68	
Mín	1,100	0,414	0,125	0,708	0,135	0,073	0,569	1,352	0,064	2,34	13,02		
Intervalo ótimo													
Máx	1,2 ^a	-	0,10 ^a	0,7 ^a	0,20 ^a	-	-	-	0,080 ^b	5 ^a	-	-	
Mín	0,9 ^a	-	0,05 ^a	0,6 ^a	0,15 ^a	-	-	-	0,045 ^b	3 ^a	-	-	

Ds (mg m⁻³): densidade do solo; Micro (m³ m⁻³): microporosidade do solo; Macro (m³ m⁻³): macroporosidade do solo; RWC: capacidade relativa de água; CAD (m³ m⁻³): capacidade de água disponível no solo; APD (m³ m⁻³): água prontamente disponível; SAT (m³ m⁻³): umidade na saturação; n: parâmetro de ajuste da curva de retenção de água do solo; S: índice S; CO (%): carbono orgânico; Est.C (mg ha⁻¹): estoque de carbono; Prod (%): Produtividade relativa. a: valores extraídos de Reynolds et al. (2008); b: valores extraídos de Andrade e Stone (2009). Demais indicadores não possuem proposições de limites. 1: monocultura de soja; 2: monocultura de milho; 3: rotação soja-milho médio investimento; 4: rotação soja-milho + braquiária médio investimento; 5: rotação soja-milho + braquiária alto investimento; 6: rotação soja-milho alto investimento.

Latossolos oxídicos normalmente apresentam volume de Macro acima de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o que é característica comum e resultante da estrutura granular, permitindo rápida drenagem e assim dificilmente apresentam como limitação para o desenvolvimento vegetal a difusão de oxigênio no solo mesmo sob manejo intensivo, corroborando com os resultados encontrados por Tormena et al. (1998), Klein e Libardi (2002) e Silva et al. (2015). Semelhantemente, Spera et al. (2006) observaram valores de Macro entre $0,093 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,157 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em um Latossolo Vermelho distrófico sob sistemas de produção de grãos integrados com pastagens, em Coxilha, RS.

Para a Ds foi possível observar valores ideais, entre $0,9$ e $1,2 \text{ mg m}^{-3}$ (Reynolds et al., 2008), em todos os tratamentos, com exceção no 1 que apresentou valor máximo de Ds equivalente a $1,23 \text{ mg m}^{-3}$ (Tabela 4). No entanto, este valor ainda não é considerado crítico para a produtividade das lavouras. Segundo Reynolds et al. (2008), o rendimento das culturas pode ser reduzido, devido a aeração inadequada do solo, quando a Ds máxima for superior a $1,25 \text{ mg m}^{-3}$.

Em solos brasileiros, muito intemperizados, Tormena et al. (1999) identificaram que em um Latossolo sob plantio direto a Ds é considerada crítica a partir de $1,27 \text{ mg m}^{-3}$. Em um solo similar ao do presente trabalho, com cultivo de soja em plantio direto também na fase de implantação, Suzuki (2005) observou que a Ds foi restritiva ao crescimento radicular e a produtividade da cultura quando esta alcançou valor médio de $1,36 \text{ mg m}^{-3}$. Em um estudo nessa mesma região, Mantovani (1984) observou valor máximo de Ds igual a $1,32 \text{ mg m}^{-3}$ em um estudo que objetivou quantificar o efeito de cinco níveis de compactação na produtividade do milho, sendo este valor superior ao aqui encontrado.

A CAD indica a capacidade do solo em armazenar e fornecer água que pode ser disponível para as raízes das plantas. Em solos argilosos, valores de CAD entre $0,15$ e $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ são considerados apropriados para o crescimento e função radicular (Reynolds et al., 2008). Verificou-se que os valores médios de CAD foram inferiores a $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ nos tratamentos 1, 2 e 3 nas duas profundidades avaliadas e no tratamento 6 na profundidade de $0,15\text{-}0,20 \text{ m}$, apontando uma limitação hídrica para o desenvolvimento radicular (Tabela 4). Nos tratamentos 1 e 2 ainda foram observados valores mínimos de CAD inferiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o qual indica que o solo está em uma condição seca (Reynolds et al., 2008). Para Latossolos do Cerrado (que normalmente contém mais de 60% de argila), valores de CAD entre $0,06$ e $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ indicam baixa retenção de água na faixa de disponibilidade para as plantas, segundo as classificações de Ranzani (1971). Em um Latossolo Vermelho sob cerrado, Silva

et al. (2014) encontraram valores de CAD efetivamente mais altos (a partir de $0,18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), com metodologia diferente da aplicada por Reynolds et al. (2008) pelo fato de considerar a tensão de -6 kPa para o cálculo da CAD, e concluíram que os critérios de estimativa influem marcadamente no seu resultado.

O índice S mostrou que os tratamentos onde se estabeleceram o monocultivo (1 e 2) apresentaram valores mínimos inferiores a 0,045 (Tabela 4), valor estabelecido como limite entre solos de boa qualidade estrutural e solos com tendência a se tornarem degradados em ambiente de Cerrado (Andrade e Stone, 2009). Destaca-se ainda que no tratamento 2, o valor médio também indicou tendência de degradação estrutural, e o valor mínimo foi $< 0,025$, indicando solos fisicamente degradados (Andrade e Stone, 2009), o que afetou diretamente na produtividade da cultura, já que este apresentou menor produtividade relativa (81,1%). Entretanto, observou-se valores médios de índice S $> 0,045$ em 3, 4, 5 e 6, sugerindo boa qualidade estrutural (Andrade e Stone, 2009), contudo também indicam presença limitada de poros de tamanho intermediário. Sendo que, quando o desequilíbrio na porosidade do solo for provocado pela abundância de poros grandes, pode haver excesso de aeração do solo e com isso estimular o consumo oxidativo da matéria orgânica e aumentar a perda de água por evaporação ou mesmo por drenagem excessiva (Reynolds et al., 2008), podendo afetar diretamente na disponibilidade de água para as plantas.

A RWC se manteve entre os limites adequados apenas nos tratamentos 3 e 5 (Tabela 4). Nos demais, os valores foram superiores a 0,7 indicando possível redução da atividade microbiana devido à insuficiente capacidade de disponibilização de ar no solo (Linn e Doran, 1984; Skopp et al., 1990), contrastando com as observações feitas para Ds e Macro. A RWC sugere qual limitação do solo é mais séria para a produção agrícola, se aeração ou hídrica, sendo proposta a faixa ótima para as culturas de $0,6 \leq \text{RWC} \leq 0,7$ (Reynolds et al., 2008), contudo esses limites foram estabelecidos em países de clima temperado, carecendo ainda de adaptações para condições de clima tropical.

O teor de carbono orgânico no solo (CO) é um importante indicador da qualidade do solo, que se relaciona com a QFS afetando a porosidade, e com isso, influencia na capacidade do solo em fornecer água e ar para as plantas (Reynolds et al., 2008), na infiltração de água e susceptibilidade a erosão, além de ser fonte de nutrientes (Gregorich et al., 1994) e fundamental na geração de cargas no solo devido ao avançado estágio de intemperismo dos solos do Cerrado. Em todos os tratamentos, o CO ficou abaixo do limite inferior da faixa de 3 a 5%, associados a produção máxima de culturas em campo (Tabela 4). Enquanto que valores inferiores a 2,3% podem resultar em perda da QFS (Reynolds et al., 2008).

Os tratamentos 1 e 2 (monocultivos de soja e milho) apresentaram valores inferiores ao limite crítico de 2,3% para CO. Entretanto, nos demais tratamentos os valores estão acima do limite crítico, sugerindo que esses manejos têm contribuído para manter a qualidade do solo. A adoção de estratégias de manejos que permitam um maior aporte de MO no solo pode alterar favoravelmente a estrutura do solo assim como mitigar os efeitos promovidos pela alta temperatura (Balesdent et al., 2000; Conceição et al., 2005). Nesse sentido, o SPD tem sido recomendado por diminuir a temperatura do solo (Coote e Malcolm-McGovern, 1989) e quando aliado a sistemas intensificados de cultivo, contribuem com o aumento do teor de MO no solo devido ao maior aporte de biomassa vegetal (Lovato et al., 2004; Mishra et al., 2015), beneficiando a estruturação do solo (Calonego et al., 2011) e resultando numa configuração de poros favorável a capacidade do solo em disponibilizar água para as plantas (Olibone et al., 2010).

Portanto, observa-se que no geral, os tratamentos com monocultivo (1 e 2) apresentaram pior QFS, com indícios de compactação do solo e menor teor de CO. No entanto, as diferenças observadas entre os tratamentos são pequenas, demonstrando que as operações de preparo realizadas antes da implantação do experimento não foram suficientes para corrigir o histórico de manejo intensivo da área.

3.2. Relações entre os indicadores de qualidade física do solo

A análise multivariada indicou que a distribuição das variáveis selecionadas obteve variância acumulada de 81,1% para a profundidade de 0,00-0,05 m e 82,1% para a profundidade de 0,15-0,20 m ao considerar os dois fatores principais: CP1 e CP2 (Tabela 5). A primeira componente (CP1) foi capaz de explicar 55% e 52,7% da variabilidade dos atributos do solo nas profundidades de 0,00-0,05 e 0,15-0,20 m, respectivamente, com destaque para os atributos macroporosidade do solo (Macro), índice S e umidade na saturação (SAT) com os maiores escores positivos, e também os atributos densidade do solo (Ds) e capacidade relativa de água (RWC), porém com escores negativos. Esses resultados indicam a relação existente entre a qualidade física do solo medida pelo S com a disposição dos poros, apresentando relação positiva com a Macro e negativa com a Ds, conforme observado por Assis et al. (2015).

A segunda componente (CP2) explicou 26,1% da variância total na profundidade de 0,00-0,05 m e é positivamente relacionada com os atributos água prontamente disponível (APD), estoque de carbono (Est.C), capacidade de água disponível (CAD) e microporosidade do solo

(Micro). Na profundidade de 0,15-0,20 m, essa componente explicou 29,4% da variabilidade total. No entanto, relaciona-se negativamente com os mesmos atributos, e também com CO (-0,349), indicando que há um decréscimo desses atributos em maiores profundidades. De acordo com o esperado, pois a matéria orgânica é mais abundante na superfície do solo em decorrência da decomposição de restos de plantas e maior atividade de microrganismos, além de ser um dos fatores que influenciam na disponibilidade de água para as plantas (Reichardt and Timm, 2004; Reichert et al., 2011).

Tabela 5: Importância das componentes principais das variáveis analisadas nas profundidades de 0,00-0,05 m e 0,15-0,20 m da área experimental.

Componentes da variância	CP1	CP2	CP1	CP2
	0,00-0,05 m		0,15-0,20 m	
Autovalores	2,562	1,758	2,516	1,857
Variância explicada (%)	55	26,1	52,7	29,4
Variância explicada acumulada (%)	55	81,1	52,7	82,1
Variáveis	Carga fatorial (escores)			
Densidade do solo	-0,369	0,163	-0,328	-0,243
Microporosidade do solo	-0,304	0,345	-0,160	-0,447
Macroporosidade do solo	0,362	-0,205	0,385	0,068
Capacidade relativa de água	-0,355	0,233	-0,375	-0,167
Capacidade de água disponível no solo	0,176	0,395	0,256	-0,373
Água prontamente disponível	0,172	0,488	0,246	-0,307
Umidade na saturação	0,330	-0,230	0,363	-0,152
Parâmetro n	0,274	0,126	0,295	0,253
Índice S	0,350	0,106	0,388	0,007
Carbono orgânico	0,317	0,213	0,246	-0,349
Estoque de carbono	0,184	0,443	0,053	-0,493
Produtividade relativa	0,116	0,206	0,139	0,151

Ao observar o diagrama de ordenação da PCA (Figura 2), nota-se que para a profundidade de 0,00-0,05 m o Est.C relacionou-se positivamente com os atributos APD e CAD com destaque para os tratamentos 3, 4, 5 e 6 que contém tratamentos com rotação de culturas (médio investimento) e rotação consorciado com braquiária (médio e alto investimento), respectivamente. Esse resultado sugere que nesses tratamentos houve maior incremento de matéria orgânica no solo, alterando a estrutura do solo, que implicou melhoria na capacidade do solo em disponibilizar água para as plantas. Corroborando com os resultados encontrados por Doran e Zeiss (2000), que mostraram a correlação existente entre CO e atributos importantes para a sustentabilidade do solo, como armazenamento e disponibilidade de água.

Verifica-se, também, uma relação positiva entre APD, CAD, Est.C e CO com a Produtividade (Prod) (Figura 2). Esse resultado indica que a Prod pode ter sido maior em função da maior capacidade do solo em disponibilizar água para a planta. No entanto, não

houve correlação significativa entre esses atributos com a Prod (Tabela 6), o que pode ser explicado pelo tempo de apenas duas safras de cultivo após a implantação dos manejos, já que os benefícios oferecidos pelo SPD são melhor observados depois de sua consolidação (Büchi et al., 2017; Rhoton, 2000).

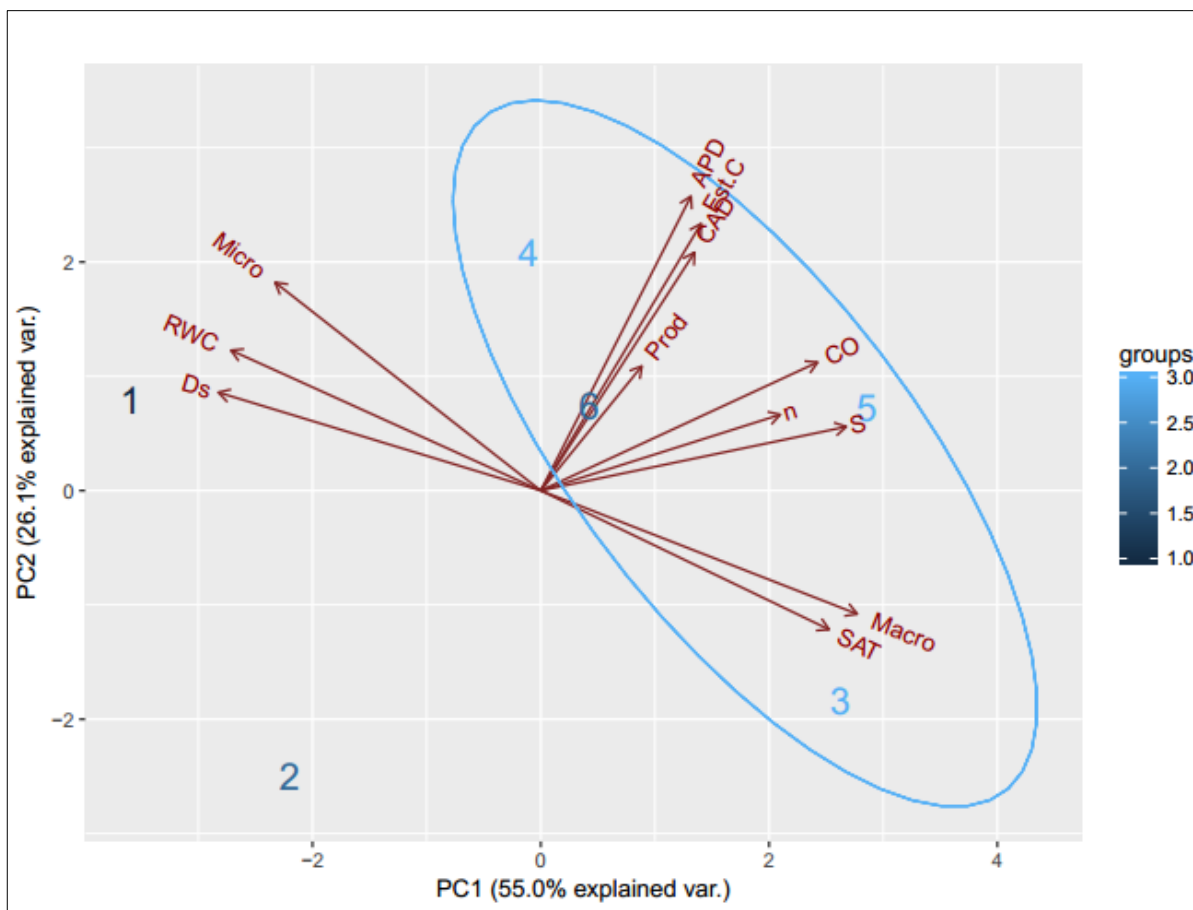


Figura 2: Diagrama de ordenação produzido por análise de componentes principais das variáveis amostradas na profundidade de 0,00-0,05 m. Ds: densidade do solo; Micro: microporosidade do solo; Macro: macroporosidade do solo; RWC: capacidade relativa de água; CAD: capacidade de água disponível no solo; APD: água prontamente disponível; SAT: umidade na saturação; n: parâmetro de ajuste da curva de retenção de água do solo; S: índice S; CO: carbono orgânico; Est.C: estoque de carbono; Prod: produtividade relativa.

Os atributos Micro, Ds e RWC apresentaram correlação positiva e significativa entre si, sendo negativamente correlacionados com os atributos Macro e SAT (Tabela 6). Essa correlação pode ser observada pela disposição dos vetores destes atributos na ACP (Figura 2), assim como a relação existente entre a porosidade do solo com o estoque de carbono e a produtividade. Os tratamentos que apresentaram maiores valores de Macro e SAT se associaram ao grupo com os maiores valores de Est.C, APD, CAD e Prod, indicando melhor qualidade física do solo e condições favoráveis para o crescimento vegetal.

Tabela 6: Coeficiente de correlação de Pearson (r) entre atributos físicos do solo nas camadas de 0 a 0,05 m e 0,15 a 0,20 m.

	Prod.	Est.C	Ds	Micro	Macro	RWC	CAD	APD	SAT	n	S	CO
0-0,05 m												
Prod.	1											
Est.C	0,337	1										
Ds	-0,033	-0,236	1									
Micro	-0,116	0,136	0,887*	1								
Macro	0,042	0,126	-0,991*	-0,924*	1							
RWC	-0,030	-0,090	0,987*	0,941*	-0,999*	1						
CAD	0,094	0,598	-0,319	0,085	0,271	-0,218	1					
APD	0,319	0,863*	-0,211	0,204	0,131	-0,079	0,903*	1				
SAT	-0,152	0,114	-0,977*	-0,877*	0,970*	-0,970*	0,257	0,095	1			
n	0,594	0,265	-0,446	-0,393	0,483	-0,464	0,412	0,416	0,273	1		
S	0,475	0,371	-0,718	-0,583	0,733	-0,710	0,554	0,512	0,574	0,931*	1	
CO	0,289	0,832*	-0,730	-0,424	0,649	-0,624	0,553	0,698	0,625	0,452	0,671	1
0,15-0,20 m												
Prod.	1											
Est.C	-0,479	1										
Ds	-0,377	0,267	1									
Micro	-0,250	0,632	0,836*	1								
Macro	0,336	-0,023	-0,894*	-0,581	1							
RWC	-0,330	0,111	0,933*	0,675	-0,993*	1						
CAD	0,341	0,518	-0,232	0,317	0,432	-0,340	1					
APD	0,504	0,451	-0,282	0,237	0,415	-0,334	0,952*	1				
SAT	0,270	0,332	-0,580	-0,073	0,818	-0,751	0,832*	0,728	1			
n	0,257	-0,225	-0,760	-0,678	0,850*	-0,873*	-0,037	0,001	0,450	1		
S	0,351	0,065	-0,821*	-0,468	0,987*	-0,963*	0,484	0,471	0,844*	0,850*	1	
CO	-0,247	0,843*	-0,288	0,159	0,478	-0,412	0,618	0,596	0,631	0,235	0,532	1

*: Valores significativos a nível de 5% de probabilidade.

Prod.: produtividade relativa; Est.C: estoque de carbono; Ds: densidade do solo; Micro: microporosidade do solo; Macro: macroporosidade do solo; RWC: capacidade relativa de água; CAD: capacidade de água disponível no solo; APD: água prontamente disponível; SAT: umidade na saturação; n: parâmetro de ajuste da curva de retenção de água do solo; S: índice S; CO: carbono orgânico.

Para a profundidade de 0,15-0,20 m, observa-se a mesma tendência para o vetor CO, relacionando-se com CAD e APD, com destaque para os tratamentos 5 e 6, nos quais adotou-se práticas de intensificação de cultivo através da rotação de culturas consorciado com braquiária e rotação de culturas, respectivamente, ambos em nível de alto investimento em adubação (Figura 3). Espera-se que manejos intensificados, que se caracterizam pela associação de práticas de conservação do solo e da água como o SPD ou aqueles que contam com a inclusão de espécies de cobertura vegetal como a braquiária, podem apresentar valores significativamente mais altos de carbono quando comparados à sistemas convencionais de produção (Crusciol et al., 2015; Lovato et al., 2004; Plaza et al., 2013; Serafim et al., 2011).

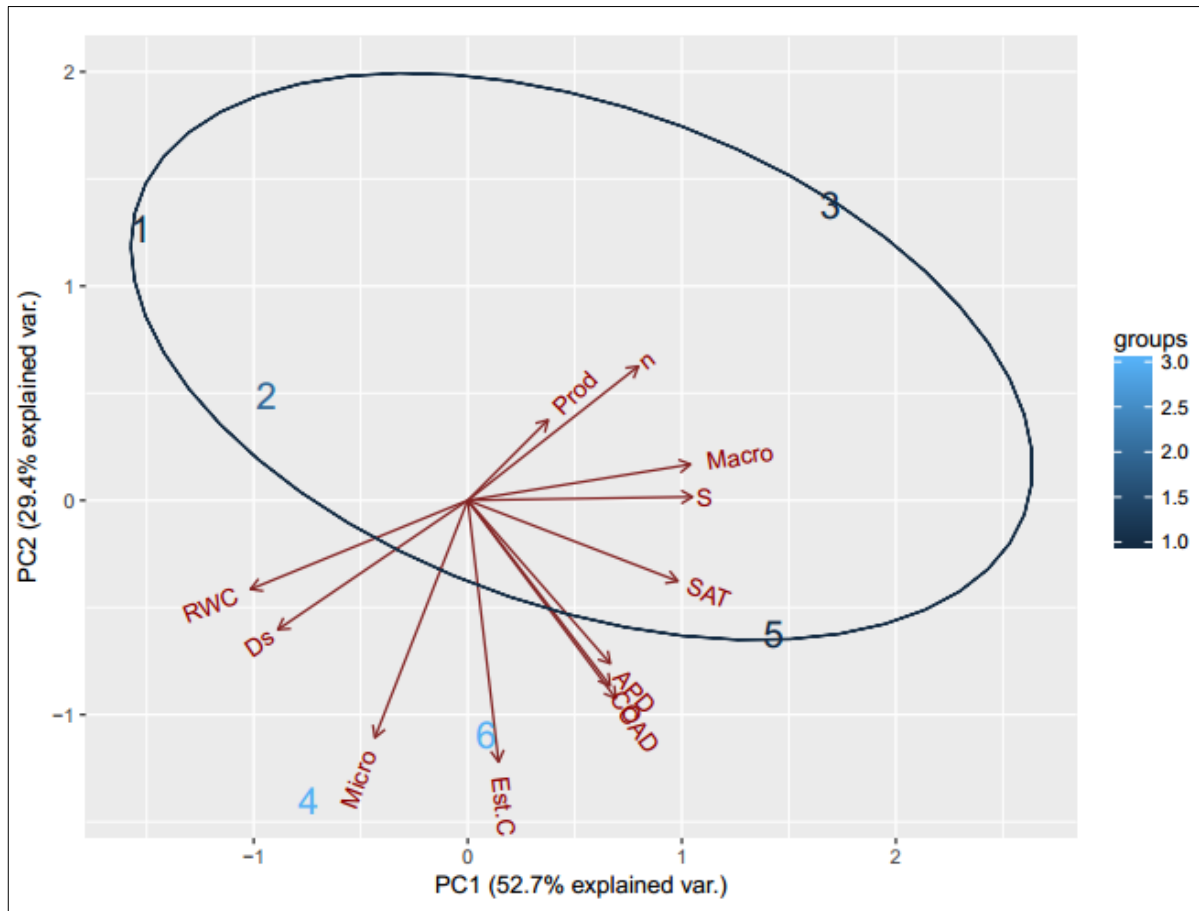


Figura 3: Diagrama de ordenação produzido por análise de componentes principais das variáveis amostradas na profundidade de 0,15-0,20 m. Ds: densidade do solo; Micro: microporosidade do solo; Macro: macroporosidade do solo; RWC: capacidade relativa de água; CAD: capacidade de água disponível no solo; APD: água prontamente disponível; SAT: umidade na saturação; n: parâmetro de ajuste da curva de retenção de água do solo; S: índice S; CO: carbono orgânico; Est.C: estoque de carbono; Prod: produtividade relativa.

Ao analisar os demais atributos físicos na profundidade de 0,15-0,20 m (Figura 3), observa-se relação positiva entre Macro, índice S, porosidade total (SAT) e o parâmetro n, e negativa com Ds e RWC. Esses resultados demonstram a relação existente entre o índice S e os parâmetros que refletem o comportamento dos poros no solo, sendo favorável a Macro e inversa a Ds e RWC, sendo confirmados no resultado da análise de correlação (Tabela 6).

Os vetores Ds e RWC indicam separação dos tratamentos 1 e 2 (monocultivos) dos demais para a profundidade de 0,15-0,20 m (Figura 3), e, do tratamento 1 para 0,00-0,05 m (Figura 2). Em ambas profundidades, os vetores Ds e RWC estão negativamente relacionados com a Prod. Dessa forma, sugere-se que nessas condições pode haver compactação do solo, em acordo com valores dos indicadores físicos abaixo do limite estabelecido indicando degradação da estrutura (Tabela 4), podendo impactar diretamente no rendimento relativo das culturas. Essa compactação observada nos tratamentos 1 e 2, pode ser resultado do histórico de uso da área de cultivos sucessivos que não foi resolvido apenas com as operações de

preparo. Os demais tratamentos em que a intensificação do cultivo foi adotada (3, 4, 5 e 6), apresentaram condições diferentes no que se refere a Ds e RWC.

Considerando a tendência de aumento do vetor Prod, verifica-se que na profundidade 0,15-0,20 m, esse se relaciona negativamente com Ds e RWC, e, positivamente com Macro, índice S e principalmente com o parâmetro n da equação de Van Genuchten (Figura 3). Esses resultados sugerem que o fator aeração se destacou na definição da produtividade das culturas, diferindo do observado para a profundidade de 0,00-0,05 m (Figura 2). Podendo-se inferir favorecimento ao crescimento radicular pela presença de poros grandes e consequente melhor acesso a água e nutrientes armazenados em subsuperfície. Contudo, apesar da tendência apontada (Figura 3), não houve correlação significativa entre produtividade e os atributos estudados em 0,15-0,20 m no tempo avaliado (Tabela 6).

3.3. Agrupamentos entres os manejos avaliados

O dendrograma resultante da análise de agrupamento por níveis de similaridade apresentou a formação de dois grandes grupos para a profundidade de 0,00-0,05 m (Figura 4). O primeiro grupo foi composto pelos tratamentos monocultura de milho em médio investimento (2) e rotação soja-milho em alto investimento (6) e o segundo grupo abrange os demais tratamentos, sendo eles: monocultivo de soja (1), rotação soja-milho em médio investimento (3), rotação soja-milho consorciado com braquiária em médio (4) e alto investimento (5). Porém, o segundo grupo apresentou uma subdivisão onde diferencia o monocultivo de soja dos demais. O subgrupo formado pelos tratamentos rotação soja-milho em médio investimento, rotação soja-milho consorciado com braquiária em médio e alto investimento foi o grupo que apresentou maior similaridade.

Ao associar essas informações com o diagrama de ordenação produzido pela ACP (Figura 2), nota-se que a subdivisão observada no segundo grupo é representada pelos maiores valores de Ds, Micro e RWC observados no tratamento 1 e os tratamentos 3, 4 e 5 foram os tratamentos que apresentaram melhor QFS e consequentemente melhores condições para o crescimento vegetal.

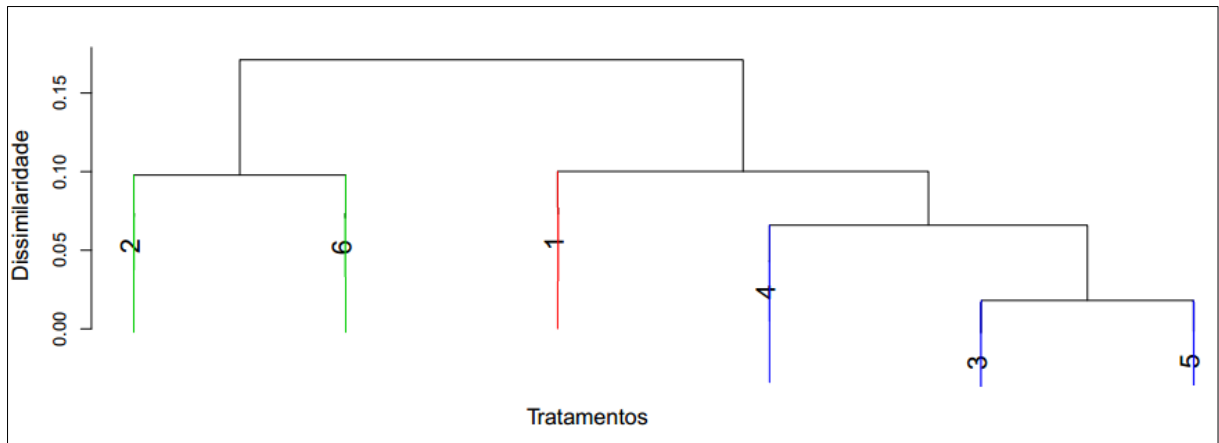


Figura 4: Dendrograma de agrupamento dos tratamentos para a profundidade de 0,00-0,05 m. 1: monocultura de soja; 2: monocultura de milho; 3: rotação soja-milho médio investimento; 4: rotação soja-milho + braquiária médio investimento; 5: rotação soja-milho + braquiária alto investimento; 6: rotação soja-milho alto investimento.

Para a profundidade de 0,15-0,20 m, a análise de agrupamento também ilustra a formação de dois grupos (Figura 5). O primeiro é composto pelos tratamentos de monocultura de soja (1) e rotação soja-milho em médio investimento (3) e consorciado com braquiária em alto investimento (5), ocorrendo uma subdivisão que separa o monocultivo dos demais. O segundo grupo foi formado pelos tratamentos de monocultura de milho (2) e rotação soja-milho em alto investimento (6) e médio investimento com inclusão de braquiária (4), também subdividindo o tratamento que contém monocultivo. Observa-se que para esta profundidade, o tratamento 4 que apresentava melhor QFS na profundidade de 0-0,05 m, passa a apresentar maiores valores de D_s , Micro, RWC juntamente com os tratamentos 6 e 2 (Figura 3), o que pode limitar o crescimento das plantas. No entanto, o tratamento 1 não apresenta mais limitações no que se refere ao aumento da D_s e passa a apresentar melhoria na QFS, diferindo-o num grupo juntamente com os tratamentos 3 e 5. Contudo, ao considerar o tamanho da elipsoide (Figura 3), nota-se que há grande variabilidade entre os dados, evidenciando a diferença encontrada entre o monocultivo (1) e os tratamentos intensificados pela rotação (3) e consórcio da braquiária em alto investimento (5).

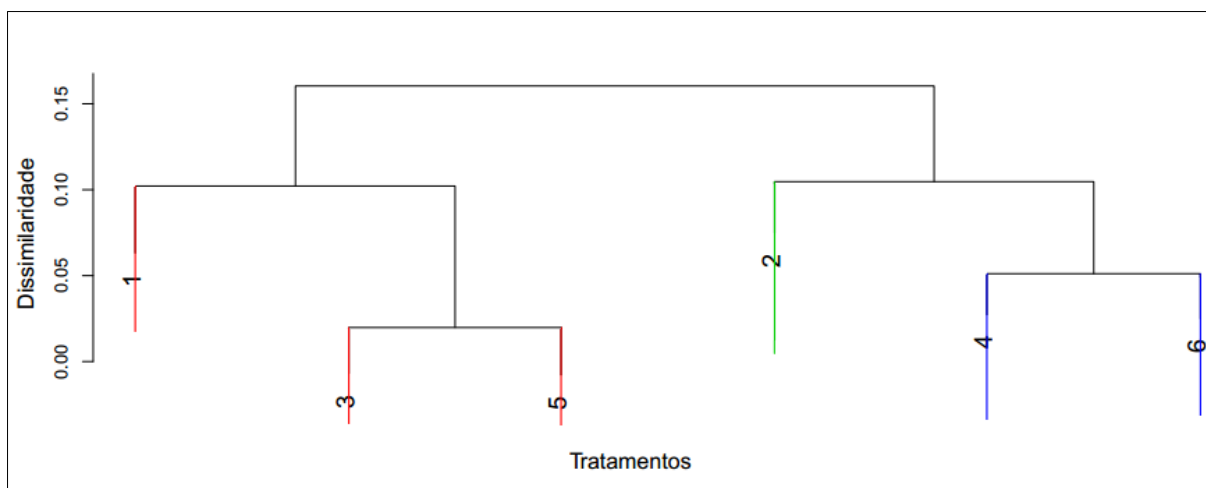


Figura 5: Dendrograma de agrupamento dos tratamentos para a profundidade de 0,15-0,20 m. 1: monocultura de soja; 2: monocultura de milho; 3: rotação soja-milho médio investimento; 4: rotação soja-milho + braquiária médio investimento; 5: rotação soja-milho + braquiária alto investimento; 6: rotação soja-milho alto investimento.

Essa diferença entre o tratamento 1 com o 3 e o 5, pode ser explicada pelos benefícios oferecidos pela rotação de culturas, que além de favorecer a formação de canais contínuos ao longo do perfil do solo, possibilitando o crescimento radicular, também permitem um maior acúmulo de carbono nas camadas superficiais (Tormena et al., 2004). Os benefícios podem ser ainda maiores com o cultivo intercalar de espécies que possuem sistema radicular extensos e vigorosos, capazes de romper as camadas mais adensadas e promover a reestruturação do solo (Olibone et al., 2010), além de apresentarem maior tolerância ao déficit hídrico do Cerrado, produzindo quantidade expressiva de matéria seca, o que permite uma melhor cobertura do solo garantindo a sustentabilidade do SPD (Borghetti et al., 2013, 2007; Calonego et al., 2017; Crusciol et al., 2012). Estudos mostram que a introdução de espécies de capins perenes como cultivo intercalar na produção de grãos apresentam melhoria da fertilidade química (Crusciol et al., 2015) e da QFS, tanto em superfície quanto em maiores profundidades (Andrade et al., 2009; Calonego et al., 2011) e consequente aumento de produtividade para a cultura do milho e da soja (Balbinot et al., 2017; Crusciol et al., 2015; Pariz et al., 2017).

Salienta-se, que em ambas as profundidades avaliadas, os tratamentos 3 e 5 mostraram-se agrupados com maior nível de similaridade e destacados dos demais (Figuras 4 e 5). Nesses tratamentos, os indicadores de QFS associados a capacidade de disponibilizar ar (Macro) e água (CAD e APD) juntamente com o equilíbrio na distribuição dos poros (RWC e índice S) foram importantes na distinção desses manejos (Figuras 2 e 3), apontando quais fatores físicos foram melhorados, e, assim, tendência de melhoria da QFS com o manejo conservacionista.

Calonego et al. (2017) verificaram em um solo muito argiloso e compactado que as culturas de cobertura apresentaram melhoria na estrutura do solo a médio e longo prazo, com resultados iguais ou superiores ao do escarificador, principalmente para maiores profundidades, além de atingirem maiores produtividades após dois anos de experimento, confirmando a eficiência do emprego de sistemas intensificados de produção.

Considerando as restrições hídricas da região do Cerrado, que dificultam o adequado estabelecimento do SPD, os resultados apresentados têm importante alcance no estudo de técnicas de manejo para mitigar o estresse hídrico nas plantas, sobretudo em solos compactados. A alteração na porosidade do solo pela adoção de práticas de manejo e conservação do solo continuamente condiciona a formação de poros contínuos resultantes das raízes das plantas e da atividade da macrofauna (“bioporos”), que são preservados pela ausência de revolvimento do solo, tornando-se importantes rotas alternativas para o crescimento radicular das culturas (Huang et al., 2015; Papadopoulos et al., 2014; Tormena et al., 2017). Essa condição contribui para mitigar a compactação do solo, que tem refletido na produtividade das culturas e na manutenção de serviços ambientais (Mentges et al., 2016; Müller et al., 2001), como recarga de água, condições adequadas para organismos e controle de processos erosivos.

4. Conclusões

Os sistemas de manejo intensificados, de forma geral, mostraram melhor QFS em relação aos monocultivos de soja e milho ao analisar níveis críticos dos indicadores individualmente. Essas alterações ocorrem a curto prazo, após a segunda safra de verão, decorrida sua implantação.

A intensificação de manejo favoreceu o aumento do estoque de carbono orgânico no solo, que se relacionou com alterações na porosidade do solo, sobretudo na capacidade do solo em disponibilizar água para a planta.

As operações de preparo do solo não foram suficientes para remover o histórico de vinte anos de manejo intensivo da área.

No perfil do solo avaliado houveram diferenças quanto aos fatores físicos mais importantes para o crescimento vegetal, com destaque para os indicadores associados a maior disponibilidade de água para as plantas na profundidade de 0,00-0,05 m e maior aeração do solo para a profundidade de 0,15-0,20 m.

A produtividade de grãos não apresentou correlação significativa com nenhum dos atributos estudados, no período de dois anos de experimento.

Comparando as práticas de manejo para intensificação de cultivo adotados, o sistema de produção com rotação de culturas (soja e milho), consórcio com *Urochloa ruziziensis* e alto investimento em fertilização não diferiram do sistema em que foi adotada somente a rotação com médio investimento em adubação.

5. Referências

- Albuquerque, J.A., Reinert, D.J., Fiorin, J.E., Ruedell, J., Petrere, C., Fontinelli, F., 1995. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 19.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, paper 56. ed. FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.12.001>
- Andrade, R.D.S., Stone, L.F., 2009. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 13, 382–388. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000400003>
- Andrade, R.S., Stone, L.F., Silveira, P.M., da Andrade, R.S., da Silveira, P.M., 2009. Culturas de cobertura e qualidade física de um Latossolo em plantio direto Cover crops and physical quality of a Latosol under no-tillage. *Rev. Bras. Eng. Agric. e Ambient.* 13, 411–418. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000400007>
- Aziz, I., Mahmood, T., Islam, K.R., 2013. Effect of long term no-till and conventional tillage practices on soil quality. *Soil Tillage Res.* 131, 28–35. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.03.002>
- Balbinot, A.A., Dos Santos, J.C.F., Debiassi, H., Yokoyama, A.H., 2017. Contribution of roots and shoots of Brachiaria species to soybean performance in succession. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 52, 592–598. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000800004>
- Balesdent, J., Chenu, C., Balabane, M., 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil Tillage Res.* 53, 215–230. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00107-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00107-5)
- Bamberg, A.L., Cornelis, W.M., Timm, L.C., Gabriels, D., Pauletto, E.A., Pinto, L.F.S., 2011. Temporal changes of soil physical and hydraulic properties in strawberry fields. *Soil Use Manag.* 27, no--no. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00355.x>
- Bengough, A.G., McKenzie, B.M., Hallett, P.D., Valentine, T.A., 2011. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *J. Exp. Bot.* 62, 59–68. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq350>
- Borghi, É., Crusciol, C.A.C., Nascente, A.S., Mateus, G.P., Martins, P.O., Costa, C., 2012. Effects of row spacing and intercrop on maize grain yield and forage production of palisade grass. *Crop Pasture Sci.* 63, 1106–1113. <https://doi.org/10.1071/CP12344>
- Borghi, E., Crusciol, C.A.C., Nascente, A.S., Sousa, V. V., Martins, P.O., Mateus, G.P., Costa, C., 2013. Sorghum grain yield, forage biomass production and revenue as affected by intercropping time. *Eur. J. Agron.* 51, 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.08.006>
- Borghi, É., Mobaricci, C., Pulz, A.L., Orika, E., Alexandre, C., Crusciol, C., 2007. Crescimento de Brachiaria brizantha em cultivo consorciado com milho em sistema de plantio direto. *Acta Sci. Agron.* 29, 91–98.

- Bragagnolo, N., Mielniczuk, J., 1990. Cobertura do solo por palha de trigo e seu relacionamento com a temperatura e umidade do solo. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 14, 369–374.
- Büchi, L., Wendling, M., Amossé, C., Jeangros, B., Sinaj, S., Charles, R., 2017. Long and short term changes in crop yield and soil properties induced by the reduction of soil tillage in a long term experiment in Switzerland. *Soil Tillage Res.* 174, 120–129. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.002>
- Calonego, J.C., Borghi, E., Crusciol, C.A.C., 2011. Intervalo hídrico ótimo e compactação do solo com cultivo consorciado de milho e Braquiária. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 35, 2183–2190. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600033>
- Calonego, J.C., Gil, F.C., Rocco, V.F., dos Santos, E.A., Augustinho, E., 2012. Persistence and nutrient release from maize, brachiaria and lablab straw. *Biosci. J.* 28, 770–781.
- Calonego, J.C., Raphael, J.P.A., Rigon, J.P.G., Oliveira Neto, L. de, Rosolem, C.A., 2017. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. *Eur. J. Agron.* 85, 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.02.001>
- Campos-Herrera, R., Gómez-Ros, J.M., Escuer, M., Cuadra, L., Barrios, L., Gutiérrez, C., 2008. Diversity, occurrence, and life characteristics of natural entomopathogenic nematode populations from La Rioja (Northern Spain) under different agricultural management and their relationships with soil factors. *Soil Biol. Biochem.* 40, 1474–1484. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.01.002>
- Carlesso, R., 1995. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. *Ciência Rural.* <https://doi.org/10.1590/S0103-84781995000100035>
- Cecagno, D., de Andrade Costa, S.E.V.G., Anghinoni, I., Kunrath, T.R., Martins, A.P., Reichert, J.M., Gubiani, P.I., Balerini, F., Fink, J.R., de Faccio Carvalho, P.C., 2016. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. *Soil Tillage Res.* 156, 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.10.005>
- Chen, G., Weil, R.R., Hill, R.L., 2014. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. *Soil Tillage Res.* 136, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.09.004>
- Conceição, P.C., Amado, T.J.C., Mielniczuk, J., Spagnollo, E., 2005. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 29, 777–788.
- Coote, D.R., Malcolm-McGovern, C.A., 1989. Effects of conventional and no-till corn grown in rotation on three soils in Eastern Ontario. *Soil Tillage Res.* 14, 67–84.
- Crusciol, C.A.C., Mateus, G.P., Nascente, A.S., Martins, P.O., Borghi, E., Pariz, C.M., 2012. An innovative crop-forage intercrop system: Early cycle soybean cultivars and palisadegrass. *Agron. J.* 104, 1085–1095. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0002>
- Crusciol, C.A.C., Mateus, G.P., Pariz, C.M., Borghi, E., Costa, C., da Silveira, J.P.F., 2011. Nutrition and yield behavior of sorghum hybrids with contrasting cycles intercropped with marandu grass. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 46. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000017>
- Crusciol, C.A.C., Nascente, A.S., Borghi, E., Soratto, R.P., Martins, P.O., 2015. Improving soil fertility and crop yield in a tropical region with palisadegrass cover crops. *Agron. J.* 107, 2271–2280. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0603>
- Dalla Nora, D., 2017. Melhoria dos atributos químicos da camada de enraizamento e seu efeito sobre a produtividade das culturas em sistema plantio direto. Universidade Federal de Santa Maria.
- Dalmago, G. a., Bergamaschi, H., Bergonci, J.I., Krüger, C. a. M.B., Comiran, F., Heckler,

- B.M.M., 2009. Retenção e disponibilidade de água às plantas, em solo sob plantio direto e preparo convencional. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 13, 855–864. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000700007>
- Derpsch, R., Friedrich, T., Kassam, A., Hongwen, L., 2010. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 3, 1–25. <https://doi.org/10.3965/j.issn.1934-6344.2010.01.001-025>
- Dexter, a R., 2004. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic mailer, and effects on root growth. *Geoderma* 120, 201–214. <https://doi.org/10.1016/j.geodermaa.2003.09.005>
- Donagemma, G.K., Campos, D.V.B. de, Calderano, S.B., Teixeira, W.G., Viana, J.H.M., 2011. Manual de métodos de análise de solo, 2. ed. rev. ed, Embrapa Solos. Documentos, 132, Rio de Janeiro.
- Embrapa, E.B.D.P.A., 2013. Sistema brasileiro de classificação de solos, 3 ed. ed, Rio de Janeiro: Embrapa Solos. [https://doi.org/ISBN 978-85-7035-198-2](https://doi.org/ISBN%20978-85-7035-198-2)
- Ferreira, M.M., Fernandes, B., Curi, N., 1999. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 23, 507–514. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000100004>
- Flávio Neto, J., Severiano, E.D.C., Costa, K.A. de P., Guimarães Junnyor, W.S., Gonçalves, W.G., Andrade, R., 2015. Biological soil loosening by grasses from genus *Brachiaria* in crop-livestock integration. *Acta Sci. Agron.* 37, 375. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v37i3.19392>
- Gregorich, E.G., Carter, M.R., Angers, D. a, Monreal, C.M., Ellert, B.H., 1994. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Can. J. Soil Sci.* 74, 367–385.
- Grohmann, F., 1960. Distribuição tamanho de poros em três tipos de solos do estado de São Paulo. *Bragantia - Bol. Técnico do Inst. Agron. do Estado São Paulo.*
- Guimarães Júnnyor, W. da S., Severiano, E. da C., Da Silva, A.G., Gonçalves, W.G., Andrade, R., Martins, B.R.R., Custódio, G.D., 2015. Desempenho do sorgo sacarino em função da compactação do solo e época de semeadura em safrinha no cerrado brasileiro. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 39, 1744–1754. <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20150121>
- Huang, M., Liang, T., Wang, L., Zhou, C., 2015. Effects of no-tillage systems on soil physical properties and carbon sequestration under long-term wheat-maize double cropping system. *Catena* 128, 195–202. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.02.010>
- Jackson, M.L., 1958. Soil chemical analysis. New York Prentice Hall 498.
- Klein, V.A., Libardi, P.L., 2002. Densidade e distribuicao do diametro dos poros de um latossolo vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 26, 857–867. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000400003>
- Klute, A., 1986. Water retention: laboratory methods I, in: *Methods of Soil Analysis. Part 1. —Physical and Mineralogical Methods.* SSSA Book Series, pp. 635–662. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c26>
- Kunz, M., Gonçalves, A.D.M. de A., Reichert, J.M., Guimarães, R.M.L., Reinert, D.J., Rodrigues, M.F., 2013. Compactação do solo na integração soja-pecuária de leite em Latossolo argiloso com semeadura direta e escarificação. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 37, 1699–1708. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000600026>
- Linn, D.M., Doran, J.W., 1984. Effect of Water-Filled Pore Space on Carbon Dioxide and Nitrous Oxide Production in Tilled and Nontilled Soils1. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48, 1267. <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800060013x>
- Lopes, A.S., Cox, F.R., 1977. A Survey of the Fertility Status of Surface Soils Under “Cerrado” Vegetation in Brazil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41, 742–747.

- <https://doi.org/10.2136/sssaj1977.03615995004100040026x>
- Lovato, T., Mielniczuk, J., Bayer, C., Vezzani, F., 2004. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 28, 175–187. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000100017>
- Mantovani, E.C., 1984. A soil surface traffic - corn yield model for a soil under Cerrado vegetation in Brazil with less than 10 years of cultivation. Purdue University.
- McCulley, R.L., Jobbágy, E.G., Pockman, W.T., Jackson, R.B., 2004. Nutrient uptake as a contributing explanation for deep rooting in arid and semi-arid ecosystems. *Oecologia* 141, 620–628. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1687-z>
- Mentges, M.I., Reichert, J.M., Rodrigues, M.F., Awe, G.O., Mentges, L.R., 2016. Capacity and intensity soil aeration properties affected by granulometry, moisture, and structure in no-tillage soils. *Geoderma* 263, 47–59. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.042>
- Mishra, A.K., Aggarwal, P., Bhattacharyya, R., Das, T.K., Sharma, A.R., Singh, R., 2015. Least limiting water range for two conservation agriculture cropping systems in India. *Soil Tillage Res.* 150, 43–56. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.01.003>
- Müller, M.M.L., Ceccon, G., Rosolem, C.A., 2001. Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e radicular de plantas de adubação verde de inverno. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 25, 531–538. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000300002>
- Olibone, D., Encide-Olibone, A.P., Rosolem, C.A., 2010. Least limiting water range and crop yields as affected by crop rotations and tillage. *Soil Use Manag.* 26, 485–493. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00301.x>
- Oliveira, G.C., Dias, M.S., Resck, D.V.S., Curi, N., 2004. Caracterização química e físico-hídrica de um latossolo vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 28, 327–336. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000200011>
- Papadopoulos, A., Bird, N.R.A., Whitmore, A.P., Mooney, S.J., 2014. Does organic management lead to enhanced soil physical quality? *Geoderma* 213, 435–443. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.033>
- Pariz, C.M., Costa, C., Crusciol, C.A.C., Meirelles, P.R.L., Castilhos, A.M., Andreotti, M., Costa, N.R., Martello, J.M., Souza, D.M., Protes, V.M., Longhini, V.Z., Franzluebbbers, A.J., 2017. Production, nutrient cycling and soil compaction to grazing of grass companion cropping with corn and soybean. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 108, 35–54. <https://doi.org/10.1007/s10705-016-9821-y>
- Pariz, C.M., Costa, C., Crusciol, C.A.C., Meirelles, P.R.L., Castilhos, A.M., Andreotti, M., Costa, N.R., Martello, J.M., Souza, D.M., Sarto, J.R.W., Franzluebbbers, A.J., 2016. Production and soil responses to intercropping of forage grasses with corn and soybean silage. *Agron. J.* 108, 2541–2553. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.02.0082>
- Pittelkow, C.M., Linqvist, B.A., Lundy, M.E., Liang, X., van Groenigen, K.J., Lee, J., van Gestel, N., Six, J., Venterea, R.T., van Kessel, C., 2015. When does no-till yield more? A global meta-analysis. *F. Crop. Res.* 183, 156–168. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.07.020>
- Plaza, C., Courtier-Murias, D., Fernández, J.M., Polo, A., Simpson, A.J., 2013. Physical, chemical, and biochemical mechanisms of soil organic matter stabilization under conservation tillage systems: A central role for microbes and microbial by-products in C sequestration. *Soil Biol. Biochem.* 57, 124–134. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.07.026>
- R Development Core Team, 2011. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria R Found. Stat. Comput. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74686-7>

- Raij, B. van, 2008. Gesso na agricultura, Campinas: Instituto Agronômico.
- Raij, B. van, 1969. A capacidade de troca de cátions das frações orgânica e mineral em solo. *Bragantia* 28, 85–112. <https://doi.org/10.1590/S0006-87051969000100008>
- Ranzani, G., 1971. Solos de cerrado no Brasil, in: SIMPOSIO SOBRE O CERRADO. Embrapa Cerrados, São Paulo, pp. 26–43.
- Reichardt, R., Timm, L.C., 2004. Solo Planta Atmosfera: conceitos, processos e aplicações, Solo Planta Atmosfera: conceitos, processos e aplicações. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Reichert, J.M., Albuquerque, J.A., Gubiani, P.I., Kaiser, D.R., Minella, J.P.G., Reinert, D.J., 2011. Hidrologia do solo, disponibilidade de água às plantas e zoneamento agroclimático. *Tópicos em ciência do solo* 1–54.
- Reichert, J.M., Suzuki, L.E.A.S., Reinert, D.J., Horn, R., Håkansson, I., 2009. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Tillage Res.* 102, 242–254. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002>
- Resende, A.V. de, Silva, A.F. da, Borghi, E., Gontijo Neto, M.M., Shiratsuchi, L.S., Pitta, R.M., Ferreira, A., 2016. Tomada de decisão quanto a adubação e manejo de nutrientes por agricultores do Mato Grosso: dados do Circuito Tecnológico 2015, in: Documentos, 203. Embrapa Milho e Sorgo (CNPMS), Sete Lagoas, MG, p. 30.
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Tan, C.S., Fox, C. a., Yang, X.M., 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma* 152, 252–263. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009>
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Yang, X.M., Tan, C.S., 2008. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma* 146, 466–474. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.06.017>
- Rhoton, F.E., 2000. Influence of Time on Soil Response to No-Till Practices. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 700–709. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642700x>
- Safadoust, A., Feizee, P., Mahboubi, A.A., Gharabaghi, B., Mosaddeghi, M.R., Ahrens, B., 2014. Least limiting water range as affected by soil texture and cropping system. *Agric. Water Manag.* 136, 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.01.007>
- Secco, D., Reinert, D.J., Reichert, J.M., Silva, V.R. Da, 2009. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. *Ciência Rural* 39, 58–64. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782009000100010>
- Serafim, M.E., de Oliveira, G.C., de Oliveira, A.S., de Lima, J.M., Guimarães, P.T.G., Costa, J.C., 2011. Intensive coffee cultivation management in the Physiographic Region of the upper San Francisco river, MG: A case study . *Sist. Conserv. e manejo intensivo do solo no Cultiv. Cafe. na região do alto São Fr. MG Um Estud. caso* 27, 964–977.
- Serafim, M.E., Oliveira, G.C. De, Lima, J.M. De, Silva, B.M., Zeviani, W.M., Lima, V.M.P., 2013. Disponibilidade hídrica e distinção de ambientes para cultivo de cafeeiros. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 17, 362–370. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000400002>
- Silva, B.M., da Silva, E.A., de Oliveira, G.C., Ferreira, M.M., Serafim, M.E., 2014. Plant-Available Soil Water Capacity: Estimation Methods and Implications. *Rev. Bras. Cienc. Do Solo* 38, 464–475. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200011>
- Silva, B.M., Oliveira, G.C., Serafim, M.E., Silva, É.A., Ferreira, M.M., Norton, L.D., Curi, N., 2015. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic latosol as affected by soil management. *Soil Tillage Res.* 154, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.06.013>
- Silva, B.M., Santos, W.J.R., Oliveira, G.C., Lima, J.M., Curi, N., Marques, J.J., 2015. Soil moisture space-time analysis to support improved crop management. *Cienc. e*

- Agrotecnologia 39, 39–47.
- Silva, B.M., Silva, É.A., Oliveira, G.C., Ferreira, M.M., Serafim, M.E., 2014. Plant-Available Soil Water Capacity: Estimation Methods and Implications. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 38, 464–475. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200011>
- Silva, M.B., Kliemann, H.J., Da Silveira, P.M., Lanna, A.C., 2007. Atributos biológicos do solo sob influência da cobertura vegetal e do sistema de manejo. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 42, 1755–1761. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007001200013>
- Skopp, J., Jawson, M.D., Doran, J.W., 1990. Steady-State Aerobic Microbial Activity as a Function of Soil Water Content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54, 1619. <https://doi.org/10.2136/sssaj1990.03615995005400060018x>
- Sousa, D.D., Lobato, E., 2004. Cerrado: correção do solo e adubação. Planaltina: Embrapa Cerrados.
- Spera, S.T., Santos, H.P. dos, Fontaneli, R.S., Tomm, G.O., 2006. Efeito de pastagens de inverno e de verão em características físicas de solo sob plantio direto. *Ciência Rural* 36, 1193–1200.
- Staff, S.S., 1999. Soil Taxonomy - A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys, *Geological Magazine.* <https://doi.org/10.1017/S0016756800045489>
- Stone, L.F., Da Silveira, P.M., Alves Moreira, J.A., Pereira Braz, A.J.B., Marques, P., Aloísio, J., Moreira, A., 2006. Evapotranspiration of irrigated common bean under no-tillage on different cover crop mulches. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 41, 577–582. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000400005>
- Stone, L.F., Moreira, J.A.A., 2000. Effects of soil tillage systems on the water use and on common bean yield. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 35, 835–841. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2000000400022>
- Stone, L.F., Silveira, P.M., 2001. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 25, 395–401. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000200015>
- Suzuki, L.E.A.S., 2005. Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas do solo e crescimento e rendimento de culturas. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA.
- Tormena, C.A., Da Silva, A.P., Libardi, P.L., 1999. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. *Soil Tillage Res.* 52, 223–232. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00086-0](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00086-0)
- Tormena, C.A., Friedrich, R., Pintro, J.C., Costa, A.C.S., Fidalski, J., 2004. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num latossolo vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 28, 1023–1031. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000600011>
- Tormena, C.A., Karlen, D.L., Logsdon, S., Cherubin, M.R., 2017. Corn stover harvest and tillage impacts on near-surface soil physical quality. *Soil Tillage Res.* 166, 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.09.015>
- Tormena, C.A., Silva, A.P., Libardi, P.L., 1998. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 22, 573–581. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000400002>
- Trevisan, R.G., Freddi, O. da S., Wruck, F.J., Tavanti, R.R., Peres, F.S.C., 2017. Variabilidade de atributos físicos do solo e do arroz cultivado sob plantas de cobertura em sistema de integração lavoura-pecuária. *Bragantia* 76, 145–154. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.596>
- Van Genuchten, M.T., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*

<https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
van Genuchten, M.T., Leij, F.J., Yates, S.R., 1991. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. United States Environ. Reseach Lab. 93.
<https://doi.org/10.1002/9781118616871>

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sistemas de manejo intensificados proporcionaram melhoria na qualidade física do solo (QFS) quando comparados a sistemas de monocultivo, mesmo a curto prazo, na fase de implantação do sistema plantio direto (SPD). Dentre as melhorias apresentadas, destacam-se o aporte de carbono no solo e atributos relacionados a configuração dos poros no solo, podendo afetar diretamente na disponibilidade de água para as plantas e mitigar efeitos prejudiciais promovidos pela distribuição pluviométrica irregular, comum da região.

Foi possível observar efeito residual dos manejos anteriores na área estudada, já que as práticas de manejo de sistemas intensificados adotadas não se diferiram uma da outra. Esse resultado é importante para o entendimento das práticas de preparo do solo mais adequadas para áreas onde houveram cultivo intenso e estão localizadas em regiões com condições climáticas limitantes.

Não houve relação significativa entre os atributos avaliados e a produtividade das culturas. No entanto, pode ser observado uma tendência de possível aumento na produtividade de grãos com os indicadores associados a maior disponibilidade de água para as plantas, na profundidade de 0,00-0,05 m e maior aeração do solo na profundidade de 0,15-0,20 m. A não significância observada pode estar relacionada ao fato dos benefícios oferecidos pelo SPD serem mais determinantes depois de sua consolidação, o que aponta um possível aumento de produtividade no futuro.

Esses resultados, se mostram importantes para regiões similares ao estudo, onde as condições climáticas não possibilitam o cultivo de mais de uma safra por ano agrícola, e por sua vez, dificultam a manutenção da palhada comprometendo o sucesso do SPD. Uma vez que comprova que o desenvolvimento de sistemas de produção mais resilientes frente aos estresses bióticos e abióticos derivados das limitações climáticas regionais, conferem melhoria na QFS podendo assim assegurar a conservação da qualidade de bens compartilhados do meio ambiente, em especial a água, e com isso, garantir a sustentabilidade nos sistemas agrícolas.