

VENÂNCIO RODRIGUES E SILVA

ATRIBUTOS FÍSICOS E RELAÇÕES COM MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO  
SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO NA REGIÃO DO CERRADO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia – Mestrado, na área de concentração em Solos, para obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Prof. Dr. José Luiz Rodrigues Torres

UBERLÂNDIA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2019

VENÂNCIO RODRIGUES E SILVA

ATRIBUTOS FÍSICOS E RELAÇÕES COM MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO  
SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO NA REGIÃO DO CERRADO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia – Mestrado, na área de concentração em Solos, para obtenção do título de “Mestre”.

APROVADO em 13 de dezembro de 2019.

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Adriane de Andrade Silva

UFU Campus Monte Carmelo

Prof. Dr. Reginaldo de Camargo

UFU

Prof. Dr. Ernane Miranda Lemes

Empresa Monitora Consultoria

Prof. Dr. José Luiz Rodrigues Torres  
IFTM – UFU  
(Orientador)

UBERLÂNDIA  
MINAS GERAIS-BRASIL  
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

S586a Silva, Venâncio Rodrigues e, 1994-  
2020 Atributos físicos e relações com matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo na região do cerrado [recurso eletrônico] / Venâncio Rodrigues e Silva. - 2019.

Orientador: José Luiz Rodrigues Torres.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Agronomia.  
Modo de acesso: Internet.  
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.3611>  
Inclui bibliografia.  
Inclui ilustrações.

1. Agronomia. I. Torres, José Luiz Rodrigues, 1965-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. III. Título.

CDU: 631

---

Nelson Marcos Ferreira - CRB-6/3074

## AGRADECIMENTOS

Incialmente agradeço a Deus, por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades e os momentos difíceis.

Aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional durante essa trajetória.

Aos meus amigos envolvidos direta e indiretamente nesta conquista, em especial ao Danylo Denner de Almeida Costa, pois juntos superamos as dificuldades e os obstáculos encontrados no caminho.

A Mércia da Silva Mesquita, minha companheira que esteve o tempo ao meu lado me incentivando.

Guardo um agradecimento especial ao meu orientador Prof. Dr. José Luiz Rodrigues Torres, que me aceitou como voluntário em seus projetos durante o curso Técnico Agrícola, depois como bolsista de Iniciação Científica durante a graduação em Engenharia Agronômica no Instituto Federal do Triângulo Mineiro Campus Uberaba, depois como orientado no mestrado na Universidade Federal de Uberlândia, onde dei continuidade aos estudos, aperfeiçoei meus conhecimentos e adquiri experiência, que vem sendo fundamentais para minha formação pessoal, acadêmica e profissional.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, especialmente nas pessoas dos Prof. Dr. Marcos Gervásio Pereira e a Doutoranda Shirlei Almeida Assunção, que foram parceiros fundamentais na elaboração deste trabalho, que não mediram esforços para auxiliar nas atividades realizadas no Laboratório de Pedogênese da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

À Universidade Federal de Uberlândia, seu corpo docente, direção e administração, em especial ao Programa de Pós-graduação em Agronomia do Instituto de Ciências Agrárias (PPGA/ICIAG), que com toda a estrutura me permitiu alcançar o título de Mestre em Agronomia, que oportunizaram vislumbrar um horizonte superior.

Por fim, meu agradecimento à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo amparo financeiro à pesquisa, através da concessão da bolsa de estudo.

A todos, meu muito obrigado!

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>ii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>3</b>
2.1 A evolução dos sistemas de manejo e os atributos do solo.....	3
2.2 Atributos físicos do solo .....	4
2.2.1 Densidade do solo, macro e microporosidade e porosidade total .....	5
2.2.2 Umidade gravimétrica.....	8
2.2.3 Agregação .....	9
2.2.3.1 Índices de agregação .....	10
2.3 Matéria orgânica .....	11
2.3.1 O teor de matéria orgânica e a estrutura do solo.....	11
2.3.2 Estoque de carbono do solo.....	12
2.3.3 Fracionamento granulométrico da matéria orgânica.....	13
2.3.4 Fracionamento químico da matéria orgânica .....	14
2.3.5 Matéria orgânica leve.....	15
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	16
3.1 Caracterização da área experimental .....	16
3.2 Clima da região .....	17
3.3 Tipo de solo .....	18
3.4 Delineamento experimental .....	18
3.5 Manejo e adubação .....	19
3.6 Avaliações.....	19
3.6.1 Umidade do solo e resistência do solo a penetração das raízes. ....	19
3.6.2 Densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e porosidade total. ....	19
3.6.3 Agregação do solo .....	20
3.6.4 Carbono orgânico total.....	21
3.6.5 Estoque de carbono no solo .....	22
3.6.6 Matéria orgânica do solo.....	22
3.6.7 Matéria orgânica leve.....	22
3.6.8 Fracionamento granulométrico da matéria orgânica do solo: COp e COam .....	23
3.6.9 Fracionamento químico da matéria orgânica do solo .....	23
3.7 Análise estatística .....	24
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>25</b>

4.1 Resistência do solo a penetração das raízes, densidade e umidade .....	25
4.2 Macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo.....	27
4.3 Estabilidade dos agregados.....	30
5. CONCLUSÕES .....	44
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	45

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Histórico, descrição e localização das áreas de estudo .....	17
TABELA 2. Resistência à penetração das raízes (RP), densidade do solo (Ds) e umidade volumétrica (Uv) nos sistemas de manejo estudados, no ano de 2017, Uberaba, MG. ....	25
TABELA 3. Macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (PT) nos sistemas de manejo estudados, no ano de 2017, em Uberaba, MG. ....	27
TABELA 4. Relação entre macroporosidade (Ma) e porosidade total (PT) nas áreas sob diferentes sistemas de manejo e profundidades, no ano de 2017, em Uberaba-MG. ....	30
TABELA 5. Diâmetro médio ponderado (DMP) e Diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade dos agregados (IEA) nas áreas sob diferentes sistemas de manejo e profundidades, em Uberaba-MG, no ano de 2017. ....	31
TABELA 6. Índice de sensibilidade (Is) (valores médios), comparando o sistema de manejo convencional há 20 anos (SPC20), sistema de plantio direto há 5 anos (SPD5) e a 17 anos SPD17), com a mata nativa (MN) em Uberaba-MG, no ano de 2017. ....	33
TABELA 7. Coeficientes de correlações de Pearson entre os atributos físicos avaliados nas áreas sob diferentes sistemas de manejo e profundidades, em Uberaba-MG. ....	34
TABELA 8. Teores de carbono orgânico total (COT), densidade do solo (DS) e estoque de carbono (EstC) no solo das áreas com diferentes sistemas de manejo, Uberaba, MG.....	36
TABELA 9. Teores de Carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COp); carbono orgânico associado aos minerais (COam) e matéria orgânica leve (MOL) em água nas áreas com diferentes sistemas de manejo, em Uberaba, MG.....	38
TABELA 10. Carbono da fração humina (C-HUM), carbono da fração ácido húmico (C-FAH), carbono da fração ácido fúlvico (C-FAF), relação entre C-FAH e C-FAF (C-FAH/FAF) das frações húmicas da matéria orgânica do solo sob diferentes manejos e profundidades.....	41

## **LISTA DE FIGURAS**

FIGURA 1. Áreas estudadas com seus respectivos perímetros demarcadas. ....	17
FIGURA 2. Variáveis climáticas obtidas junto ao Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa do INMET (2018) .....	18

## RESUMO

SILVA, VENÂNCIO RODRIGUES E. **Atributos físicos e relações com matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo na região do cerrado.** 2019 68 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.<sup>1</sup>

O sistema de plantio direto (SPD) vem sendo considerado como um dos mais modernos sistemas de produção agrícola sustentável para o cerrado brasileiro, que é pautado no não revolvimento do solo, manutenção dos resíduos sobre a superfície do solo e um eficiente sistema de rotação de cultura, que proporciona alterações positivas nos atributos físicos e na manutenção ou aumento do teor de matéria orgânica dos Latossolos que predominam na região. O objetivo deste estudo foi avaliar as alterações nos atributos físicos do solo e relacionar com a matéria orgânica do solo em áreas sob diferentes sistemas de manejo. O estudo foi conduzido no delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado com quatro repetições. Os tratamentos consistiram em quatro áreas: 1 – SPD há 5 anos (SPD5), 2 – SPD há 17 anos (SPD17), 3 – Sistema de plantio convencional há 20 anos (SPC20) e 4 – Mata nativa (MN) caracterizada pela vegetação de cerrado, a partir das quais foram coletadas quatro amostras compostas em cada área. Foi avaliado a resistência mecânica do solo a penetração das raízes (RP), densidade do solo (Ds), umidade volumétrica (Uv), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (PT) e a agregação do solo, nas profundidades de 0 a 0,4 m, fez-se o fracionamento granulométrico e químico da matéria orgânica do solo. O sistema de plantio convencional juntamente com o sistema de plantio direto apresentou adensamento na camada mais superficial, porém sem causar restrição ao desenvolvimento das raízes. A densidade do solo foi o atributo físico que se correlacionou significativamente com todos os outros avaliados. O sistema plantio direto 17 e 5 anos juntamente ao sistema plantio convencional 20 anos, foram os sistemas que apresentaram valores mais próximos de atributos físicos em relação a mata nativa respectivamente. As alterações provocadas pelo manejo são mais perceptíveis até a camada de 0,20 m nos sistemas. Os sistemas conservacionistas e mata nativa apresentaram maior teor de matéria orgânica e estoque de carbono no solo, proporcionando os melhores indicadores de estabilidade. O sistema plantio convencional 20 anos e os sistemas de plantio direto exibiram valores de COT, COp, COam e MOL iguais e inferiores em relação a mata nativa. Os sistemas de plantio direto juntamente a mata nativa ocorreu o predomínio da fração humina, demonstrando o efeito do sistema conservacionista para essa fração.

**Palavras-chave:** Plantio convencional, plantio direto, compactação, densidade, agregação, fracionamento da matéria orgânica.

---

<sup>1</sup> Orientador: José Luiz Rodrigues Torres – UFU

## ABSTRACT

SILVA, VENÂNCIO RODRIGUES E. **Physical attributes and soil organic matter under different management systems.** 2019. 68 f. Dissertation (Master Program Agronomy/Soils) – Federal University of Uberlândia, Uberlândia.<sup>2</sup>

The no-till system (NTS) has been considered as one of the most modern systems of sustainable agricultural production for the Brazilian savanna, which is based on the non-revolving soil, maintenance of residues on the soil surface and an efficient rotation system culture, which provides positive changes in physical attributes and in maintaining or increasing the organic matter content of the Oxisols that predominate in the region. The aim of this study was to evaluate changes in the physical attributes of the soil and to relate it to the organic matter of the soil in areas under different management systems. The study was conducted in a completely randomized design with four replications. The treatments consisted of four areas: 1 - NTS 5 years ago (NTS5), 2 - NTS 17 years ago (NTS17), 3 - Conventional planting system 20 years ago (CPS20) and 4 - Native forest (NF) characterized by savanna vegetation, from which four samples composed in each area were collected. Soil mechanical resistance, root penetration (RP), soil density (Sd), volumetric moisture (Vm), macroporosity (Ma), microporosity (Mi), total porosity (TP) and soil aggregation were evaluated, depths from 0 to 0.4 m, the granulometric and chemical fractionation of the soil organic matter was carried out. The conventional tillage system together with the no-tillage system showed densification in the most superficial layer, but without causing restriction to the development of the roots. The soil density was the physical attribute that correlated significantly with all the others evaluated. The no-tillage system 17 and 5 years together with the conventional no-tillage system 20 years, were the systems that presented values closer to physical attributes in relation to native forest respectively. Changes caused by management are more noticeable up to the 0.20 m layer in the systems. The conservationist and native forest systems showed a higher content of organic matter and carbon stock in the soil, providing the best stability indicators. The conventional tillage system 20 years and no-tillage systems showed equal and lower COT, COP, COam and MOL values in relation to native forest. The no-tillage systems together with the native forest predominated the humid fraction, demonstrating the effect of the conservationist system for this fraction.

**Keywords:** Conventional tillage, no-tillage, compaction, density, aggregation, organic matter fractionation.

---

<sup>2</sup> Major Professor: José Luiz Rodrigues Torres – UFU

## 1. INTRODUÇÃO

Revolver o solo, incorporar a cobertura vegetal ainda verde e os resíduos culturais que estavam sobre a sua superfície, antes do plantio das culturas comerciais, era uma prática comum e utilizada pela maioria dos agricultores no país. Todo o conhecimento que foi sendo acumulado ao longo dos anos sobre as formas e meios de preparar o solo foram sendo ajustados a diferentes condições de ambiente e cultura a ser cultivada até o surgimento do sistema de plantio direto (SPD) na palha.

O SPD engloba uma série de técnicas que preconizam a semeadura ou plantio das mudas diretamente sobre os resíduos vegetais de diferentes plantas de cobertura deixados sobre a superfície do solo. Tem como princípio fundamental a não mobilização no solo de forma generalizada, pois a semente ou muda e o adubo é depositado diretamente na linha de plantio, onde ocorre o mínimo revolvimento. Para atingir seu potencial de benefícios, este sistema deve ser acompanhado da rotação de culturas de forma planejada, onde estejam incluídas as espécies vegetais melhoradoras/condicionadoras do solo, que apresentem eficiente cobertura e ciclagem de nutrientes.

Alguns estudos relatam que o SPD melhora a qualidade estrutural do solo à medida que os ciclos de cultivo vão sucedendo, devido ao aporte de matéria orgânica na superfície, a presença das raízes e de seus remanescentes beneficia o sistema, além de melhorar as características nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo e proteger o solo com relação à erosão (MENDONÇA et al., 2013).

Em condições naturais, o solo apresenta estabilidade elevada sendo um fator dependente do clima, da textura, da física, biológica e do comportamento dinâmico da matéria orgânica do solo que interferem na cimentação e flocação dos seus agregados, contudo, no sistema agrícola, a estrutura do solo é um resultado dinâmico que, além da textura e do clima, leva-se em consideração também as espécies cultivadas e seu manejo, os quais podem interferir, nos agregados naturais, como a formação de novos agregados, que em sua maior parte, são consequência da atividade física e/ou biológica causadas pelo sistema de manejo (SANTOS, 2010).

Com a implantação do sistema de plantio direto, aumentou o uso intensivo de máquinas de grande porte nas áreas agrícolas, com isso ocorreu incremento de potência e massa nas máquinas melhorando a eficiência nas operações, o que causou o agravamento dos problemas relacionados à compactação, mudando a dinâmica da água

e do ar, prejudicando o desenvolvimento das plantas por interferência do impacto negativo nas trocas gasosas entre o solo e atmosfera.

Somente após alguns anos da não realização do revolvimento do solo é que as áreas sob SPD apresentam sua estrutura com resistência suficiente para amenizar o dano pelo tráfego de máquinas com elevado peso sem demonstrar compressibilidade significativa, pois após este período de implantação estes solos apresentam agregados mais resistentes e que estão mais próximos entre si, contudo, se este solo já apresentar problemas na degradação estrutural, baixo teor de matéria orgânica, a acomodação natural das partículas desestruturadas, sem a reposição adequada de matéria orgânica e ao tráfego de máquinas, certamente prejudicará o desenvolvimento natural das plantas (SILVEIRA et al., 2008).

A utilização de máquinas e implementos agrícolas de maior massa em locais ausentes ou com reduzida cobertura vegetal reflete nos atributos físicos do solo, ocorrendo à redução da porosidade total e da continuidade dos poros, a reorganização e distribuição das partículas e de seus agregados, ao aumento da compactação e densidade do solo ( $D_s$ ), com consequente redução da macroporosidade ( $M_a$ ), inibindo assim o crescimento e o desenvolvimento radicular das plantas (ROSSETTI et al., 2012).

A atividade biológica é um fator importante para recuperar e manter as características físicas do solo para isso é preciso mantê-la elevada e constante dentro do sistema com um aporte continuo e abundante de material orgânico. Para isso devem-se adotar práticas de manejo do solo eficientes, incluindo rotação de culturas com espécies que tenham sistema radicular agressivo juntamente com elevada produção de biomassa, para fornecer ou manter o teor de matéria orgânica do solo (MOS).

Esta MOS é constituída de 70 a 80% pelas frações ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) e humina (HUM), que são substâncias fundamentais no processo de estabilização e formação dos agregados, por meio de sua ação cimentante, formando complexos organominerais e posteriormente a formação de agregados estáveis (STEVENSON, 1982). Baver et al. (1973) destacam que a formação dos agregados do solo é derivada da aproximação por hifas e células dos organismos, do efeito cimentante e produtos provenientes da síntese microbiana ou da ação estabilizadora dos produtos de decomposição.

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar as alterações nos atributos físicos do solo e relacionar com a matéria orgânica do solo em áreas sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado.

## **1. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 A evolução dos sistemas de manejo e os atributos do solo**

O setor agropecuário brasileiro passou por amplas modificações ao longo dos últimos anos e a busca da sustentabilidade da produção tornou-se uma meta a ser atingida e que está associada à evolução dos sistemas de produção, que deve trazer vantagens econômicas aos produtores rurais, mantendo ou aumentando a produção, sem causar prejuízos ao ambiente, em benefício da sociedade (TORRES et al., 2018).

Esta evolução dos sistemas passa pela forma de preparar o solo, que inicialmente era feito de forma convencional, onde era preconizada a necessidade de realizar sucessivas gradagens para destorroamento, nivelamento e depósito das sementes no solo (MACEDO, 2009). Entretanto, este sistema de manejo ao ser empregado por vários anos consecutivos proporcionava a desestruturação do solo, causando a formação de camadas adensadas ou compactadas nas camadas de solo ocasionada pelos equipamentos, deixando-os mais suscetíveis ao processo de erosão (CARVALHO FILHO et al., 2007).

Esta desestruturação do solo motivou a busca de sistemas que causavam menor movimentação do solo, dando início ao cultivo de áreas com um manejo mínimo do solo, que foi caracterizado como aquele que proporciona um reduzido número de operações quando comparado ao sistema convencional, apresentando menor custo, com baixo nível de perdas de solo e água por erosão, foi considerado um manejo conservacionista por atender a premissa básica de manter 30% da superfície do solo com resíduos culturais (BUHLER, 1995).

Com a busca por sistemas mais conservacionistas de manejo de solo, alguns produtores paranaenses trouxeram para o Brasil na década de 60 uma nova técnica de plantio que era utilizado pelos agricultores da Inglaterra e dos Estados Unidos (EUA) desde a década de 50. Considerado como um avanço tecnológico fundamental na conservação do solo e produção de alimentos naqueles países mais conservacionista que o cultivo mínimo, pois a mobilização do solo era realizada somente na linha de plantio (MOTTER; ALMEIDA, 2015). Esta técnica foi trazida para o Brasil para controlar a erosão que assolava as áreas agrícolas paranaenses que eram cultivadas de forma convencional e ameaçava comprometer toda a cadeia de atividade agrícola na região (CASÃO JUNIOR et al., 2006).

O sistema de plantio direto (SPD) foi introduzido no país como uma tecnologia conservacionista por ser baseado no não revolvimento do solo, manutenção da palha na superfície do solo e rotação de culturas, auxilia no combate a erosão, melhora o uso da água, aumenta os estoques de carbono e proporciona a ciclagem de nutrientes no perfil do solo (SILVA et al., 2009). Com o sucesso obtido após a introdução do SPD, expandiu-se exponencialmente na faixa de 30% ao ano para as outras regiões do país (KLUTHCOUSKI; STONE, 2003), atingindo 31,5 milhões de hectares (MHa) 2011/12 (FEBRAPDP, 2012) com previsão de atingir 33 MHa em 2020 (MAPA, 2012).

Apesar dos benefícios proporcionados ao solo pelo SPD, alguns problemas persistem e precisam ser melhor avaliados, pois neste sistema é comum ocorrer o adensamento das camadas superficiais e a compactação das subsuperficiais, devido ao excesso de operações com máquinas com massa superior ao suportado pela estrutura do solo ou pelas ações realizadas em ocasiões de umidade inadequada (SANTOS et al., 2014), que provocam restrição ao aprofundamento radicular, baixa atividade biológica, redução da macroporosidade, altera a dinâmica do ar e água no solo, prejudicando o desenvolvimento das plantas (MCPHEE et al., 2015; MORAES et al., 2016).

De acordo com Stone et al. (2006), após alguns anos da introdução do sistema é que as áreas sob SPD demonstrarão uma estrutura com resistência suficiente para suportar o tráfego de máquinas e implementos sem apresentar compressibilidade expressiva, pois apresentarão agregados mais densos, resistentes e que estarão mais próximos entre si.

O tempo de adoção do SPD é um fator fundamental para avaliar as alterações proporcionadas nos atributos químicos e físicos do solo, pois nos primeiros 5 anos ocorre uma fase inicial de transição, onde o solo começa se reestruturar, acumular resíduos vegetais superfície e remanescentes de sistema radicular na subsuperfície e restabelecer sua atividade microbiana, a seguir vêm as fases de transição (5-10 anos), consolidação (10-20 anos) e de manutenção (acima de 20 anos), quando o SPD estará expressando todo seu potencial de benefícios (SÁ et al., 2004; ANGHINONI, 2007).

## **2.2 Atributos físicos do solo**

Alguns atributos físicos são importantes indicadores para avaliar as mudanças na qualidade do solo ao longo dos ciclos de produção, pois estabelecem relações diretas nos processos hidrológicos, como o escoamento superficial, taxa de infiltração, erosão e

drenagem, além de outras funções essenciais, como o suprimento de nutrientes, armazenamento de água e sua aeração (GOMES; FILIZOLA, 2006).

A estrutura sob o ponto de vista agrícola é apresentado como um dos atributos mais importantes do solo, mesmo que não tenha relação como um fator de crescimento para as plantas, exerce influência no desenvolvimento radicular oferecendo disponibilidade de água e ar às raízes das plantas, pois é influenciada pelo clima, atividade biológica, práticas de manejo do solo e sensível a forças de natureza mecânica e físico-química (CRUZ et al., 2003).

Segundo Andreola et al. (2000), o solo em seu estado natural, apresenta características físicas favoráveis ao desenvolvimento normal de plantas, pois possui permeabilidade, estrutura, densidade do solo e porosidade ideais, entretanto, à medida que estas áreas são cultivadas, os atributos físicos e químicos do solo passam por mudanças, cuja intensidade e dinâmica variam com o clima, características do solo, uso e manejos adotados.

A estrutura, densidade do solo, agregação, compactação, macro e microporosidade, porosidade total, capacidade de retenção de água e estabilidade de agregados são os atributos físicos mais importantes e usados como indicadores para analisar e quantificar os impactos causados pelo manejo do solo adotado (PEZARICO et al., 2013). Estes indicadores refletem a influência e a dinâmica dos sistemas de manejo e clima numa escala de tempo que possibilita a verificação de suas mudanças (ISLAM; WEIL, 2000).

### **2.2.1 Densidade do solo, macro e microporosidade e porosidade total**

Os solos tropicais possuem valores de densidade diferentes, que variam em função de suas características mineralógicas, textura e do teor de matéria orgânica, entretanto naqueles solos onde estas variações não são expressivas, a densidade se torna um excelente indicador da qualidade do solo (BARBOSA, 2012).

É um atributo que reflete principalmente a organização das partículas do solo, que, por sua vez, define as características físicas dentre elas o espaço poroso, assim, qualquer forma de manejo do solo que possa alterar este arranjo refletirá nos valores da Ds, que é dependente da estrutura (JONG VAN LIER, 2010). A densidade está relacionada à estrutura, à densidade de partícula e à porosidade, sendo utilizada como

uma indicadora de processos de degradação da estrutura física do solo, que pode mudar em função do sistema de manejo implantado (EMBRAPA, 2008).

Segundo Brady e Weil (2013) a densidade do solo é definida como a massa por unidade de volume de solo seco, que inclui tanto as partículas sólidas como o seu espaço poroso. Reichardt e Timm (2012) destacam que por ter no seu denominador o volume total da amostra ( $V_t$ ), a densidade do solo varia de acordo com o  $V_t$ , pois ao se comprimir uma amostra, a massa das partículas sólidas ( $M_s$ ) permanece constante e  $V_t$  diminui, por conseguinte a densidade do solo aumenta, por isso , se torna um excelente índice para determinar o grau de compactação de um solo.

A densidade do solo vem sendo empregada na estimativa da estrutura do solo com afinidade ao potencial de lixiviação, produtividade e erosão, pois é diretamente afetada pelos sistemas de plantio, características da cobertura vegetal, quantidade de resíduos depositados sob a superfície do solo e teor de matéria orgânica (NEVES et al., 2007).

No momento da degradação da estrutura da densidade do solo, a consequência é o seu aumento, reduzindo a macroporosidade, que corrobora com a relação inversa existente entre a densidade e a porosidade total do solo (Alves et al., 2007). A determinação da densidade é, então, adquirida pela quantificação direta dessas duas variáveis ( $V_t$  e  $M_s$ ).

O método utilizado para determinação da densidade é realizada com a obtenção de uma amostra de  $V_t$  conhecido por meio de anéis volumétricos fincados no solo com o uso de um trado ou outro equipamento apropriado, enquanto que a  $M_s$  é quantificada por pesagem em balança analítica após remoção da umidade em estufa a 105 °C até peso constante (BLAKE; HARTGE, 1986; EMBRAPA, 1997). Enquanto que a porosidade é um atributo físico definido pela relação entre o volume de poros e o volume total de do material (TEIXEIRA et al., 2009).

A densidade do solo possui uma tendência a aumentar em profundidade no perfil, isto se deve, possivelmente, ao teor de matéria orgânica reduzida, menor agregação, menos volume de raízes e a uma compactação ocasionada pela massa das camadas superiores, com isso, horizontes subsuperficiais muito compactados apresentam densidade de 2 g/cm<sup>3</sup>, ou superior (BRADY; WEIL, 2013).

No solo em sua composição são encontradas partículas orgânicas e minerais intimamente associadas, apresentando entre si espaços não ocupados pelas partes sólidas, que compõem a porosidade do solo. O limite entre macroporos (> 0,05 mm) e

microporos ( $< 0,05$  mm) é normalmente estabelecido pela umidade de equilíbrio em mesa de tensão a uma altura de sucção de 0,6 m, que leva ao esvaziamento dos poros de diâmetro maior que 50  $\mu\text{m}$  (KLEIN; LIBARDI, 2002). Enquanto os microporos são responsáveis pela retenção de água e seu armazenamento no solo, os macroporos são os responsáveis pela aeração e infiltração de água, que conduzem a dinâmica da água do solo (ALVARENGA, 2010).

Diferentes classificações do diâmetro de poros foram citadas na literatura, sendo de forma mais simplificada que categoriza os poros em duas classes: macroporos, quando os poros têm diâmetro maior do que 0,06 mm, e microporos, quando os poros são menores do que 0,06 mm, como a proposta por Kiehl (1979).

O cultivo convencional de forma intensiva e a constante exposição do solo à ação do impacto das gotas de chuva promovem degeneração rápida dos atributos físicos do solo da camada superficial, reduzindo o espaço poroso que traz prejuízo ao desenvolvimento das culturas (CARVALHO et al., 1999).

Após três anos de estudo foi observado que ocorre o aumento nos valores de microporosidade e densidade com redução da macroporosidade e porosidade total na camada superficial em áreas manejadas sob o sistema plantio direto comparado ao sistema convencional, no entanto, a Ds tende a diminuir com o aumento dos teores de matéria orgânica do solo (LAGO et al., 2012).

Em solos com predominância arenosa, os níveis de matéria orgânica geralmente são baixos, as partículas sólidas formam menos agregados, e a sua densidade é geralmente mais alta do que os de textura mais fina. Quantidades similares de macroporos estão evidenciados tanto em solos arenosos como nos de textura fina e bem agregados, porém os arenosos apresentam menos poros no interior de seus agregados e, por isso, possuem menor porosidade total (BRADY; WEIL, 2013).

Estudos constataram que em áreas de mata nativa os valores de Ds são menores e os valores de PT são maiores, quando comparada a outras áreas manejadas sob preparo convencional, plantio direto e pastagem, sendo que estas mudanças são relacionadas ao maior acúmulo de material vegetal na superfície do solo e de carbono orgânico nas camadas superficiais e à menor atividade antrópica nestas áreas (TORRES; PEREIRA, 2008).

Estudando uma área sob SPD após 20 anos, Guareschi et al. (2012) observaram menores valores de Ds e maiores de PT, em comparação a outras áreas com três e quinze anos sob o mesmo sistema de manejo, esse comportamento é explicado, nos

primeiros anos, pois ocorre a reorganização das partículas do solo acarretando no aumento na Ds, que, após a consolidação do sistema, os teores de carbono orgânico aumentam, o que leva à diminuição na Ds e posteriormente ocorre o aumento da PT.

### **2.2.2 Umidade gravimétrica**

A umidade gravimétrica do solo é uma propriedade que deve ser levada em consideração, pois é um fator controlador da compactação, ou seja, de acordo com as características do solo, este tem uma umidade ideal para ser preparado para receber a semente, que diminui a probabilidade de compactar o solo (FIGUEIREDO et al., 2000). Segundo Kiehl (1979) a umidade do solo ainda exerce influencia na coleta de amostras para a análise da Ds, pois em solos com baixa umidade pode-se desfazer a amostra ou no caso de solos muito úmidos, pode aumentar a compactação, alterando as avaliações levando ao erro.

De acordo com Carvalho et al. (2007), a umidade do solo pode ser empregada como indicador do tipo e qualidade do solo, porque apresenta variabilidade nos domínios temporal e espacial, que pode aumentar o risco de erros no manejo da água do solo (HU et al., 2008). Além disso, a umidade desempenha uma influência sobre a dinâmica no solo e na planta, dentre eles, a movimento de água, compactação, aeração do solo e desenvolvimento radicular (TIMM et al., 2006).

As operações de preparo do solo realizadas no sistema convencional ou a mobilização do solo apenas na linha de plantio são feitas para promover condições adequadas à germinação e ao crescimento do sistema radicular das culturas, entretanto, as condições de umidade durante o manejo, o teor de argila e de matéria orgânica do solo, a profundidade de trabalho e o tipo de máquina e implemento utilizado podem levar a mudanças da estrutura do solo, apresentando restrições ao crescimento das raízes (De MARIA et al., 1999).

A oscilação de umidade no solo é frequente nas camadas superficiais, sendo que os maiores valores de umidade seguem diretamente os eventos pluviométricos, com isso, no começo da estação chuvosa a camada superficial apresenta baixa umidade, pois é o local com maior concentração de raízes e consequentemente ocorre uma absorção mais intensa da água armazenada. Após o aumento da umidade devido às primeiras chuvas, o componente gravitacional do potencial da água facilita à drenagem vertical da água, o que é afetado em função da rápida permeabilidade do perfil (BARBOSA, 2012).

### **2.2.3 Agregação**

Agregados são componentes da estrutura do solo e, portanto, são importantes na manutenção da estrutura do solo, como a porosidade e aeração do solo, no desenvolvimento das plantas e da população microbiana, na infiltração de água e no controle dos processos erosivos (OADES, 1984). A utilização e o sistema de manejo empregado ao solo e o aporte de material vegetal depositado pelos resíduos das plantas cultivadas e remanescentes do sistema radicular alteram a estrutura do solo, pois favorecem maior porosidade e aumenta a estabilidade dos agregados, além de compor um isolante térmico que reduz a amplitude de variação de temperatura (ALBUQUERQUE et al., 2001).

Para os agregados serem formados, é essencial que os colóides do solo estejam floculados e que todos os componentes do agregado sejam posteriormente estabilizados pelo agente cimentante, que pode ser a matéria orgânica, os óxidos e os hidróxidos presentes no solo, encontrados nas partículas primárias quanto das secundárias do solo (SALTON, 2008). Os ciclos de umedecimento e secagem apresentam um importante fator ambiental que acarreta em mudanças na agregação do solo.

Os processos físico-químicos ou abióticos são considerados os mais importantes para a formação dos agregados menores, pois estão associados principalmente com as argilas, que tendem ser mais importantes em solos de textura fina, enquanto que nos solos arenosos, a agregação é quase inteiramente dependente de processos biológicos, onde ocorre a formação de agregados maiores (BRADY; WEIL, 2013).

Os agregados podem ser classificados e diferenciados quanto ao tamanho, de acordo com a teoria da hierarquização de agregados, em cinco grupos: < 2 µm; de 2 a 20 µm; de 20 a 250 µm, de 250 µm a 2 mm; e > 2 mm (TISDALL; OADES, 1982). Os agregados que apresentam valores menores que 250 µm são designados microagregados e os maiores macroagregados, sendo cada agregado formado pela adesão dos agregados da classe que vem logo abaixo, seguindo, assim, uma ordem hierárquica.

O tamanho dos agregados é relacionado ao uso e manejo do sistema implantado no solo, sendo que os de menor tamanho são formados pela presença de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, enquanto a estabilidade dos macroagregados é formada por agentes cimentantes orgânicos, tais como hifas de fungos e frações da matéria orgânica com baixo grau de decomposição (SOUZA et al., 2012).

A utilização de gramíneas em pastagens e áreas agrícolas influencia a relação entre agregação e teores de carbono (C) no solo, pois são plantas que possuem sistema radicular forte, vigoroso e de crescimento rápido, que são adequados para agregar fisicamente as partículas de solo e, em conjunto com a liberação de exsudatos, aumentando a cimentação dessas partículas e acúmulo de C (SALTON et al., 2008b).

Estudos desenvolvidos por Bhattacharyya et al. (2009) evidenciaram a redução da macroagregação ( $> 0,25$  mm) no sistema lavoura, em uma área com intenso revolvimento do solo, onde ocorreu a quebra mecânica dos agregados e à redução da matéria orgânica, pois nesse sistema o revolvimento ocorre duas vezes ao ano. A matéria orgânica vem sendo relatada na literatura como o agente responsável pela estabilização de agregados do solo, sendo apresentada com uma boa correlação entre a mesma e a agregação do solo em tratamentos que evidenciam diferenças quanto ao teor de carbono orgânico (SALTON et al., 2008).

### 2.2.3.1 Índices de agregação

Alguns índices vêm sendo usados para classificar o estado de agregação do solo, pois tamanho, agregação e a estabilidade dos agregados podem ser determinados através do diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade dos agregados (IEA) (WENDLING et al., 2005).

Atributos físicos do solo cultivados sobre os resíduos de diferentes cobertura, sob plantio direto, Torres et al. (2015a) observaram que através das mudanças em alguns índices, pode-se demonstrar que após doze anos de implantação do sistema, o solo passou por reestruturação e estabilização, justificaram que isto se deve à ação das raízes e ao aporte de material orgânico ao longo dos ciclos, conforme também observado por Pereira et al. (2010), os quais afirmaram que quanto maior o valor de DMP e DMG, maior o efeito do manejo na formação e estabilização de agregados do solo.

Em estudo semelhante, Demarchi et al. (2011) compararam cinco sistemas de manejo, avaliaram DMP, DMG e IEA, mostraram que os índices mais satisfatórios foram encontrados na área de pastagem (*Urochloa brizantha*), que proporcionaram valores de 4,12 e 2,96 mm; e 92,9% para pastagem, 3,43 e 2,04 mm e 88,4% para mata nativa, respectivamente, isso pode ser justificado pela característica do sistema radicular dessa espécie justificando os valores elevados em consequência da maior agregação.

A ação do cultivo da cana-de-açúcar e da mineralogia da fração argila nos atributos físicos de Latossolos Vermelhos foi analisada por Centurion et al. (2007), evidenciando que os valores mais elevados de DMP para o solo sob mata nativa, estão relacionados entre outras características, ao fornecimento constante de matéria orgânica, que é utilizada como fonte de energia para a atividade e desenvolvimento dos microrganismos, sendo seus subprodutos, formados de moléculas orgânicas e atuam como agente de formação e estabilização dos agregados do solo.

Estudando cinco diferentes sistemas de manejo do solo e analisando o DMP, DMG e IEA, Bertol et al. (2004) constataram que o C orgânico é um dos principais fatores de formação e estabilização dos agregados, que, na ausência de preparo do solo, os ciclos de umedecimento e secagem são potencializados e realizam a agregação.

De acordo com Brandão e Silva (2012) evidenciaram que a classe de agregados com diâmetro entre 0,50-0,25 mm proporcionou aumento significativo do diâmetro médio para todos os tratamentos, evidenciando maior estabilidade dos agregados com o manejo de gramíneas, enquanto que a classe de agregados com diâmetro entre 1-0,5 mm demonstrou valores superiores em relação a inicial com aumento percentual de 46% para ambas as condições de água disponível.

Em ecossistema nativo com várias espécies de gramíneas, Vezzani e Mielniczuk (2011) observaram que o solo estudado apresentou em média 76,4% de solo agregado, sendo 63,8% desse total formado por macroagregados superiores que 0,25mm, fato justificado à longa e contínua atuação das raízes de gramíneas.

## **2.3 Matéria orgânica**

### **2.3.1 O teor de matéria orgânica e a estrutura do solo**

A estrutura do solo pode ser explicada como sendo o arranjo das partículas frações argila, silte e areia, que são interligadas por uma força que determina a estabilidade dos agregados, um dos atributos físicos mais sensíveis às formas de manejo do solo, que pode ser diretamente influenciado pelo teor de matéria orgânica do solo (CAMPOS et al., 1995).

Os sistemas de manejo de solos têm como objetivo criar condições adequadas ao desenvolvimento das culturas, contudo, o uso de máquinas e implementos cada vez maiores para essas operações pode levar a mudanças na estrutura do solo, causando-lhe

maior ou menor compactação, facilitando a destruição dos macroagregados, que evita o crescimento de raízes e diminui o volume de solo usado pelo sistema radicular (BARBOSA, 2012).

O teor de matéria orgânica do solo é considerado um dos principais fatores pela manutenção das condições físicas do solo, pois influencia a capacidade dos solos em resistir às forças de compactação causadas pelo tráfego de máquinas e implementos agrícolas através de vários mecanismos, dentre eles pode-se destacar o aumento da força de aderência entre partículas e agregado e da elasticidade, efeito de diluição, de cargas elétricas e na fricção (RICHART et al., 2005).

Segundo Costa et al. (2014), esses mecanismos estão diretamente relacionados à agregação das partículas, pois no solo ocorre um efeito sinérgico relacionado entre o aumento dos estoques de matéria orgânica e os processos que levam ao aumento da estabilidade dos agregados, pois se pode observar uma relação causa-efeito entre agregação e a matéria orgânica, na qual o acréscimo da estabilidade de agregados é ao mesmo tempo uma causa e uma consequência dos aumentos nos estoques de matéria orgânica do solo.

A deposição dos resíduos vegetais sob a superfície do solo, o uso de coberturas mortas ou fertilizantes orgânicos que promovam a manutenção ou acréscimo do teor de matéria orgânica no solo são um importante fator contra o processo de compactação, que causam alterações significativas nos atributos físicos do solo (CAMARGO; ALLEONI, 1997). Zhang et al. (1997), McBride e Bober (1989) relatam que a sensibilidade do solo à compactação reduz com o aumento do teor de carbono orgânico explicado pela redução da faixa de umidade na qual o solo exibe propriedades plásticas.

### **2.3.2 Estoque de carbono do solo**

A matéria orgânica do solo está inserida do ciclo do carbono e seu equilíbrio é dinâmico e estável sob solos de vegetação natural (BORTOLON et al., 2009). Porém, quando ocorre a influência antrópica nos ecossistemas, esse equilíbrio é alterado e, normalmente, as entradas de C são inferiores do que as saídas, o que causa a redução da quantidade e mudança da qualidade da matéria orgânica (CERRI et al., 2008).

Todos os compostos que contêm carbono orgânico no solo, entre eles os microrganismos vivos e mortos, resíduos de vegetais e animais em processo parcial de decomposição e substâncias orgânicas que foram transformadas por microrganismos ou

que passaram por mudanças químicas formam a matéria orgânica do solo (MIELNICZUK, 2008). Diferenças na entrada e nas taxas de decomposição podem induzir a redução do seu conteúdo nos solos, liberando processos de degradação, desta forma, a fertilidade do solo e a sustentabilidade dos ecossistemas estão relacionados inteiramente à conservação da matéria orgânica (ROSCOE; MACHADO, 2002).

Os estoques de carbono do solo nos ecossistemas são resultado da interação entre os fatores de sua formação e aqueles relacionados à sua decomposição, os teores de carbono estocada no solo são verificadas pelo balanço entre a produtividade primária da vegetação, com as entradas de material vegetal, e a decomposição da matéria orgânica (GRACE et al. 2006).

As mudanças causadas no solo levam o acelerado declínio dos estoques de carbono, o que pode apresentar implicações na durabilidade do seu efeito quanto à fixação de carbono atmosférico colaborando para o aumento das emissões de gases para a atmosfera (BAYER et al., 2004). Com isso, a remoção da cobertura vegetal para a implantação da agricultura com a utilização de práticas inadequadas de manejo leva a um desequilíbrio, assim o estudo e o entendimento de sua dinâmica no solo são primordiais para garantir um acúmulo adequado no solo e assim garantir a sustentabilidade dos agroecossistemas (CARDOSO et al., 2010).

### **2.3.3 Fracionamento granulométrico da matéria orgânica**

Nas regiões tropicais os agroecossistemas estão localizados sobre solos que proporcionam baixa fertilidade natural, assim o aporte, acúmulo de serapilheira e as mudanças da matéria orgânica são importantes para a sustentação e melhoria das propriedades do solo bem como elevar a capacidade produtiva (GONÇALVES et al., 2001).

Segundo Vezzani et al. (2008) a matéria orgânica é um atributo importante para a manutenção da qualidade do solo, estando relacionada em diversos processos químicos, físicos e biológicos.

De acordo com Stevenson (1994), a matéria orgânica do solo é dividida em alguns compartimentos: biomassa microbiana; carbono orgânico particulado (COP), composto de resíduos de plantas, animais e microrganismos; carbono orgânico associado a minerais (COAM) e as substâncias húmicas, as quais abrangem ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e huminas. Rossi (2012) destaca que em sistemas de produção

conservacionistas, o acúmulo de carbono ocorre principalmente na matéria orgânica particulada, a qual é mais suscetível do que o carbono orgânico total às mudanças no manejo do solo.

O COP é a fração da matéria orgânica separada por dispersão e peneiramento do solo associada à fração areia ( $COP \geq 53 \mu\text{m}$ ), sendo qualificado como partículas derivadas de resíduos de plantas e hifas com estruturas celulares reconhecíveis, cuja duração no solo está dependente da proteção física desempenhada por agregados (GOLCHIN et al., 1994).

O COAM é a fração da matéria orgânica ligada às frações silte e argila do solo ( $COAM < 53\mu\text{m}$ ), sendo a fração da matéria orgânica que reage com a superfície de partículas minerais, desenvolvendo os complexos organominerais, estando protegida pelo mecanismo de proteção coloidal (CHRISTENSEN, 2001). A implantação de sistemas de manejo que sejam adequados o carbono orgânico pode colaborar para a manutenção da capacidade produtiva dos solos e diminuição da emissão de  $\text{CO}_2$  para a atmosfera (SIQUEIRA NETO et al., 2011).

Em sua pesquisa, Nicoloso (2005) apresentou nas áreas de integração lavoura-pecuária sob SPD, que o COP foi mais eficiente na expressão das alterações nos teores de carbono orgânico em relação ao manejo implantado, nos primeiros centímetros do solo: 0,0–2,5 e 2,5–5,0 cm. Loss et al. (2009a) enfatizaram que os teores de COP na camada superficial de 0-0,05 m são 26% maiores em sistema de rotação (milho/berinjela), em SPD quando comparado ao sistema de sucessão de culturas (feijão/milho) sob sistema convencional.

### **2.3.4 Fracionamento químico da matéria orgânica**

A remoção da cobertura vegetal original para o plantio de culturas aliada ao manejo de práticas inadequadas promove um desequilíbrio entre o solo e o meio, tornando-o mais sensível aos processos de degradação (CENTURION et al., 2001).

Desse modo, o estudo e a compreensão de seu comportamento no solo são importantes para garantir um acréscimo no solo e assim conservar a sustentabilidade dos ecossistemas e dos sistemas agrícolas (CARDOSO et al., 2010).

A fertilidade dos solos é relacionada aos atributos moleculares da fração alcalino solúvel do carbono orgânico, as substâncias húmicas (SH). Esta fração, igualmente é

dinâmica, mostrando mudanças no uso do solo, e também é uma das frações que corroboram pela acumulação da matéria orgânica no solo.

Os estudos de acúmulo de carbono no solo frequentemente lançam mão das técnicas de fracionamento químico e físico para obter a compartimentalização da matéria orgânica (BAYER et al., 2004). A definição do método a ser relacionado segundo Collins et al. (1997), deve levar em consideração a natureza da pesquisa, que pode ter como objetivo, a caracterização e identificação química de seus componentes específicos, ou a quantificação e descrição de seus compartimentos.

De acordo com Benites et al. (2003), os teores de C das frações húmicas estudadas através do fracionamento químico são categorizadas de acordo com a solubilidade dos compostos orgânicos, básico ou ácido, esses compostos conglomeram uma categoria de ocorrência natural, biogênica, composta de substâncias orgânicas heterogêneas que comumente se caracterizam por coloração que pode variar de amarelada ou até tons mais escuros com alto peso molecular e de natureza refratária.

O carbono das substâncias húmicas em regiões com diferentes usos no cerrado mineiro, foram analisadas em três áreas, plantio de eucalipto com 20 anos de idade, pastagem e uma área de mata, Pulrolnik et al. (2009) notaram que no plantio de eucalipto os baixos valores nos teores de C ocorrem na fração humina, porém nas frações (C-FAH e C-FAF) do solo, os teores de C foram 16,6 e 17,5% superiores para o eucalipto em comparação com os solos da pastagem, e 17,5 e 36,9% com os solos do Cerrado, respectivamente na camada de 0,1 m, com isso, o maior estoque de C nas frações FAH e FAF do solo sob eucalipto aconteceu devido à maior deposição de resíduos vegetais da cultura.

### **2.3.5 Matéria orgânica leve**

A matéria orgânica do solo (MOS) em sua composição há uma fração ativa, a matéria orgânica leve (MOL), que possui um tempo de permanência que varia de um a cinco anos, essa fração é composta por resíduos orgânicos de vegetais e animais parcialmente humificados em diferentes estádios de decomposição (JANZEN et al., 1992). A MOL abrange resíduos vegetais e animais com uma classe de tamanho classificada entre 0,25 e 2,0 mm e este material flota em água (ANDERSON; INGRAN, 1989).

A MOL apresenta a peculiaridade de manifestar uma rápida mudança no solo representando, em curto prazo, a aptidão da ciclagem de nutrientes no sistema (COMPTON; BOONE, 2002), que tem uma resposta imediata em relação ao manejo do solo (RANGEL et al., 2008).

Trabalhos de Pereira et al. (2010), que analisaram os teores de COT e MOL em água, em locais de Cerrado sob sistema de plantio direto com diferentes cultivos e plantas de coberturas do solo, observaram a MOL como o indicador mais expressivo à interação dos efeitos dos sistemas de manejo e culturas agrícolas estudadas em comparação ao COT.

Ao estudar os teores de MOL em diferentes sistemas de manejo, Loss et al. (2010) notaram maiores teores no sistema de plantio direto que conserva a palhada sobre a superfície do solo, elevando os teores da fração leve da MOS, sendo semelhantes aos teores do sistema agroflorestal e superior ao manejo convencional. Os autores observaram que em função do tempo de implantação do sistema ocorreu aumento no aporte desta fração na camada superficial (0-0,05 m) para as áreas estudadas, após 20 anos, e os teores de MOL do sistema de plantio direto foram iguais ao da área de Cerrado.

Avaliando os estoques de MOL-L e de C e N da MOL-L, Vasconcelos et al. (2012) relataram que na profundidade de 0-0,1 m no sistema agroflorestal, os valores foram significativamente menores na fase pré-pousio, em relação aos demais períodos, que houve aumento de 50% no estoque de MOL-L e de 37 e 33% nos estoques de C da MOL-L e N da MOL-L, respectivamente, durante o período de pousio, que se sustentaram em quantidades significativas mesmo após o período de produção. Roscoe e Buurman (2003) ressaltaram redução da MOL-L após cultivo em solos de cerrado, entretanto, a diminuição foi menor em solos sob plantio direto.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 3.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido nas áreas experimentais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro (IFTM), *Campus Uberaba-MG*, localizado no município de Uberaba, entre as coordenadas 19°39'10,17" de latitude Sul e 47°58'15,65" de longitude Oeste, com altitude variando entre de 790 e 819 m (Figura

1) em diferentes sistemas de manejo (Tabela 1) entre março/2017 a março/2018.

**Figura 1** - Áreas estudadas com seus respectivos perímetros demarcadas.



Fonte: Adaptado do Google Earth (2019)

**Tabela 1.** Histórico, descrição e localização das áreas de estudo.

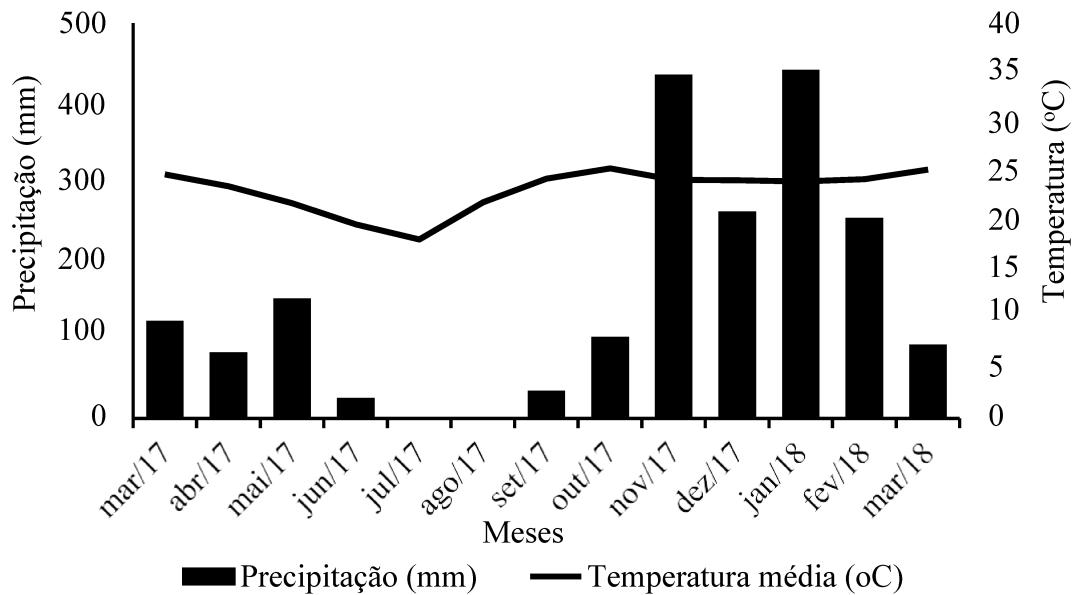
Áreas	Descrição
SPD5	Área total de 0,21 ha, 797 m de altitude, entre a latitude 19°39'22,69" (S) e longitude 47°57'25,86" (O), área em transição para o SPD.
SPD17	Área total de 0,21 ha, 798 m de altitude, entre a latitude 19°39'21,81" (S) e longitude 47°57'26,82" (O), área em transição para o SPD, área em fase de consolidação do SPD.
SPC20	Área total de 6,75 ha, 819 m de altitude, entre a latitude 19°39'10,17" (S) e longitude 47°58'15,65" (O), área sob pivô central com mais de 20 anos sob sistema de plantio convencional.
CN	Área total de 10,20 ha, 790 m de altitude, de latitude 19°39'38,89" (S) e longitude 47°57'45,06" (O), área preservada, sem qualquer atividade antrópica, utilizada como referencial do Cerrado Nativo.

### 3.2 Clima da região

O clima da região é classificado como Aw, tropical quente, segundo Köppen (1948), com estação chuvosa no verão e seca no inverno, apresentando inverno frio e seco, com médias anuais de precipitação, temperatura e umidade relativa do ar de 1600 mm, 22,6 °C e 68%, respectivamente (UBERABA EM DADOS, 2009). Entretanto, durante o período de avaliação foi registrada precipitação acumulada de 1995,3 mm,

acima do normal para a região (Figura 2) (INMET, 2018).

**Figura 2** - Variáveis climáticas obtidas junto ao Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa do INMET (2018).



### 3.3 Tipo de solo

Os solos das áreas experimentais foram classificados como Latossolo Vermelho distrófico (LVd) (SANTOS et al., 2013), textura média arenosa. A área estava sendo cultivada em sistema de plantio convencional (SPC20) até a implantação do sistema de plantio direto (SPD), uma há 5 e outra há 17 anos apresentando na camada de 0 - 0,40 m as características físicas de 220, 720 e 60 g kg<sup>-1</sup> de argila, areia e silte respectivamente.

### 3.4 Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, em área conduzidas com quatro diferentes sistemas, que configuraram os tratamentos: 1 – Sistema de plantio direto implantado há 5 anos (SPD5), 2 – Sistema de plantio direto implantado há 17 anos (SPD17), 3 – Sistema de plantio convencional há vinte anos (SPC20) e 4 – Mata Nativa (MN), caracterizada pela vegetação de Cerrado, As amostras foram coletadas após a colheita das culturas anuais em SPD e SPC, com 5 repetições em cada área. As amostras foram conservadas em sacos plásticos e posteriormente secas ao

ar, destorroadas e passadas em peneira de 2 mm para obtenção de terra fina seca ao ar (TFSA)

### **3.5 Manejo e adubação**

O manejo das áreas se assemelha em SPD, diferindo apenas em tempo de condução do sistema, pois ocorreram vários ciclos com plantas de cobertura (amostras foram coletadas em área de milheto e crotalária) rotacionados com culturas anuais (milho, soja, feijão e sorgo). Nessas áreas, a soja antecedeu o momento da coleta das amostras.

Na área sob SPD5 foi feito uma aração profunda e duas gradagens (aradora e niveladora) quando foi implantado o sistema. No SPD17, quando esta área completou 12 anos sob este sistema foi feito a descompactação do solo com subsolador equipado com disco para cortar a palha no local das hastes e rolo destorroador. Este mesmo equipamento foi utilizado na área em SPC20, no ano de 2015, a seguir foram feitas duas gradagens, uma aradora e outra niveladora, antecedendo o plantio da cultura anual (milho, soja e feijão) para a qual o milho foi a cultura que antecedeu a coleta das amostras.

Tradicionalmente a adubação utilizada na produção do milho é baseada na aplicação de 400 kg ha<sup>-1</sup> da fórmula 8-28-16 (N-P-K) na semeadura, com 140 kg ha<sup>-1</sup> de N e 80 kg ha<sup>-1</sup> de K em cobertura, parcelados aos 20 e 40 dias após a semeadura.

Para a soja a adubação de semeadura utilizada foi de 200 kg ha<sup>-1</sup> da fórmula 0-20-15 + 2,5% Zn + 2,5% de Mn, correspondendo 40 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 60 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, 5 kg ha<sup>-1</sup> de Zn e 5 kg ha<sup>-1</sup> de Mn, com inoculação da semente, enquanto que para o feijão foram utilizados 350 kg ha<sup>-1</sup> da fórmula 08-28-16 com 0,5% de Zn como adubação de base, nas áreas sob SPD5, SPD17 e SPC20.

### **3.6 Avaliações**

#### *3.6.1 Umidade do solo e Resistência do solo a penetração das raízes*

Para avaliação do conteúdo de água no solo, foram realizadas coletas nos mesmos dias e profundidades (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m), sendo

tomadas duas amostras por parcela e homogeneizadas, para obtenção da massa úmida e seca. As amostras foram acondicionadas em latas de alumínio, pesadas e colocadas para secar em estufas de circulação forçada de ar a 105 °C por 24 horas. Após a obtenção da umidade gravimétrica, esta foi multiplicada pela Ds e obteve-se a umidade volumétrica do solo (EMBRAPA, 1997).

A avaliação da resistência mecânica do solo a penetração das raízes (RP) com o penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar, com ângulo de ponteira cônica de 30° (STOLF et al., 2014), nas profundidades de 0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,3 e 0,3-0,4 m. Os dados de campo foram obtidos em números de impactos ( $\text{dm}^{-1}$ ), transformados em  $\text{kgf cm}^{-2}$  através da equação 1 (SENE et al., 1985).

Equação 1

$$\text{RP} (\text{kgf cm}^{-2}) = 5,6 + 6,98 \text{ N}$$

Em que RP = Resistência do solo a penetração das raízes em  $\text{kgf cm}^{-2}$ . Estes valores são multiplicados pela constante 0,098 e transformados em unidades MPa (ARSHAD et al., 1996).

### *3.6.2 Densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e porosidade total.*

Em área experimental foram abertas trincheiras de coleta, onde foram coletadas duas amostras indeformadas com auxílio de um anel volumétrico em anéis de 48 mm de diâmetro por 53 mm de altura, com o trado de Uhland, nas profundidades de 0,05–0,10, 0,1–0,2 e 0,2–0,4 m para determinação da densidade do solo (Ds). Estas amostras foram saturadas por 24 h, depois foram avaliadas utilizando uma unidade de sucção (mesa de tensão) a 0,6 m de altura de coluna de água, a seguir foram secas a 105 °C por 24 horas.

A distribuição de poros por tamanho foi determinada nestas amostras com estrutura indeformada. A macroporosidade (Ma), porosidade total (PT) e microporosidade (Mi) foram definidas segundo Teixeira et al. (2017).

### *3.6.3 Agregação do solo*

A estabilidade dos agregados estáveis em água foi avaliada pelo método descrito por Kemper e Chepil (1965), denominado padrão, que consiste em pesar amostras de 50 g de solo, secas ao ar, em duplicata constituída de agregados de diâmetro entre 9,51 a 4,76 mm, os quais foram umedecidos por capilaridade durante 12 horas. A seguir as

amostras são transferidas para um jogo de peneiras de 4; 2; 1; 0,5; 0,25 e 0,13 mm de malha, agitando-se em água, com oscilação vertical durante 15 minutos.

Após a agitação, os conteúdos de cada peneira serão transferidos para recipientes metálicos previamente pesados e submetidos à secagem por 24 horas em estufa a 105 °C, descontado o teor de água e a quantidade de areia retida em cada peneira.

A partir dos valores de massa dos agregados, foi calculado o diâmetro médio ponderado (DMP) (Equação 2), que é maior quanto maior for a porcentagem de agregados grandes retidos nas peneiras com malhas maiores; logo, a presença de agregado de maior tamanho ou maior DMP pode refletir a resistência do solo à erosão. O diâmetro médio geométrico (DMG) representa uma estimativa do tamanho da classe de agregados de maior ocorrência e pode ser estimado pela equação 3.

O índice de estabilidade de agregados (IEA) (Equação 4) representa uma medida da agregação total do solo e não considera a distribuição por classe de agregados; logo, quanto maior a quantidade de agregado, < 0,25 mm, menor será o IEA. Esses índices de agregação do solo foram calculados da seguinte maneira:

$$DMP = \sum (xi \times wi) \quad \text{Equação 2}$$

Em que  $xi$  é o diâmetro médio das classes (mm); e  $wi$ , a proporção de cada classe em relação ao total (WENDLING et al., 2005).

$$DMG = \exp \left\{ \sum [(\ln [xi] * [pi])] / \sum [pi] \right\} \quad \text{Equação 3}$$

Em que  $\ln[xi]$  é o logaritmo natural do diâmetro médio das classes; e  $PI$ , o peso (g) retido em cada peneira (DEMARCHI et al., 2011).

$$IEA = \{(PA - wp<0,25) / (PA)\} * 100 \quad \text{Equação 4}$$

Em que PA é o peso da amostra;  $wp<0,25$  corresponde ao peso dos agregados da classe <0,25 mm, dado em g (DEMARCHI et al., 2011).

### *3.6.4 Carbono orgânico total*

As trincheiras foram abertas para coleta de amostras, coletando 4 amostras de solo em todas as parcelas nas mesmas profundidades (0, 0,05–0,1, 0,1–0,2 e 0,2–0,4 m), para a determinação do teor de carbono orgânico total.

O carbono orgânico total (COT) foi quantificado segundo Yeomans e Bremner (1988), onde foram pesadas 0,5 g das amostras de TFSA, macerada em porcelana e passada pela peneira de 60 mesh. O material foi colocado em erlenmeyer de 250 mL, sendo em seguida, adicionados 5 mL de dicromato de potássio ( $K_2Cr_2O_7$  0,167 mol L<sup>-1</sup>)

e 7,5 mL de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ). Posteriormente, aqueceu-se em bloco digestor a 170 °C por 30 min. Em seguida, adicionou-se 80 mL de água destilada e 0,3 mL da solução indicadora (fenantrolina) para então titular com a solução de sulfato ferroso amoniacal 0,2 mol L<sup>-1</sup>.

### *3.6.5 Estoque de carbono no solo*

Para o cálculo do estoque de carbono (EstC) foi utilizado o método proposto por Fernandes e Fernandes (2013), que foi determinado a partir da equação 5.

$$EstC \text{ (Mg ha}^{-1}) = [(C \times Ds \times e) / 10] \quad \text{Equação 5}$$

Em que  $C$  é o valor do teor de carbono orgânico total (COT) na camada (g kg<sup>-1</sup>);  $Ds$  = densidade do solo (Mg m<sup>-3</sup>);  $e$  = espessura da camada em análise (cm).

### *3.6.6 Matéria orgânica do solo*

Para o cálculo da matéria orgânica do solo (MOS) foi utilizada a equação 6.

$$MOS \text{ (dag kg}^{-1}) = COT \times 1,724 \quad \text{Equação 6}$$

Em que MOS é o teor de matéria orgânica do solo (dag kg<sup>-1</sup>); COT = carbono orgânico total do solo (dag kg<sup>-1</sup>); 1,724 = constante utilizada considerando que a matéria orgânica contém cerca de 58% de carbono (EMBRAPA, 1999).

### *3.6.7 Matéria orgânica leve.*

As amostras de solo foram coletas nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm sendo uma na linha de plantio e outra na entre linha para determinação da matéria orgânica leve (MOL). Após a coletas as amostras foram secas e destorreadas, e pesados 50 g de TFSA e acondicionados em becker de 250 mL, adicionando-se 100 mL de solução de NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>, deixando-se em repouso por uma noite. Decorrido o tempo, a suspensão foi agitada com bastão de vidro e todo o material passado por peneira de 0,25 mm, eliminando-se toda a fração argila e silte (ANDERSON; INGRAN, 1988).

Posteriormente, o material retido na peneira (MOL e areia) foi transferido, quantitativamente, novamente para o becker, completando-se o volume com água. Todo o material flotado foi passado por peneira de 0,25 mm, tomando-se cuidado para separar a MOL da fração areia. Essa operação foi repetida até que todo o material que flotou

com a agitação em água foi removido. O material que ficou retido na peneira (MOL) foi transferido para recipientes de vidro (previamente pesados), levado a estufa a 65 °C até atingir peso constante (72 horas), sendo pesado todo o conjunto.

### *3.6.8 Fracionamento granulométrico da matéria orgânica do solo: COp e COam*

As amostras de solo foram coletadas conforme a descrição de coleta da (MOL), assim foram pesadas 20 g de TFSA e 60 mL de solução de hexametafosfato de sódio ( $5 \text{ g L}^{-1}$ ) foram agitados durante 15 horas em agitador horizontal, a seguir, a suspensão foi passada em peneira de 53  $\mu\text{m}$  com auxílio de jato de água (CAMBARDELLA; ELLIOT, 1992).

O material retido na peneira, que consiste no carbono orgânico particulado (COp) associado à fração areia, foi seco em estufa a 60°C, quantificado em relação a sua massa, moído em gral de porcelana e analisado em relação ao teor de carbono orgânico total (COT) segundo Yeomans e Bremner (1988). O material que passou pela peneira de 53  $\mu\text{m}$ , que consiste no carbono orgânico associado aos minerais (COAM) das frações silte e argila, foi obtido por diferença entre o COT e COP.

### *3.6.9 Fracionamento químico da matéria orgânica do solo*

Para o fracionamento das substâncias húmicas foi utilizada a técnica de solubilidade diferencial estabelecida pela Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas (SWIFT, 1996). As amostras de solo utilizadas foram as mesmas coletadas para a análise da MOL e para o fracionamento granulométrico.

As substâncias húmicas foram separadas em três frações: fração ácidos fúlvicos (FAF), fração ácidos húmicos (FAH) e humina (HUM). Foi pesada uma massa de TFSA contendo o equivalente a 30 mg de C, submetendo-se ao contato com 20 mL de NaOH 0,1 mol  $\text{L}^{-1}$  por 24 horas. A separação entre o extrato alcalino ( $\text{EA} = \text{C-FAF} + \text{C-FAH}$ ) e o resíduo (C-HUM) foi feita por centrifugação a 5000 giros por 30 minutos.

Seguiu-se mais uma lavagem com a mesma solução de NaOH, juntando-se o extrato com o anteriormente obtido, resultando em volume final de aproximadamente 40 mL. O resíduo foi retirado dos tubos da centrífuga, acondicionados em placa de petri e foi seco a 65 °C. O pH do EA foi ajustado a 1,0 ( $\pm 0,1$ ) com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  20%, seguido de decantação por 18 horas. O precipitado (C-FAH) foi separado da fração solúvel C-FAF

por centrifugação a 5000 g por 5 minutos e ambos os volumes aferidos a 50 mL, com NaOH C-FAH e água destilada C-FAH. A quantificação do carbono orgânico nas frações C-FAF e C-FAH foi feita usando-se alíquotas de 5 mL de extrato, 1 mL de dicromato de potássio 0,042 mol L<sup>-1</sup> e 5 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, em bloco digestor a 150 °C (30 min) e titulação com sulfato ferroso amoniacial 0,0125 mol L<sup>-1</sup>.

No resíduo seco em estufa, foi determinado o C-HUM, adicionando-se 5,0 mL de dicromato de potássio 0,1667 mol L<sup>-1</sup> e 10,0 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, em bloco digestor a 150 °C (30 min) e titulação com sulfato ferroso amoniacial 0,25 mol L<sup>-1</sup> e indicador ferroin (YEOMANS; BREMNER, 1988).

### **3.7 Análise estatística**

Os resultados foram submetidos a análises da normalidade da distribuição dos erros (teste de Lilliefors) e homogeneidade das variâncias dos erros (teste de Cochran). Foram submetidos à análise de variância com aplicação do teste F e os valores médios comparados entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade ( $p<0,05$ ) e o teste de Scott-Knott ( $p<0,05$ ).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Resistência do solo a penetração das raízes, densidade e umidade

Analisando os valores obtidos para resistência a penetração das raízes (RP) e densidade do solo (Ds), observou-se que as áreas apresentam valores que evidenciam uma fase inicial de compactação, que ocorre na profundidade entre 0,20 e 0,30 m na área cultivada sob sistema de plantio convencional há 20 anos (SPC20), entretanto nas áreas sob sistema plantio direto há cinco anos (SPD5) e há dezessete anos (SPD17) esta camada mais compactada está ocorrendo na camada mais superficial (0 – 0,10 m), enquanto que na mata nativa (MN) não foi observado valores de restrição ao crescimento radicular das plantas no perfil do solo avaliado (Tabela 2).

Estes valores são justificados pelo preparo do solo feito na área em SPD5, antes de implantar o sistema, na descompactação do solo realizada na área sob SPD17, quando estas completaram 12 anos sob o sistema e na SPC20 no ano de 2015 (TORRES et al., 2015b), dois anos antes da amostragem para avaliação destes atributos físicos.

Os valores de RP observados variaram de 1,32 a 3,11 Mpa, que estão dentro da faixa de 2,0 a 4,0 Mpa exceto SPC 20 (0-0,10 m), MN e SPD 17 (20-40) não se encontram nessa faixa de restrição e que tem sido proposto como crítico ao desenvolvimento radicular para culturas anuais (SUZUKI et al., 2007; SILVA et al., 2008), com o agravante, estes efeitos são mais prejudiciais quando o solo encontra-se com baixa umidade (TAVARES FILHO; TESSIER, 2009), como ocorre neste estudo, que variou entre 0,15 e 0,21  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , nas áreas sob SPC20, SPD5 e SPD17, bem abaixo do 0,33  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  considerados ideais por Arshad et al. (1996), pois quando o solo está na sua capacidade de campo, é o momento que se obtém a melhor correlação deste atributo (RP) com o crescimento radicular.

Segundo Girardello et al. (2014), em solos que apresentam maior RP, as plantas sistema radicular menos profundo, ramificado e com pior distribuição no solo, o que compromete a eficiência do uso de nutrientes, água e limita da produtividade da cultura cultivada no local. Freddi et al. (2006) destacam que a RP geralmente apresenta maior relação com a produtividade das culturas do que com outros atributos físicos, como a Ds e PT.

Avaliando os atributos físicos em uma área após 23 anos de SPD, Hickmann et al. (2012) observaram que os valores de Ds ocorreram na profundidade de 0,05-0,10 m,

enquanto que Reichert et al. (2009) evidenciaram que os maiores índices de Ds e RP ocorreram na profundidade de 0,08-0,15 m, concluindo que o aumento da Ds interferiu no crescimento radicular, redução da aeração, causou aumento da RP e provocaram alterações na dinâmica da água no solo.

**Tabela 2.** Resistência à penetração das raízes (RP), densidade do solo (Ds) e umidade volumétrica (Uv) nos sistemas de manejo estudados, no ano de 2017, em Uberaba, MG.

Profundidade m	SPC20	Sistemas de manejo		
		SPD5	SPD17	MN
RP (Mpa)				
0-0,10	1,90 bB*	3,11 aA	2,59 aA	1,32 cA
0,10-0,20	2,38 bA	2,66 aB	2,42 bA	1,42 cA
0,20-0,30	2,52 aA	2,52 aB	2,21 aA	1,56 bA
0,30-0,40	2,01 aA	2,14 aC	1,87 aB	1,39 bA
CV (%)		12,69		
Ds (kg dm <sup>-3</sup> )				
0-0,10	1,67 aA	1,62 aA	1,71 aA	1,23 aA
0,10-0,20	1,68 aA	1,47 bB	1,47 bB	1,14 cA
0,20-0,30	1,75 aA	1,59 aA	1,61 aA	1,26 bA
0,30-0,40	1,66 aA	1,57 aA	1,57 aA	1,25 bA
CV (%)		5,30		
Uv (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )				
0-0,10	0,15 cA	0,18 cA	0,21 bA	0,28 aB
0,10-0,20	0,15 cA	0,18 cA	0,21 bA	0,28 aB
0,20-0,30	0,16 cA	0,18 cA	0,21 bA	0,28 aB
0,30-0,40	0,15 cA	0,19 bA	0,20 bA	0,33 aA
CV (%)		9,78		

\* = Médias seguidas de mesma letra, minúscula nas linhas compararam sistemas de manejo e maiúsculas nas colunas compararam as profundidades, que não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p<0,05$ ). SPC20: sistema de plantio convencional há 20 anos; SPD5: sistema de plantio direto há 5 anos; SPD17: sistema de plantio direto há 17 anos; MN: Mata nativa; CV% = Coeficiente de variação.

Estudando o efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em Latossolo Vermelho distrófico, Beutler et al. (2006) determinaram que a RP variando de 2,24 a 2,97 MPa causou decréscimo na produtividade dos cultivares de soja, entretanto, o valor entre as cultivares avaliadas diminuiu.

Avaliando a RP, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja manejada sob plantio direto de longa duração, Girardello et al. (2014) observaram valor crítico de RP de 3,0 MPa, que causou decréscimo de 10 % na produtividade da soja, entretanto, pequenos incrementos na RP ocasionaram acentuado decréscimo na produtividade da soja, atingindo redução de 38% com 5,0 MPa.

Com relação aos valores de Ds, observou-se que os valores variaram de 1,66 a 1,75 kg dm<sup>-3</sup> para a área em SPD20, de 1,47 a 1,62 kg dm<sup>-3</sup> para o SPD5 e de 1,47 a 1,71 kg dm<sup>-3</sup> para o SPD17, entretanto os maiores valores (1,75, 1,62 e 1,71 kg dm<sup>-3</sup>, respectivamente) ocorreram na mesma profundidade onde a RP foi maior (Tabela 2). Considerando que o valor critico estabelecido para o desenvolvimento radicular é de 1,55 kg dm<sup>-3</sup> para solos com teor de argila variando entre 200 e 550 g kg<sup>-1</sup> (REINERT et al., 2008) ou de 1,60 kg dm<sup>-3</sup> proposto por Silva e Rosolem (2001), ambos confirmam a existência de uma camada compactada onde estão ocorrendo os maiores valores de RP. Na área de MN os valores variaram de 1,14 a 1,26 kg dm<sup>-3</sup>, com isso fica evidenciado que não existe qualquer impedimento ao sistema radicular das plantas.

Avaliando os atributos nesta mesma área experimental quando esta tinha 12 anos sob SPD (SPD12), Torres et al. (2015c) constataram que a RP e a DS foram maiores na profundidade entre 0,30-0,40 m, que variaram de 1,86 a 4,62 Mpa e 1,46 a 1,66 kg dm<sup>-3</sup>, respectivamente, nas áreas cultivadas com braquiária, sorgo, milheto, crotalária e pousio, que antecederam o cultivo de milho e soja. Ao fazer novas amostragens nesta mesma área no SPD17, observou-se que os valores de RP e Ds reduziram, o que indica que a descompactação do solo realizada no SPD12 foi eficiente e que vem ocorrendo a reestruturação do solo com a continuidade do sistema até atingir o SPD17, pois os valores observados nesta avaliação foram menores que no SPD12.

Em seu estudo, Araújo et al. (2004) obtiveram resultados semelhantes, pois à medida que a RP aumentou, a umidade do solo diminuiu. Torres et al. (2012) avaliando uma área sob pastagem observaram que Ds e Uv tiveram alta correlação, pois quanto maior foram estas duas variáveis, menor foi a RP.

#### **4.2 Macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo**

Analizando os valores de macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (PT) do solo, observou-se que, de forma geral, foram sempre superiores para MN, quando comparado aos outros tratamentos (SPC20, SPD5 e SPD17), que não houve diferenças significativas entre as profundidades avaliadas para SPC20 e SPD17, que para SPD5 e MN, a PT foi superior na camada mais superficial (0 - 0,10 m) e diminuiu à medida que aumentou a profundidade (Tabela 3).

Na camada de 0-0,10 o solo contendo o SPD 5 anos apresentou valores de 20,81% de Ma sendo este superior aos valores encontrados nas demais camadas e em

relação aos demais sistemas estudados, além de estar mais próximo dos valores referentes à MN, 23,97% de Ma.

Quanto a PT, pode-se observar que ocorreu o menor valor na camada de 0-0,10 m em SPC20, quando comparado à MN, SPD5 e SPD17, reduzindo 20% em relação à área MN e 9% quando comparado ao SPD5 e SPD17.

**Tabela 3.** Macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (PT) nos sistemas de manejo estudados, no ano de 2017, em Uberaba, MG.

Profundidade m	Sistemas de manejo			
	SPC20	SPD5	SPD17	MN
Ma				
0-0,10	11,94 bA	20,81 aA	15,75 bA	23,97 aA
0,10-0,20	11,10 bA	14,96 bB	13,33 bA	19,75 aB
0,20-0,30	15,78 aA	14,43 aB	13,65 aA	15,66 aB
0,30-0,40	14,79 aA	14,68 aB	14,66 aA	16,54 aB
CV (%)		26,49		
Mi				
0-0,10	24,77 bA	24,87 bA	27,77 bA	32,18 aA
0,10-0,20	25,24 bA	25,02 bA	25,69 bA	32,84 aA
0,20-0,30	23,29 bA	26,07 bA	26,58 bA	35,21 aA
0,30-0,40	23,71 bA	27,00 bA	26,46 bA	33,26 aA
CV (%)		9,90		
PT				
0-0,10	36,72 cA	45,68 bA	43,52 bA	56,15 aA
0,10-0,20	36,34 bA	39,98 bB	39,02 bA	52,59 aB
0,20-0,30	39,08 bA	40,51 bB	40,23 bA	50,87 aB
0,30-0,40	38,50 bA	41,69 bB	41,12 bA	49,81 aB
CV (%)		6,70		

\* = Médias seguidas de mesma letra, minúscula nas linhas comparam sistemas de manejo e maiúsculas nas colunas comparam as profundidades, que não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p<0,05$ ). SPC20: sistema de plantio convencional há 20 anos; SPD5: sistema de plantio direto há 5 anos; SPD17: sistema de plantio direto há 17 anos; MN: Mata nativa; CV% = Coeficiente de variação.

Apesar dos menores valores de Ma observados em todos os tratamentos, em nenhum momento atingiu o valor limite de 10%, que Segundo Kiehl (1979), representa o limite crítico considerado impeditivo para o crescimento de raízes para culturas anuais, acrescenta ainda que o solo ideal é aquele que contém 1/3 de Ma (34%) e 2/3 de Mi (66%). Michelon et al. (2007) destacam que o valor mínimo de 10% é apropriado para as trocas líquidas e gasosas entre o ambiente externo e o solo, sendo crítico para o desenvolvimento de raízes da maioria das culturas.

Durante o processo de adensamento do solo os macroporos responsáveis pela aeração do solo diminuem e são substituídos por microporos, isto evidencia a persistência do efeito do tráfego de máquinas durante a implantação e manejo da área (VIANA et al., 2011).

Avaliando a compactação em um Latossolo Vermelho distroférrico e suas relações com o crescimento radicular do milho em uma área com oito anos sob SPD, Bergamin et al. (2010) observaram resultados na camada de 0-0,10 m, onde os valores de Ma tiveram uma média de 20% e na camada de 0,10 – 0,20 m cerca de 11% do volume total de Ma, que foram superiores ao valor considerado mínimo (10%) em todos os manejos, indicando que não houve qualquer limitação no fornecimento de O<sub>2</sub> para as plantas em épocas mais úmidas.

Segundo Lago et al. (2012), após três a quatro anos da adoção do SPD, é normal os solos proporcionarem maiores valores de Mi na camada superficial e menores valores de Ma e PT, em relação aos solos em SPC, justificam que isso ocorre em motivo do arranjo natural do solo não mobilizado e da pressão provocada pelo trânsito de máquinas e implementos agrícolas mais pesados, comportamento este não observado neste estudo, pois os valores de Mi e PT foram superiores a Ma, fato este justificado pela compactação do solo que ocorre nas camadas mais superficiais nas áreas em SPD5 e SPD17.

Após três anos da área sob SPD, Stone e Silveira (2001) notaram que ocorreram valores mais elevados de Mi e menores valores de Ma e PT na profundidade superficial, quando comparados aos demais sistemas de manejo estudados, explicaram que isso ocorre em razão do agrupamento natural das partículas do solo, que não foi revolvido, possuindo menor transito de máquinas e implementos agrícolas, além do aumento do teor de matéria orgânica na camada superficial. Hernani e Salton (2009) estudaram os atributos do solo em sistemas de manejo diferentes por 16 anos e notaram que no SPD ocorreram o aumento da Ds e diminuição da PT nas profundidades de 0-0,05 e 0,05-0,10 m.

A rotação das plantas de cobertura auxilia na formação e aumento dos agregados no solo no sistema de plantio direto, fazendo a proporção de macroporos ser maior em relação ao sistema de plantio convencional. De acordo com Ralisch et al. (2008) em sistemas de plantio convencional, em que a camada superficial do solo é constantemente revolvida, é comum observar aumento de sua Ma quando as coletas são realizadas após

a aração e gradagem, diferente do momento das coletas deste estudo que foram realizadas após a colheita.

Avaliando a relação Ma/PT, observou-se que somente na área sob SPD5, na profundidade de 0 - 0,10 m, é que houve aumento significativo desta relação, quando comparados as áreas em SPC20, SPD17 e MN, mesmo assim em todas as áreas, com exceção das profundidades de 0 a 0,30 m da área em SPC20, os valores estiveram sempre acima de  $0,33 \text{ dm}^{-3}$  (Tabela 4), valor este considerado ideal de cerca de 1/3 da PT, conforme sugerido por Taylor e Aschcroft (1972).

**Tabela 4.** Relação entre macroporosidade (Ma) e porosidade total (PT) nas áreas sob diferentes sistemas de manejo e profundidades, no ano de 2017, em Uberaba-MG.

Profundidade m	Relação Ma/PT			
	SPC20	SPD5	SPD17	MN
.....dm <sup>-3</sup> dm <sup>-3</sup> .....				
0-0,10	0,32 aA	0,45 aA*	0,36 aA	0,43 aA
0,10-0,20	0,30 aA	0,37 aB	0,34 aA	0,37 aA
0,20-0,30	0,31 aA	0,35 aB	0,33 aA	0,40 aA
0,30-0,40	0,33 aA	0,35 aB	0,35 aA	0,38 aA
CV (%)		22,43		

\* = Médias seguidas de mesma letra, minúscula nas linhas comparam sistemas de manejo e maiúsculas nas colunas comparam as profundidades, que não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p<0,05$ ). SPC20: sistema de plantio convencional há 20 anos; SPD5: sistema de plantio direto há 5 anos; SPD17: sistema de plantio direto há 17 anos; MN: Mata nativa; CV% = Coeficiente de variação.

Para Bertol et al. (2004) o valor de  $0,33 \text{ dm}^{-3}$  é limitante ao desenvolvimento radicular, reduz a taxa de difusão de gases no solo e dificulta a drenagem do excesso de água das chuvas, em seu estudo observou valores acima de 0,40, 0,20 e  $0,20 \text{ dm}^{-3}$  na profundidade até 0,05 m e valores mínimos acima de 0,07, 0,10 e  $0,15 \text{ dm}^{-3}$  nas profundidades entre 0,05 e 0,30 m, para as áreas em cultivo convencional, SPD e MN, respectivamente.

#### 4.3 Estabilidade dos agregados

Após a determinação da estabilidade dos agregados, aplicaram-se os índices de estabilidade de agregados estáveis em água (IEA), diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) sobre os valores observados. Constatou-se que esses índices foram significativamente ( $p<0,05$ ) superiores na camada superficial (0,00-0,10 m) e diminuíram em profundidade (Tabela 5).

Analisando os valores médios de DMP, DMG e IEA, os índices foram maiores na sequência MN>SPD17>SPD5>SPC20, o que comprova a importância da manutenção da cobertura do solo via serapilheira na MN ou no aporte da matéria orgânica na superfície via resíduos vegetais ou remanescentes de sistema radicular das plantas, que alteram a qualidade estrutural do solo à medida que os cultivos forem se sucedendo (Lima et al., 2013).

**Tabela 5.** Diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade dos agregados (IEA) nas áreas sob diferentes sistemas de manejo e profundidades, em Uberaba-MG, no ano de 2017.

Profundidades m	Sistemas de manejo			
	SPC20	SPD5	SPD17	Mata Nativa
DMP				
0-0,10	2,06 cA*	3,61 bA	3,72 bA	4,61 aA
0,10-0,20	0,66 dB	1,47 cB	2,42 bB	3,84 aB
0,20-0,30	0,75 cB	1,56 bB	2,17 bB	3,80 aB
0,30-0,40	0,67 cB	1,19 cB	2,49 bB	3,82 aB
CV (%)		21,00		
DMG				
0-0,10	0,97 bA	2,39 aA*	2,52 aA	2,33 aA
0,10-0,20	0,38 bA	0,72 bB	1,32 aB	1,72 aA
0,20-0,30	0,45 bA	0,81 bB	1,15 bB	1,95 aA
0,30-0,40	0,39 bA	0,77 bB	1,31 aB	1,77 aA
CV (%)		27,30		
IEA				
0-0,10	81,57 cB	85,54 bB	85,10 bB	91,75 aB
0,10-0,20	84,65 dA	94,12 bA	90,30 cA	97,34 aA
0,20-0,30	84,79 cA	93,77 bA	91,31 bA	96,98 aA
0,30-0,40	84,70 cA	95,24 aA	90,02 bA	97,32 aA
CV (%)		2,26		

\* = Médias seguidas de mesma letra, minúscula nas linhas compararam sistemas de manejo e maiúsculas nas colunas compararam as profundidades, que não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p<0,05$ ). SPC20: sistema de plantio convencional há 20 anos; SPD5: sistema de plantio direto há 5 anos; SPD17: sistema de plantio direto há 17 anos; MN: Mata nativa; CV% = Coeficiente de variação.

Avaliando a distribuição dos agregados do solo em áreas de pastagem, lavoura e floresta em solos na região Sul do país, Ferreira et al. (2007) encontraram maiores proporções de agregados estáveis em água na classe de 8 a 2 mm nas áreas cultivadas com Poáceas (pastagem).

Quando comparadas ao da MN, justificaram que este comportamento é decorrente da atividade do sistema radicular desse tipo de cobertura vegetal, que por

ser mais densa, mais distribuída e por liberar grande quantidade de exsudatos no solo, melhora as ligações dos pontos de contato entre partículas minerais e o contato entre agregados do solo.

Comparando SPD, integração lavoura-pecuária (ILP) e mata nativa (MN), Loss et al. (2011) observaram que independente da profundidade, a área de MN apresentou os maiores valores de DMP, DMG e IEA, justificaram que este padrão foi decorrente do maior aporte de material vegetal na área, que se encontrava sob condição original do solo sem qualquer interferência de cultivo.

Contudo, nas áreas sob SPD e SPC podem ocorrer problemas de compactação, devido ao tráfego pesado de máquinas e implementos de grande porte, pois tem ocorrido o aumento de peso e potência nas máquinas a fim de melhorar a eficiência nas operações, com isso causam mudanças no arranjo estrutural, na consistência, distribuição e tamanho dos poros e na difusão de gases, sendo prejudicial ao desenvolvimento e crescimento das raízes (RALISCH et al., 2008).

Os menores valores de DMP, DMG e IEA observados camadas de 0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30 e 0,30 – 0,40 m no SPC20 podem ser explicados pelo intensivo revolvimento do solo, que desagrega o solo nas profundidades avaliadas. Resultados semelhantes foram encontrados por Loss et al. (2009b) que compararam SPC, SPD, sistemas agroflorestais (SAFs) e cultivos consorciados, encontraram os menores valores de DMP e DMG no SPC, enquanto que Pinheiro et al. (2004) verificaram menores mudanças na agregação do solo em áreas de cultivo de oleráceas sob SPD.

Segundo Silveira et al. (2011), os resíduos das Poáceas apresentam um efeito positivo sobre a agregação do solo, os resíduos destas plantas promovem a melhoria do solo por conterem maior quantidade de lignina, substância que possibilita o aumento de ácidos carboxílicos e ácidos húmicos nos substratos, que favorecem a estruturação e a estabilidade dos agregados, além disso, as raízes destas plantas apresentam alta densidade, que favorece a aproximação das partículas pela constante absorção de água do perfil e de periódicas renovações do sistema radicular.

O acúmulo de resíduos vegetais na superfície do solo com o consequente aumento dos teores de matéria orgânica comprova que este solo está protegido contra a desagregação causada pelo impacto das gotas da chuva e variações bruscas de umidade, que a deposição de matéria orgânica sobre o solo acelera a atividade microbiana, que produzem substâncias que estão auxiliando na formação e estabilização dos agregados (LOSS et al., 2012).

Avaliando a estabilidade de agregados e distribuição do carbono em Latossolo sob sistema plantio direto em Uberaba, MG, Coutinho et al. (2010) observaram que independente da profundidade, a área de mata nativa apresentou os maiores valores de DMP, DMG e carbono, na profundidade de 0 - 0,05 e 0,05 – 0,10 m, resultado este semelhante ao encontrado neste estudo.

Através do índice de sensibilidade, procura determinar o efeito de uma variação de um determinado item no seu valor total é possível avaliar se as alterações provocadas pelos sistemas com relação à mata nativa (MN), sendo observado que RP, DS e IEA os valores foram significativamente maiores no SPC20, SPD5 e SPD17, quando comparados a MN, enquanto que a RP foi maior ( $p<0,05$ ) na profundidade até 0,20 m. que o da MN (Tabela 6).

**Tabela 6.** Índice de sensibilidade (Is) (valores médios), comparando o sistema de manejo convencional há 20 anos (SPC20), sistema de plantio direto há 5 anos (SPD5) e a 17 anos SPD17), com a mata nativa (MN) em Uberaba-MG, no ano de 2017.

Sistema	Atributos físicos do solo								
	RP	DS	Uv	Ma	Mi	PT	DMP	DMG	IEA
Sistemas (S)									
SPC20	1,55 b	1,38 a	0,73 b	0,74 b	0,73 b	0,72 c	0,25 d	0,31 c	1,14 a
SPD5	1,85 a	1,29 b	0,53 d	0,86 b	0,78 b	0,80 b	0,47 c	0,66 b	1,10 b
SPD17	1,62 b	1,32 b	0,63 c	0,79 b	0,80 b	0,79 b	0,68 b	0,91 a	1,06 c
MN	1,00 c	1,00 c	1,00 a	1,00 d					
Teste F	41,15**	51,67**	103,56**	4,27**	29,27**	64,57**	167,84**	15,83**	71,58**
Profundidades (P)									
0-0,10	1,62 a	1,26	0,74 a	0,76 b	0,86	0,81 a	0,76 a	0,99 a	1,05 b
0,10-0,20	1,65 a	1,26	0,74 a	0,75 b	0,83	0,80 a	0,55 b	0,64 b	1,08 a
0,20-0,30	1,42 b	1,25	0,75 a	0,95 a	0,79	0,84 a	0,55 b	0,61 b	1,08 a
0,30-0,40	1,34 b	1,24	0,66 a	0,92 a	0,83	0,86 a	0,54 b	0,62 b	1,08 a
Teste F	7,27**	0,22 <sup>ns</sup>	4,59**	3,90*	1,77 <sup>ns</sup>	3,46*	19,26**	5,82**	3,77*
S x P									
Teste F	2,75*	0,67 <sup>ns</sup>	0,64 <sup>ns</sup>	1,09 <sup>ns</sup>	0,55 <sup>ns</sup>	1,09 <sup>ns</sup>	3,58 <sup>ns</sup>	1,33 <sup>ns</sup>	1,02 <sup>ns</sup>
CV (%)	14,95	7,66	10,98	25,71	10,56	7,17	16,34	33,13	2,62

\* e \*\* = Significativo ( $p<0,01$  e  $0,05$ , respectivamente). Médias seguidas de mesma letra, minúscula nas colunas comparam sistemas de manejo e profundidades, que não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott. SPC20: sistema de plantio convencional há 20 anos; SPD5: sistema de plantio direto há 5 anos; SPD17: sistema de plantio direto há 17 anos; MN: Mata nativa; CV% = Coeficiente de variação.

Para a Uv, Ma, Mi, PT, DMP e DMG, todos os valores foram menores que o observado na MN (1,0), que é a condição natural do solo, antes de passar por qualquer atividade antrópica. As atividades desenvolvidas com máquinas e implementos agrícolas nestas áreas em SPC20, SPD5 e SPD17 causaram alteração negativa na

estrutura do solo, ocasionaram a redução da porosidade total e da continuidade dos poros, causaram a diminuição da umidade e do tamanho das partículas do solo, consequentemente reduziu a macroporosidade, conforme observa por Santos et al. (2014).

Com relação às profundidades avaliadas, observou-se que as maiores alterações ocorrem nas camadas superficiais, para todos os atributos físicos avaliados nas áreas em SPC20, SPD5 e SPD17, quando comparados a MN, que isto deve ocorrer devido ao adensamento ou compactação da camada superficial causada pela movimentação de máquinas e implementos agrícola, durante as etapas de preparo do solo no SPC20 ou máquinas de maior massa no SPD5 e SPD15.

Na mesma região, Torres et al. (2011) calcularam o Is para os atributos Ds, PT, Ma e Mi para diferentes sistemas de manejo, dentre eles o sistema de plantio convencional (SPC), pastagem (PAST), Sistema de plantio direto (SPD) e Mata nativa (MN), em diferentes profundidades. Esses autores observaram que as maiores variações dos Is ocorreram para Ma no SPC e PAST, se mantendo constante na área sob SPD, enquanto para Ds, PT e Mi os valores ficaram próximos da unidade em todos os tratamentos.

**Tabela 7.** Coeficientes de correlações de Pearson entre os atributos físicos avaliados nas áreas sob diferentes sistemas de manejo e profundidades, em Uberaba-MG.

Indicador	Atributos físicos							
	RP	DS	Uv	Ma	Mi	PT	DMP	DMG
DS	0,47*	--	--	--	--	--	--	--
Uv	-0,58*	-0,69*	--	--	--	--	--	--
Ma	-0,22 <sup>ns</sup>	-0,49*	0,18 <sup>ns</sup>	--	--	--	--	--
Mi	-0,51*	-0,73*	0,60*	-0,07 <sup>ns</sup>	--	--	--	--
PT	-0,54*	-0,91*	0,57*	,66*	0,68*	--	--	--
DMP	-0,41*	-0,66*	0,53*	0,25**	0,65*	0,68*	--	--
DMG	-0,13 <sup>ns</sup>	-0,31*	0,12 <sup>ns</sup>	0,20 <sup>ns</sup>	,30**	0,40*	0,80*	--
IEA	0,44*	0,63**	-0,51*	-0,22**	-0,62*	-0,65*	-0,96*	-0,78*

RP: resistência a penetração; UV: Umidade Volumétrica DS: densidade do solo; Ma: macroporosidade; Mi: microporosidade; PT: volume total de poros; DMP: diâmetro médio ponderado; DMG: diâmetro médio geométrico; IEA: índice de estabilidade dos agregados; \* e \*\*: significativo pelo teste Tukey ( $p<0,01$  e  $0,05$ , respectivamente).

Ao analisar as correlações existentes entre os indicadores obtidos nos sistemas de manejo (SPC20, SPD5 e SPD17) e a MN, observou-se que a Ds foi o atributo que se correlacionou direta e significativamente com todos os outros, positivamente com RP e IEA e negativamente com Uv, Ma, Mi, PT, DMP e DMG, respectivamente (Tabela 7).

Essas correlações evidenciaram que à medida que a RP, Ds e IEA aumentam simultaneamente, ao mesmo tempo ocorre diminuição da Uv, Ma, Mi, PT, DMP e DMG, evidenciando que a alteração do sistema de manejo está causando modificações nos atributos físicos do solo, principalmente na sua agregação, conforme comprovado pelo aumento da IEA nas profundidades avaliadas (Tabela 5). Resultados semelhantes foram evidenciados por Torres et al. (2015d), em área sob plantio direto há 12 anos na mesma área de estudo.

Analisando as correlações existentes entre os atributos físicos avaliados nesta mesma área experimental quando esta tinha 12 anos sob SPD, Torres et al. (2015) constataram que a RP e a DS foram maiores na profundidade entre 0,30-0,40 m, que variaram de as variáveis RP, Ds e UV apresentaram correlações significativas entre si, sendo positiva para Ds e RP na profundidade de 0,00-0,10 m, porém negativa e elevada para as outras profundidades onde a RP foi superior, quanto maior foi a RP e Ds, menor foi a Uv.

Os maiores valores de DMP, DMG e IEA observados nas áreas onde não ocorreu revolvimento total do solo (SPD5, SPD17 e MN) podem ser em parte explicados pelo alto teor de carbono orgânico total (COT) acumulado (Tabela 8), consequente aumento dos teores de matéria orgânica do solo (MOS), que atua como agente cimentante, aumentando a agregação do solo.

Estes resultados semelhantes aos observados por Loss et al. (2014a), que observaram DMP e DMG foram significativamente iguais nas áreas em SPD e MN e o COT superior na camada de 0 – 0,05 m, quando comparados à área em sistema de plantio convencional (SPC).

Estes teores de COT acumulado não apresentaram diferença estatística entre os sistemas de manejo e as profundidades avaliadas no SPC20, SPD5 e SPD17, enquanto na área de MN o mesmo não aconteceu, pois COT da MN foi estatisticamente superior aos outros tratamentos e diminuiu significativamente à medida que a profundidade aumentou.

**Tabela 8.** Teores de carbono orgânico total (COT), densidade do solo (DS) e estoque de carbono (EstC) no solo das áreas com diferentes sistemas de manejo, em Uberaba, MG.

Prof. m	SPC20	SPD5	SPD17	MN
		COT ( $\text{g kg}^{-1}$ )		
0-0,05	7,30 bA <sup>ns</sup>	8,20 bA	8,82 bA	27,21 aA*
0,05-0,10	7,38 bA	6,85 bA	7,68 bA	22,42 aB
0,10-0,20	6,01 bA	6,79 bA	6,18 bA	17,94 aC
0,20-0,40	5,28 bA	5,81 bA	5,10 bA	16,78 aC
CV (%)		20,89		
		DS ( $\text{Mg m}^{-3}$ )		
0-0,05	1,67 aA <sup>ns</sup>	1,57 aA*	1,60 aA	1,23 bA
0,05-0,10	1,68 aA	1,47 bA	1,47 bA	1,14 cA
0,10-0,20	1,75 aA	1,62 aB	1,71 aB	1,26 bA
0,20-0,40	1,67 aA	1,59 aA	1,67 aA	1,25 bA
CV (%)		5,30		
		EstC ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )		
0-0,05	6,11 bC*	6,51 bC	7,01 bC	16,71 aD
0,05-0,10	12,41 bC	10,11 bC	12,40 bC	25,52 aC
0,10-0,20	21,11 bB	21,91 bB	20,91 bB	45,21 aB
0,20-0,40	35,20 bA	36,82 bA	34,21 bA	83,85 aA
CV (%)		22,56		

<sup>ns</sup> = Não significativo; \* = Significativo ( $p<0,05$ ). Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha comparam tipos de manejo e maiúscula na coluna comparam as profundidades no mesmo manejo, que não diferem entre si teste de Scott-Knott ( $p<0,05$ ). SPC20 = Sistema de plantio convencional há mais de 20 anos; SPD5 = Sistema de plantio direto há 5 anos; SPD17 = Sistema de plantio direto implantado há 17 anos; (SPD17); MN = Mata Nativa; CV% = Coeficiente de variação.

Mesmo assim, pode-se observar que em cada sistema de manejo os teores médios de COT estão bem distribuídos no perfil do solo e também diminuem com o aumento da profundidade.

Esta diminuição do COT em profundidade é justificada pelo acúmulo de grande quantidade de serapilheira depositada na superfície do solo na MN ou dos resíduos vegetais nas áreas cultivadas, que somados aos remanescentes de sistema radicular das plantas nativas na MN, ou das cultivadas nas áreas em SPC20, SPD5 e SPD17, principalmente de Poáceas, que mesmo não sendo significativo ( $p>0,05$ ), indica uma tendência de queda do COT nas camadas mais profundas.

Com relação ao estoque de carbono (EstC) no solo, observasse que os valores tendem ser maiores nas camadas mais profundas em todos os sistemas de manejo e diminuírem na superfície do solo. Mesmo assim, o EstC na área de MN é significativamente superior ao das áreas em SPC20, SPD5 e SPD17, que não diferiram entre si ( $p<0,05$ ).

Avaliando o estoque de carbono (EstC) em diferentes sistemas de manejo, Pereira et al. (2010) constaram que o uso do milheto possibilitou maiores valores médios de EstC na camada de 0 a 0,20 m, em comparação a crotalária sp e pousio (Vegetação espontânea).

Segundo Lal (2006), o aumento do COT e do estoque de carbono (EstC) no solo ocorre lentamente, via decomposição da serapilheira existente na MN e da biomassa depositada na superfície do solo das diferentes coberturas utilizadas, que são somados as raízes mortas remanescentes das plantas existentes nas áreas. Denef et al. (2008) destacam que ocorre maiores aumentos de COT nas áreas manejadas com irrigação, decorrentes da maior deposição de resíduos vegetais na superfície do solo, como consequência alteram os coeficientes da MOS do solo, entretanto, comentam que o EstC não apresentou diferenças entre os sistemas avaliados, justificaram que isto pode ter ocorrido pela dinâmica acelerada do ciclo da matéria orgânica nestas áreas com maior umidade.

Analizando os valores obtidos nos sistemas avaliados, observou-se que a MN apresentou valores significativamente maiores ( $p<0,05$ ) para COT, COP, COAM e matéria orgânica leve (MOL), que de forma geral, para os sistemas SPC20, SPD5 e SPD17 não houve diferenças ( $p>0,05$ ) entre essas variáveis, em todas as profundidades avaliadas (Tabela 9).

No SPD5 e SPD17, ocorre um maior aporte de resíduos na camada mais superficial (0 - 0,05 m), o que resulta na elevação dos teores de MOL. Os incrementos favorecem a microbiota do solo, tornando maior a produção temporária de agentes cimentantes por microrganismos e fungos, elevando assim o DMP e o DMG. Em relação à MOL, ocorre maior acúmulo nas camadas 0-5 cm devido à deposição de resíduos vegetais nos sistemas conservacionistas de 5 e 17 anos.

Nas áreas sob SPC20 a MOL é menor ( $p<0,05$ ) na camada mais superficial ( $p<0,05$ ) e tende ser menor também nas outras profundidades, pois as gradagens efetuadas nestas áreas facilitam a ação dos microorganismos do solo, com isso acelera a decomposição dos resíduos vegetais depositados na superfície do solo. Comportamento semelhante foi observado por Loss et al. (2014b), avaliando área sob diferentes sistemas de manejo, observaram que o SPC reduz os índices de agregação (DMP e DMG) e os teores de MOL e COT em relação à área de MN, SPD e pastagem, que recuperam apresentam valores próximos aos valores da MN.

**Tabela 9.** Teores de Carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COp); carbono orgânico associado aos minerais (COam) e matéria orgânica leve (MOL) em água nas áreas com diferentes sistemas de manejo, em Uberaba, MG.

Manejo	COT	COp	COam	MOL
	.....	.....g kg <sup>-1</sup> .....		
0 – 0,05 m				
SPC20	7,30 bA*	2,33 bA	4,97 bA	0,60 cA
SPD5	8,20 bA	4,48 aA	3,72 bA	0,80 bA
SPD17	8,82 bA	4,58 aA	4,24 bA	1,01 bA
MN	27,21 aA	4,95 aA	22,26 aA	2,20 aA
0,05 – 0,10 m				
SPC20	7,38 bA*	2,81 aA	4,57 bA	0,40 bA
SPD5	6,85 bA	2,65 aB	4,20 bA	0,41 bB
SPD17	7,68 bA	3,52 aA	4,16 bA	0,42 bB
MN	22,42 aB	2,17 aB	20,25 aA	1,51 aB
0,10 – 0,20 m				
SPC20	6,01 bA*	0,50 bB	5,51 bA	0,20 bB
SPD5	6,79 bA	2,71 aB	4,08 bA	0,32 bB
SPD17	6,18 bA	2,16 aB	4,02 bA	0,21 bB
MN	17,94 aC	2,51 aB	16,43 aB	0,60 aC
0,20 – 0,40 m				
SPC20	5,28 bA*	0,49 bB	4,79 bA	0,10 bB
SPD5	5,81 bA	0,90 bC	4,91 bA	0,20 bB
SPD17	5,10 bA	1,64 aB	3,46 bA	0,10 bB
MN	16,78 aC	2,31 aB	14,46 aB	0,60 aC
CV%	20,89	25,89	29,08	25,54

\* = Significativo ( $p<0,05$ ). Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna compararam tipos de manejo e maiúsculas na coluna compararam as profundidades no mesmo manejo, que não diferem entre si teste de Scott-Knott ( $p<0,05$ ). SPC20 = Sistema de plantio convencional há mais de 20 anos; SPD5 = Sistema de plantio direto há 5 anos; SPD17 = Sistema de plantio direto implantado há 17 anos; (SPD17); MN = Mata Nativa; CV% = Coeficiente de variação.

O fracionamento granulométrico da matéria orgânica do solo (MOS) consiste na separação de duas frações orgânicas, com base no tamanho das partículas, utilizando o peneiramento e sedimentação em proveta.

De forma geral, os maiores e os menores valores de COp e COam foram encontrados na MN e SPC20, respectivamente, enquanto que no SPD5 e SPD17 os valores foram superiores aos do SPC20, em todas as profundidades avaliadas. Estes maiores valores de COp nas áreas de MN, SPD5 e SPD17, quando comparados a SPC20 podem ser justificados pelo uso do solo sem revolvimento na área, pois a manutenção da serrapilheira na área de MN ou da palhada das plantas nas áreas em SPD5 e SPD17 proporcionam acúmulo de resíduos vegetais na camada superficial do

solo, que somados aos remanescentes do sistema radicular das plantas na área, aumenta o teor de matéria orgânica do solo.

Alguns estudos comprovam que o COp é uma fração eficiente em identificar alterações provocadas por práticas de manejo do solo ou da substituição de áreas naturais de MN e áreas cultivadas (PEREIRA et al., 2012).

De acordo Figueiredo et al. (2010), nas frações lábeis e estáveis da MOS sob diferentes sistemas de uso do solo, há uma correlação negativa entre COp e COam, mostrando que os processos de formação dessas frações são opostos, com isso, para que se tenha maiores teores de COam no solo é necessário que aumente a decomposição (diminuição) dos teores de COp, para associação com os minerais do solo nos tamanho silte e argila.

Este padrão não pode ser observado neste estudo, pois a área de MN, SPD5 e SPD17 apresentaram os maiores teores de COp nas profundidades de 0 – 0,05 e 0,1 – 0,2 m, entretanto, de 0,05 – 0,1 m os valores foram estatisticamente iguais em todos os tratamentos, e na profundidade de 0,2 a 0,4 m, as duas áreas com maior acumulo de resíduos sobre o solo (MN e SPD17) apresentaram valores superiores ( $p<0,05$ ), quando comparados a SDP5 e SPC20, indicando que o COp não foi decomposto e não passou a fazer parte do Coam, conforme observado por Loss et al. (2014).

Em áreas sob SPC é comum encontrar menores teores de COam em todas as profundidades, devido ao efeito negativo das práticas de aração e gradagem, que rompem os agregados do solo e expõe a matéria orgânica do solo (MOS) que estava protegida em seu interior, para serem decompostas pelos agentes microbianos (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992), entretanto, isto não foi observado neste estudo na área sob SPC20, que apresentou valores estatisticamente iguais ao SPD5 e SPD17, menores quando comparados a MN.

Estes três sistemas (SPC20, SPD5 e SPD17) parecem ter favorecido o armazenamento de carbono nesta fração mais fina (COam), retendo maior quantidade da MOS, o que indica que ocorreu maior decomposição do COp, que pode ser evidenciado nas profundidade de 0 – 0,05, 0,10 -0,20 e de 0,20 – 0,40 m neste estudo. Estes resultados são similares aos encontrados Costa et al. (2008), Siqueira neto et al. (2009) e Alvarez et al. (2011), onde as áreas cultivadas em SPC apresentam maiores emissões de carbono para a atmosfera quando comparadas com áreas menos mobilizadas, tais como as cultivadas em SPD ou aquela sem interferência antrópica, como a MN.

Resultados semelhantes foram observados por Pragana et al. (2012), que ao avaliar atributos biológicos e a dinâmica da matéria orgânica no cerrado, no estado do Piauí, observaram que na profundidade 0 a 0,05 m não houve efeito significativo do solo sobre o COp, na comparação com uma área de MN e área convertida em SPD.

O COam é normalmente menos modificado pelas diferentes formas de manejo adotadas, não apresentando, portanto, diferenças entre sistemas de manejo estudados. Em todas as profundidades a MN mostrou médias em torno de três a quatro vezes superiores às áreas cultivadas. Gazolla et al. (2015) observaram COam significativamente superior em sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) ao comparar as médias ao SPD, notaram também que o sistema ILP apresentou resultados superiores a MN. Santos et al. (2013) relataram que em área de floresta homogênea de eucalipto, os valores de Coam são superiores, quando comparados a MN.

Quanto aos valores da matéria orgânica leve (MOL), o SPC20 apresentou o menor teor dessa fração na camada de 0 – 0,05 m, quando comparado ao SPD5, SPD17 e MN. A ausência dos resíduos vegetais na superfície no SPC20 acelera a dinâmica do MOL no solo. Segundo Compton e Boone (2002), é fundamental a manutenção destes resíduos para que haja sustentabilidade dos sistemas de produção, uma vez que representa, em curto e médio prazo, alto potencial para ciclagem de nutrientes.

Dentre os compartimentos da matéria orgânica do solo, a MOL pode ser considerada um compartimento lento dentro da dinâmica do carbono e nitrogênio no solo (LEITE, 2002), com isso, deve-se buscar adotar sistemas de manejo que propiciem maiores teores de MOL no solo, optando por sistemas conservacionistas.

Comportamento semelhante foi relatado Guareschi et al. (2012), analisando os teores de MOL em sistema conservacionista no Cerrado em Goiás, onde foi estudado o SPD com 20 anos e área de MN. Os autores mostraram que em função do tempo de implantação do sistema ocorreu acréscimo no aporte desta fração na camada superficial (0 – 0,05 m) para as áreas analisadas, que após 20 anos, os teores de MOL do SPD foram iguais ao da MN. Pereira et al. (2011) identificaram redução nos teores de MOL com o aumento da profundidade, como também observado neste estudo.

A MN apresentou elevados valores de carbono da fração humina (C-HUM) e carbono da fração ácido fúlvico (C-FAF) com menor relação entre carbono da fração ácido húmico (C-FAH) e C-FAF (C-FAH/FAF) das frações húmicas da matéria orgânica do solo, em todas as profundidades avaliadas, quando comparado ao SPC20, SPD5 e SPD17 (Tabela 10).

Este predomínio da C-HUM na MN pode estar relacionado a maior relação C/N existente na serapilheira da MN, que não favorece a mineralização da matéria orgânica, formando substâncias húmicas mais estáveis. Com relação ao C-FAF, o valor foi significativamente menor no SPC20, quando comparado aos outros sistemas de manejo.

Nota-se que a fração humina (C-HUM) mostrou os maiores teores de C em comparação às demais frações, ácidos húmicos e fúlvicos, que pode estar ligado ao tamanho das moléculas e ao seu maior grau de estabilidade.

**Tabela 10.** Carbono da fração humina (C-HUM), carbono da fração ácido húmico (C-FAH), carbono da fração ácido fúlvico (C-FAF), relação entre C-FAH e C-FAF (C-FAH/FAF) das frações húmicas da matéria orgânica do solo sob diferentes manejos e profundidades.

Manejo	Carbono das frações húmicas			C-FAH/ C-FAF	
	C-HUM	C-FAH	C-FAF		
	g kg <sup>-1</sup>				
	0 – 0,05 m				
SPC20	4,74 bA*	0,87 cA	0,61 cA	1,65 aA	
SPD5	3,56 bA	1,56 bA	1,38 bA	1,13 aA	
SPD17	2,83 bA	1,51 bA	1,18 bA	1,29 aA	
MN	15,34 aA	1,98 aA	3,82 aA	0,53 bA	
	0,05 – 0,10 m				
SPC20	4,50 bA*	0,64 bA	0,77 bA	0,99 aB	
SPD5	2,40 cA	1,21 aA	1,21 bA	1,01 aA	
SPD17	2,43 cA	1,41 aA	1,21 bA	1,18 aA	
MN	13,53 aB	0,97 bA	3,57 aA	0,27 bA	
	0,10 – 0,20 m				
SPC20	4,60 bA*	0,69 aA	1,06 bA	0,78 aB	
SPD5	2,32 cA	1,03 aA	1,33 bA	0,79 aA	
SPD17	1,96 cA	0,84 aB	1,00 bA	0,85 aB	
MN	11,02 aC	0,78 aB	2,53 aB	0,27 bA	
	0,20 – 0,40 m				
SPC20	3,24 bA*	0,18 bB	0,34 cA	0,59 aB	
SPD5	3,19 bA	0,72 aB	1,19 bA	0,60 aA	
SPD17	1,13 cA	0,76 aB	0,97 bA	0,80 aB	
MN	10,32 aC	0,68 aB	2,53 aB	0,26 bA	
CV%	21,61	29,14	23,89	28,60	

\* = Significativo ( $p < 0,05$ ). Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna compararam tipos de manejo e maiúsculas na coluna compararam as profundidades no mesmo manejo, que não diferem entre si teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). SPC20 = Sistema de plantio convencional há mais de 20 anos; SPD5 = Sistema de plantio direto há 5 anos; SPD17 = Sistema de plantio direto implantado há 17 anos; (SPD17); MN = Mata Nativa; CV% = Coeficiente de variação.

De acordo com Fontana et al. (2006), as frações C-FAH e C-FAF, por proporcionarem menor estabilidade, podem ser translocadas para camadas mais profundas, serem mineralizadas ou polimerizadas, e diminuir, assim, seu teor residual no solo. Em estudos que foi avaliado o manejo dos solos também se notou predomínio do C-HUM, quando comparado às demais frações (Fontana et al., 2010; Campos et al., 2013; Guareschi et al., 2013b; Bezerra et al., 2013).

Estudando as frações da matéria orgânica em áreas com cultivo de eucalipto, pastagem e MN, Pulronik et al. (2009) notou-se resultados semelhantes para o C-HUM, justificando à influência mútua da matéria orgânica com a fração mineral, desenvolvendo complexos organo-minerais estáveis e/ou argilo-húmicos, confiando a esta fração resistência à degradação microbiana.

O SPD5 e SPD17 mostraram teores superiores no C-FAH em todas as camadas estudadas. O ácido húmico (AH) representa a fração intermediária no processo de estabilização dos compostos húmicos, com isso é um marcador natural do processo de humificação e refletem o uso e o manejo do solo (RANGEL; SILVA, 2007). A menor proporção de AH em profundidade sugere redução do aporte de carbono jovem ao sistema com reflexos negativos sobre a qualidade do húmus e atividade microbiana (CANELLAS et al., 2007).

A área de MN em relação as demais da pesquisa apresentou teores de C das substâncias húmicas expressivamente superior, esse acontecimento é justificado pelo maior estoque de serapilheira sobre o solo da MN beneficiando o processo de humificação da matéria orgânica colaborando para o aumento dos teores de C das substâncias húmicas. Kuzyakov e Domanski (2000) relatam que quando os componentes das espécies vegetais apresentam maiores concentrações de lignina e compostos aromáticos (maior relação C/N), esse material proporciona uma decomposição mais lenta, contribuindo para a conservação de substâncias orgânicas no solo.

A relação C-FAH/C-FAF é um fator a ser considerado para avaliação da qualidade do húmus que demonstra o grau de evolução do processo de humificação da matéria orgânica. De acordo com Ebeling et al. (2004), quando os valores desta relação são próximos ou igual à um distingue material de qualidade superior, que adequa o estabelecimento de bons atributos físicos e químicos do solo.

Pode-se observar, na relação FAH/FAF, nas profundidades 0 – 0,05 m nas áreas de SPD os valores tendem a 1,0, caracterizando o material de qualidade ótima, que

permitirá o estabelecimento de propriedades físicas e químicas favoráveis ao desenvolvimento das plantas. Giácomo et al. (2008) encontraram valores semelhantes na relação FAH/FAF nesta camada em um solo sob diferentes coberturas florestais.

Após este estudo podemos notar melhor a importância dos sistemas conservacionistas em relação aos cultivos convencionais, visualizando os resultados em relação a parte física do solo e a qualidade da matéria orgânica nos solos de cerrado, mostrando que através da implantação e manejo correto deste sistema, podemos ter melhores resultados na saúde de nossos solos e contribuir com sua manutenção ao longo de seus ciclos de cultivo.

## **5.CONCLUSÕES**

O sistema de plantio convencional juntamente com o sistema de plantio direto apresentou adensamento na camada mais superficial, porém sem causar restrição ao desenvolvimento das raízes.

A densidade do solo foi o atributo físico que se correlacionou significativamente com todos os outros avaliados.

O sistema plantio direto 17 e 5 anos com o sistema plantio convencional 20 anos, foram os sistemas que apresentaram valores mais próximos de atributos físicos em relação a mata nativa respectivamente.

As alterações provocadas pelo manejo são mais perceptíveis até a camada de 0,20 m nos sistemas.

Ambos os sistemas de plantio direto e mata nativa apresentaram maior teor de matéria orgânica e estoque de carbono no solo, apresentando os melhores indicadores de estabilidade.

O sistema plantio convencional 20 anos e os sistemas de plantio apresentaram valores de COT, COp, Coam e MOL iguais e inferiores em relação a mata nativa.

Os sistemas de plantio direto e mata nativa apresentou o predomínio da fração humina, demonstrando o efeito do sistema conservacionista para essa fração.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

ALBUQUERQUE, J.A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeitos da integração  
lavoura/pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho.  
**Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 717-723, 2001. DOI:  
<https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000300021>

ALVARENGA, C.C. **Indicadores hidrológicos do solo para identificação de áreas potenciais de recarga subterrânea.**, 81f. Dissertação (Mestrado Engenharia Agrícola) Viçosa – MG, Universidade Federal de Lavras – UFLA, 2010.

ALVAREZ, C. R.; COSTANTINI, A. J.; BONO, A.; TABOADA. M. A.; BOEM; F. H. G.; FERNÁNDEZ, P. L.; PRYSTUPA, P. Distribution and vertical stratification of carbon and nitrogen in soil under different managements in the pampean region of Argentina. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 35, n. 6, p. 1985-1994, 2011. DOI:  
<https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600015>

ALVES, M.C.; SUZUKI, L.G.A.S.; SUZUKI, L.E.A.S. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico em recuperação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 617-625, 2007. DOI:  
<https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000400002>

ANDERSON, J. M.; INGRAM, J. S. I. **Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods**. Wallingford: CAB International, 1989.

ANDREOLA, F.; COSTA, L.M.; OLSZEVSKI, N. Influência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e, ou, mineral sobre as propriedades físicas de uma Terra Roxa Estruturada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 857-865, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832000000400017>

ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo em sistema de plantio direto. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**, SBCS, p. 873-928, 2007.

ARAUJO, M. A.; TORMENA, C.A.; INOUE, T. T.; COSTA, A. C. S. Efeitos da escarificação na qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférrico após treze anos de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.3, p.459-504, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000300011>

ARSHAD, M.A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J., Eds. Methods for assessing soil quality. **Soil Science Society of American Journal**, p.123-141, 1996. DOI:  
<https://doi.org/10.2136/sssaspecpub49.c7>

BARBOSA, T.R.L. **Atributos físicos do solo sob espécies florestais da mata atlântica na região serrana fluminense**. 81f. (Dissertação de mestrado) Universidade Estadual Do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes – RJ, 2012.

BAVER, L.D., GARDNER, W.H., GARDNER, W.R. Soil structure: classification and genesis. In: Baver, L.D., Gardner, W.H., Gardner, W.R. (eds.). **Soil physics**, p.130-177, 1973.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, n.7, p.677-683, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000700009>

BENITES, V. M.; MADARI, B.; MACHADO, P. L. O. A. Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: um procedimento simplificado de baixo custo. **Embrapa Solos**, p. 7, 2003.

BERGAMIN, A. C.; VITORINO, A. C. T.; FRANCHINI, J. C.; SOUZA C. M. A.; SOUZA, F. R. Compactação em um Latossolo Vermelho distroférrego e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300009>

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J. & ZOLDAN JUNIOR, W.A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 155-163, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000100015>

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C.; SILVA, A.P. Efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 787-794, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000500004>

BEZERRA, R. P. M.; LOSS, A.; PEREIRA; M. G; PERIN, A. Formas de carbono em Latossolo sob sistemas de plantio direto e integração lavoura-pecuária no cerrado, Goiás. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 6, p. 2637-2654, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n6p2637>

BHATTACHARYYA, R.; PRAKASH, V.; KUNDU, S.; SRIVASTVA, A.K; GUPTA, H.S. Soil aggregation and organic matter in a sandy clay loam soil of the Indian Himalayas under different tillage and crop regimes. **Agriculture, Ecosystems e Environment**, n. 132, p. 126-134, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.03.007>

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. ed., Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods. American Society of Agronomy, **Soil Science Society of America**, p. 363-375, 1986. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c13>

BORTOLON, E. S. O.; MIELNICZUK, J.; TORNQUIST, C. G.; LOPES, F.; FERNANDES, F. F. Simulação da dinâmica do carbono e nitrogênio em um Argissolo do Rio Grande do Sul usando modelo Century. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1635-1646, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000600012>

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades do solo.** Tradução técnica: Iago Fernando Lepsch, Bookman. p. 686, 2013.

BRANDÃO, E. D.; SILVA, I. D. F. (2012). Formação e estabilização de agregados pelo sistema radicular de braquiária em um Nitossolo Vermelho. **Ciência Rural**, v. 42, p. 1193-1199. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782012000700009>

BUHLER, D. D. Influence of tillage systems on weed population dynamics and management in corn and soybean in the central USA. **Crop Science, Madison**, v.35, n.5, p. 1247-58, 1995.  
DOI:<https://doi.org/10.2135/cropsci1995.0011183X003500050001x>

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas.** Piracicaba: ESALQ, p. 132, 1997.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v.56, p. 777-783, 1992. DOI:  
<https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>

CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICOLODI, R.; RUEDELL, J.; PETRERE, C. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.19, p. 121-126, 1995.

CANELLAS, L.P. et al. Estoque e qualidade da matéria orgânica de um solo cultivado com cana-de-açúcar por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p. 331-340, 2007. Disponível em:. Acesso em: 19 dez. 2017. DOI:  
<https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000200015>

CARDOSO, E. L.; SILVA, M. L. N.; SILVA, C. A.; CURI, N.; FREITAS, D. A. F. Estoques de carbono e nitrogênio em solo sob florestas nativas e pastagens no bioma Pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, p. 1028-1035, 2010. DOI:  
<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000900013>

CARVALHO FILHO, M.F.C. & SANTOS, M.; Setor Sucroalcooleiro em Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, v. 28, n. 239, p. 7 - 11, 2007.

CARVALHO, A. J. A.; SOUZA, E. H.; MARQUES, C. T. S.; GAMA, E. V. S.; NACIF, P. G. S. Caracterização física dos solos dos quintais agroflorestais e cultivos monotípicos na região de Amargosa, Bahia. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 2, n. 2, p. 941-944, 2007.

CARVALHO, E.J.M.; FIGUEIREDO, M.S.; COSTA, L.M. (1999) Comportamento físico hídrico de um Podzólico Vermelho-Amarelo Câmbico fase terraço sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, p.257- 265. DOI:  
<https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000200015>

CASÃO JUNIOR, R.; SIQUEIRA, R.; MEHTA, Y. R.; PASSINI, J. J.; **Sistema plantio direto com qualidade.** Londrina: IAPAR, Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional; 2006.

CENTURION, J. F.; CARDOSO, J. P.; NATALE, W. Physical and chemical properties of an oxisol in different agroecosystems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, p.416-424, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662001000200013>

CENTURION, J. F.; FREDDI, O. S.; ARATANI, R. G.; ETZNER, A. F. M.; BEUTLER, A. N.; ANDRIOLI, I. Influência do cultivo da cana-de-açúcar e da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos Vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 199-209, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000200002>

CERRI, C. E. P.; FEIGL, B.; CERRI, C. C. **Dinâmica da matéria orgânica do solo na Amazônia**. Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais, v. 2, p. 325-358 2008.

CHRISTENSEN, B. T.; Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. **European Journal of Soil Science**, v. 52, p.345–353, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2001.00417.x>

COLLINS, H. P.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K.; ELLIOTT, E. T. **Characterization of soil organic carbon relative to its stability and turnover**, In: Soil organic matter in temperate agroecosystems - long-term experiments in North America, Boca Raton, CRC Press, p.51-72, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780367811693-3>

COMPTON, J. E. & BOONE, R. D. Soil nitrogen transformations and the role of light fraction organic matter in forest soils. **Soil Biology, and Biochemistry**, v.34, p.933-943, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00025-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00025-1)

COSTA, F. S.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C. **Emissões de gases do efeito estufa em agroecossistemas e potencial de mitigação**. Fundamentos da matéria orgânica do solo - ecossistemas tropicais e subtropicais. 2 ed. Porto Alegre: Metrópole, v. 1, p. 545-559. 2008.

COSTA, M.G.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; ZAIA, F.C.; GAMA-RODRIGUES, E.F. (2014) Leguminosas arbóreas para recuperação de áreas degradadas com pastagem em Conceição de Macabu, Rio de Janeiro, Brasil. **Scientia Forestalis**, v.42, p.1 01-112.

COUTINHO, F. S.; LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; RODRIGUES JÚNIOR, D. J.; TORRES, J. L. R. Estabilidade de agregados e distribuição do carbono em Latossolo sob sistema plantio direto em Uberaba, Minas Gerais. **Comunicata Scientiae**, v. 1, n. 2, p. 100-105, 2010.

CRUZ, A.C.R.; PAULETO, E.A.; FLORES, C.A.; SILVA, J.B. Atributos físicos e carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.1105-1112, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000600015>

DE MARIA, I.C.; CASTRO, O.M.; SOUZA DIAS, H. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do

solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.703-709, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000300025>

DEMARCHI, J.C.; PERUSI, M.C.; PIROLI, E.D. Análise da estabilidade de agregados de solos da microbacia do Ribeirão São Domingos, Santa Cruz do Rio Pardo - SP, sob diferentes tipos de uso e ocupação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**. v.4,p.7-29, 2011. DOI: <https://doi.org/10.5777/PAeT.V4.N2.01>

DENEF, K.; STEWART, C.E.; BRENNER, J.; PAUSTIAN, K. Does long-term center-pivot irrigation increase soil carbon stocks in semi-arid agro-ecosystems? **Geoderma**, v. 145, p. 121-129, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.03.002>

EBELING, A. G.; ESPINDULA, A.; VALLADARES, G. S.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G. Propriedades químicas como indicadores ambientais em organossolos no estado do Rio de Janeiro. **Revista Universidade Rural**, Série Ciências da Vida, v. 24, n.1, p.1-6, 2004.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa, v. 2, p. 212, 1997.

EMBRAPA. **Determinação da densidade de solos e de horizontes cascalhentos**. Comunicado técnico. Sete Lagoas, 2008.

EMBRAPA. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, p. 370, 1999.

FEBRAPDP. **FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA. Evolução do plantio direto no Brasil**. Disponível em <<http://www.febrapdp.org.br/port/plantiodireto.html>>. Acesso em: 22 mar. 2017.

FERNANDES. F. A.; FERNANDES, A .H. B. M. Atualização dos métodos de cálculo de estoques de carbono do solo sob diferentes condições de manejo. Corumbá: Embrapa Pantanal, (**Embrapa Pantanal. Comunicado Técnico**, 95), p. 5, 2013

FERREIRA, F.P., AZEVEDO, A.C., DALMOLIN, R.S.D., GIRELLI, D. Carbono orgânico, óxidos de ferro e distribuição de agregados em dois solos derivados de basalto no Rio Grande do Sul–Brasil. **Ciência Rural**, v.37, p.381-388, 2007.. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782007000200013>

FIGUEIREDO, C. C.; RAMOS, M. L. G.; TOSTES, R. Propriedades físicas e matéria orgânica de um LATOSOLO VERMELHO sob sistemas de manejo e cerrado nativo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.24, n.3, p.24-30, jul./set. 2000.

FIGUEIREDO, C. C.; RESCK, D. V. S.; CARNEIRO, M. A. C. Frações lábeis e estáveis da matéria orgânica do solo sob sistemas de manejo e cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 907-916, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300032>

FONTANA, A.; BRITO, R. J.; PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; BENITES, V. M. Caracterização de susbtâncias húmicas da camada superficial do solo sob diferentes coberturas vegetais. **Magistra**, v. 22, n. 1, p. 49-56, 2010.

FONTANA, A.; PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; CUNHA, T. J. F.; SALTON, J. C. Atributos de fertilidade e frações húmicas de um Latossolo Vermelho no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.5, p.847-853, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000500018>

FREDDI, O.S.; CARVALHO, M.P.; VERONESI JÚNIOR, V.; CARVALHO, G.J. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. **Engenharia Agrícola**, v. 26, p. 113-121, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162006000100013>

GAZOLLA, P. R.; GUARESCHI, R. F.; PERIN, A.; PEREIRA, M. G.; ROSSI, C. Q. Fractions of soil organic matter under pasture, tillage system and crop-livestock integration. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, n. 2, p. 693-704, 2015.

GIÁCOMO, R. G.; PEREIRA, M. G.; BALIEIRO, F. C. Estoques de carbono e nitrogênio e distribuição das frações húmicas no solo sob diferentes coberturas florestais. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 3, n. 1, p. 42-48, 2008. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v3i1a255>

GIRARDELLO, V.C.; Amado, T.J.C.; Santi, A.L.; Cherubin, M.R.; Kunz, J.; Teixeira, T.G. Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1234-1244, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000400020>

GOLCHIN, A.; OADES, J. M.; SKJEMSTAD, J. O. P. CLARKE, P. Soil structure and carbon cycling. **Australian Journal of Soil Research**, v.32, p.1043- 1068, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR9941043>

GOMES, M.A.F.; FILIZOLA, H.F. **Indicadores físicos e químicos de qualidade de solo de interesse agrícola**. Embrapa Meio Ambiente. Jaguariúna, p. 8, 2006.

GONÇALVES, J. L. M.; MENDES, K. C. F. S.; SASAKI, C. M. Mineralização de nitrogênio em ecossistemas florestais naturais e implantados do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n.3, p. 601-616, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000300009>

GRACE, P.; LADD, J. N.; ROBERTSON, G. P.; GAGE, S. S. A simple model for predicting long-term changes in soil organic carbon in terrestrial ecosystems, **Soil Biology & Biochemistry**, v.38, p.1172–1176, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.09.013>

GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Deposição de resíduos vegetais, matéria orgânica leve, estoques de carbono e nitrogênio e fósforo remanescente sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado goiano. **Revista Brasileira de Ciência do**

**Solo**, v. 36, n. 3, p. 909-920, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000300021>.

HERNANI, L.C.; SALTON, J.C. Atributos de solo e produtividade de culturas em sistemas de manejo conduzidos por dezesseis anos. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, v. 54, p. 1-63, 2009.

HICKMANN, C.; COSTA, L.M.; SCHAEFER, C.E.G.; FERNANDES, R.B.A.; ANDRADE, C.L.T. Atributos físico-hídricos e carbono orgânico de um argissolo após 23 anos de diferentes manejos. **Caatinga**, v.25, n.1, p.128-136, 2012.

HU, W.; SHAO, M. A.; WANG, Q. J.; REICHARDT, K. Soil water content temporal spatial variability of the surface layer of a Loess Plateau hillside in China. **Scientia Agrícola**, v. 65, n. 3, p. 277-289, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000300008>

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (Brasil). **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**, 2018. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>. Acesso em: 12 jan. 2018.  
Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Informações sobre as condições climáticas do município de Uberaba-MG. <http://www.inmet.gov.br>

ISLAM, K.R.; WEIL, R. R. Soil quality indicator properties in midAtlantic soils as influenced by conservation management. **Journal of Soil and Water Conservation**. v. 55, p.69-79, 2000.

JANZEN, H. H.; CAMPBELL, C. A.; BRANDT, S. A.; LAFOND, G. P.; TOWNLEY-SMITH, L. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations, **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, p.1799-1806, 1992. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600060025x>

JONG VAN LIER, Q. Física do solo. Viçosa: MG, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. v. 1, p. 298, 2010.

KATO, E. **Efeito da queimada na estabilidade de agregados, na resistência ao selamento superficial e na taxa de infiltração de água em solos de cerrado**. 2001. 58f. Tese (Doutorado em Ecologia) – Curso de Pós-graduação em Ecologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2001.

KEMPER, W. D., CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregation. In: Black, C.A. (ed.) Methods of Soils Analysis. **American Society of Agronomy**, v. 39, p. 499- 510 1965.

KIEHL, E. J. Manual de Edafologia. 1.ed. São Paulo: **Agronômica Ceres**, p. 262, 1979.

KLEIN, V.A.; LIBARDI P.L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 857-867, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000400003>

KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F. Desempenho de culturas anuais sobre palhada de braquiária. Integração lavoura-pecuária.. Santo Antonio de Goiás: **Embrapa Arroz e Feijão**, v. 1, p. 131-141, 2003.

KÖPPEN, W. **Climatología**: con un estudio de los climas de la tierra. Mexico: Fondo de Cultura Econômica, p. 478, 1948.

KUZYAKOV, Y.; DOMANSKI, G. Carbon input by plants into the soil. **Journal Plant Nutrition and Soil Science**, v. 163, p. 421-431, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1002/1522-2624\(200008\)163:4<421::AID-JPLN421>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/1522-2624(200008)163:4<421::AID-JPLN421>3.0.CO;2-R)

LAGO, W.N.M.; LACERDA, M.P.C; NEUMANN, M.R.B. Indicadores de qualidade dos solos na microbacia do Ribeirão Extrema, DF: Parte II. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 721-729, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000700004>

LAL, R. Soil carbon sequestration in Latin America. In: LAL, R.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J.; CERRI, E. (Eds), **Carbon sequestration in soil of Latin America**. FPP, New York, p. 554, 2006.

LEITE, L.F.C. **Compartimentos e dinâmica da matéria orgânica do solo sob diferentes manejos e sua simulação pelo modelo**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, p. 142, 2002.

LIMA, J.S.S.; SILVA, S.A.; SILVA, J.M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado em plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**. v.44, p.16-23, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902013000100003>

LOSS A, PEREIRA M. G.; SCHULTZ, N.; ANJOS, L. H. C.; SILVA, EMR. Atributos químicos e físicos de um Argissolo Vermelho-Amarelo em sistema integrado de produção agroecológica. **Pesquisa agropecuária. brasileira.**, Brasília.v.44, p. 68-75 2009a. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000100010>

LOSS, A. **Dinâmica da matéria orgânica, fertilidade e agregação do solo em áreas sob diferentes sistemas de uso no Cerrado Goiano**. 2011. 122f. (Tese de Doutorado). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica, RJ, 2011.

LOSS, A., M.G. PEREIRA, A. PERIN & L.H.C. ANJOS. A. Carbon and Nitrogen Content and Stock in No- Tillage and Crop-livestock Integration Systems in the Cerrado of Goias State, Brazil. **Journal of Agricultural Science**, v. 4, p. 96-105 2012. DOI: <https://doi.org/10.5539/jas.v4n8p96>

LOSS, A., M.G. PEREIRA, N. SCHULTZ, E.P. FERREIRA, E.M.R. SILVA & S.J. BEUTLER. Distribuição dos agregados e carbono orgânico influenciados por manejos agroecológicos. **Acta Scientiarum. Agronomy** 31: 523-528, 2009b.DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v31i3.322>

LOSS, A.; COSTA, E.M.; M.G. PEREIRA; S.J. BEUTLER, Agregação, matéria orgânica leve e carbono mineralizável em agregados do solo. **Revista de la Facultad de Agronomía**, v. 113, n.1, p.1-8, 2014a.

LOSS, A.; M.G. PEREIRA; COSTA, E.M.; S.J. BEUTLER, Frações granulométricas e oxidáveis de matéria orgânica sob diferentes sistemas de uso do solo, no Paraná, Brasil. **Bioscience Journal**, v. 30, n.1, p. 43-54, 2014b.

LOSS, A.; MORAES, A. G. L.; PEREIRA, M. G.; SILVA, E. M. R.; ANJOS, L. H. C. Carbono, matéria orgânica leve e frações oxidáveis do carbono orgânico sob diferentes sistemas de produção orgânica. **Comunicata Scientiae**, v.1, p.57-64, 2010.

MACEDO, M.C.M. Integração lavoura-pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.28, p.133-146, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982009001300015>

**MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.** 2011. Programa Agricultura de Baixo Carbono. Disponível em <<http://www.agricultura.gov.br/abc>>. Acesso em: 05 jan. 2018.

MCBRIDE, R.A.; BOBER, M.L. Are-examination of alternative test procedures for soil consistency limit determination: I. A compression-based procedure. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.53, p.178- 183, 1989. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300010033x>

MCPHEE, J.E.; AIRD, P.L.; HARDIE, M.A.; CORKREY, S.R. The effect of controlled traffic on soil physical properties and tillage requirements for vegetable production. **Soil and Tillage Research**, v.149, p.33-45, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.12.018>

MENDONÇA, V. Z.; MELLO, L. M. M.; ANDREOTTI, M.; PEREIRA, F. C. B. L.; LIMA, R. C.; VALÉRIO FILHO, W. V.; YANO, E. H.; Avaliação dos atributos físicos do solo em consórcio de forrageiras, milho em sucessão com soja em região de cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.9, p.37-251, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000100026>

MICHELON, C. J. et al. Qualidade física de solos irrigados do Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural, Santa Maria**, v.37, n.5, p. 1308-1315, set./out. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782007000500014>

MIELNICZUK, J. **Matéria Orgânica e Sustentabilidade de Sistemas Agrícolas.** Fundamentos da matéria orgânica do solo - ecossistemas tropicais e subtropicais, Pto Alegre, v. 2, p. 1-59, 2008.

MORAES, M.T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J.C.; SILVA, V.R.; LUZ, F.B. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.155, p.351-362, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.07.015>

MOTTER, P.; ALMIEDA, H. G. **Plantio direto:** a tecnologia que revolucionou a agricultura brasileira. Foz do Iguaçu: Parque Itaipu, 2015. 144 p.

NEVES, C. M. N. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; CARDOSO, E. L.; MACEDO, R. L. G.; FERREIRA, M. M.; SOUZA, F. S. Atributos indicadores da qualidade do solo

em sistema agrossilvipastoril no noroeste do Estado de Minas Gerais. **Scientia Forestalis** v.74, p.45-53, 2007.

NICOLOSO, R. S. **Dinâmica da matéria orgânica do solo em áreas de integração lavoura pecuária sob sistema de plantio direto**. 2005. 149f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Curso de Pós-Graduação em Ciências do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2005.

OADES, J.M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and Soil**, v. 76, p. 319-337, 1984. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-009-6101-2\\_28](https://doi.org/10.1007/978-94-009-6101-2_28)

PEREIRA M. G., LOSS A., BEUTLER S. J., TORRES J. L. R. Carbono, matéria orgânica leve e fósforo remanescente em diferentes sistemas de manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 5, p. 508-514, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000500010>

PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; BEUTLER, S. J.; TORRES, J. L. R. Carbono, matéria orgânica leve e fósforo remanescente em diferentes sistemas de manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 5, p. 508-514, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000500010>

PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; BEUTLER, S. J.; TORRES, J. L. R. Granulometric and humic fractions carbono stocks of soil organic matter under no-tillage system in Uberaba, Brazil. **Tropical and Subtropical Agroecosystems, Mérida**, v. 15, n. 1, p. 1-13, 2012.

PEREIRA, M. G.; LOSS, A; BEUTLER, S. J.; TORRES, J. L. R. Carbono, matéria orgânica leve e fósforo remanescente em áreas de Cerrado sob plantio direto, MG. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, p.1-6, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000500010>

PEZARICO, C. R.; VITORINO, A.C.T.; MERCANTE, F.M.; DANIEL, O. Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroflorestais. **Revista Ciência Agronômica**. v.56, p.40-7, 2013. DOI: <https://doi.org/10.4322/rca.2013.004>

PINHEIRO, E. F. M.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. Aggregates distribution and soil organic matter under different tillage system for vegetable crops in a Red Latosol from Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.77, p.79-84 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2003.11.005>

PRAGANA, R. B.; NÓBREGA, R. S. A.; RIBEIRO, M. R.; LUSTOSA FILHO, J. F. Atributos biológicos e dinâmica da matéria orgânica em Latossolos Amarelos na região do Cerrado piauiense sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 3, p. 851-858, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000300015>

PULROLNIK, K.; BARROS, N.F.; SILVA, I.R.; NOVAIS, R.F. & BRANDANI, C.B. Estoques de carbono e nitrogênio em frações lábeis e estáveis da matéria orgânica de solos sob eucalipto, pastagem e cerrado no Vale do Jequitinhonha - MG. **Revista**

**Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p.1125-1136, 2009. DOI:  
<https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000500006>

RALISCH, R.; MIRANDA, T. M.; OKUMURA, R. S.; BARBOSA, G. M. C.; GUIMARÃES, M. F.; SCOPEL, E.; BALBINO, L. C. Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho Amarelo do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 4, p. 381-384, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000400008>

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A.; GUIMARÃES, P. T. G.; GUILHERME, L. R. G. Frações oxidáveis do carbono orgânico de Latossolo cultivado com cafeiro em diferentes espaçamentos de plantio. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, p.429-437, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000200013>

RANGEL, O.J.P.; SILVA, C.A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1609-1623, 2007. Disponível em: . Acesso em: 30 jun. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000600037>

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Editora Manole, v. 2, p. 500, 2012.

REICHERT JM, SUZUKI LEAS, REINERT DJ, HORN R, HÅKANSSON I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v. 102, p.242-254, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002>

REINERT, D.J.; ALBUQUERQUE, J.A.; REICHERT, J.M.; AITA, C. & ANDRADA, M.M.C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em argissolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p.1805-1816, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500002>

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O.R.; LLANILLO, R.F. & FERREIRA, R. Compactação do solo: Causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 26, p. 321-344, 2005. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2005v26n3p321>

ROSCOE, R. & MACHADO, P. L. O. A. **Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica**, Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, p. 86, 2002.

ROSCOE, R.; BUURMAN, P. Tillage effects on soil organic matter in density fractions of a Cerrado Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v.70, p.107-119, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00160-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00160-5)

ROSSETTI, K. V.; ANDRIOLI, I.; CENTURION, J. F.; MATIAS, S. S. R.; NOBREGA, J. C. A.; Atributos físicos do solo em diferentes condições de cobertura vegetal em área de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 7, n. 3, p. 426-432, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v7i3a1681>

ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M. G.; GIÁCOMO, S. G.; BETTA, M.; POLIDORO, J. C. Frações lábeis da matéria orgânica em sistema de cultivo com palha de braquiária e sorgo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 1, p. 38-46, 2012.

SÁ, J. C. M.; CERRI, C. C.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. E.; FORNARI, A.; Sá, M. F. M.; VENZKE FILHO, S. P.; SEGUY, L.; BOUZINAC, S.; PAULLETI, V. O plantio direto como base do sistema de produção visando o sequestro de carbono. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v.84, p.45-61, 2004.

SALTON, J.C. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v.32, n.1, p.11-21, 2008a. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100002>

SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P.C.; FABRICIO, A.C.; MACEDO, M.C.M.; BROCH, D.L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.11-21, 2008b. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100002>

SANTOS, D. C.; FARIA, M. O.; LIMA, C. L. R.; KUNDE, R. J.; PILLON, C. N.; FLORES, C. A. Fracionamento químico e físico da matéria orgânica de um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso. **Ciência Rural**, v. 43, n. 5, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013005000037>

SANTOS, F.S.; ZANÃO JUNIOR, L.A.; SECCO, D.; DIAS, P.P.; TOMASSONI, F.; PEREIRA, N. A utilização de plantas de cobertura na recuperação de solos compactados. **Acta Iguazu**. v.3, p.82-91, 2014.

SANTOS, G. G. **Impacto de sistemas de integração lavoura-pecuária na qualidade física do solo**. Goiânia: UFG. Tese Doutorado, p. 122, 2010.

SANTOS, H. G. DOS, JACOMINE, P. K. T., ANJOS, L. H. C. DOS, OLIVEIRA, V. A. DE, LUMBRERAS, J. F., COELHO, M. R., ALMEIDA, J. A. DE, CUNHA, T. J. F., OLIVEIRA, J. B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**, Embrapa, v. 3, p. 353, 2013.

SENE M, VEPRASKAS MJ, NADERMAN GC, DENTON HP. Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. **Soil Science Society of America Journal**. v.49, p.422-427, 1985. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1985.03615995004900020030x>

SILVA, A.A.; GALON, L.; FERREIRA, F.A.; TIRLONI, S.P.; FERREIRA, E.A.; SILVA, A.F.; AGNES, E.L. Sistema de plantio direto na palhada e seu impacto na agricultura brasileira. **Revista Ceres**, v.56, p. 496-506, 2009.

SILVA, G.J.; VALADÃO JÚNIOR, D.D.; BIANCHINI, A.; AZEVEDO, E.C.; MAIA, J.C.S. Variação de atributos físico-hídricos em Latossolo Vermelho-amarelo do cerrado Mato-grossense sob diferentes formas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.5, p.2135-2143, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500034>

SILVA, R. H.; ROsolem, C. A. Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, n.2, p.253-260, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000200001>

SILVEIRA, P. M. Efeitos do manejo do solo sob plantio direto e de culturas na densidade e porosidade de um Latossolo. **Bioscience Journal**, v. 24, n. 3, p. 53-59, 2008.

SILVEIRA, P.M.; SILVA, J.H.; LOBO JUNIOR, M.; CUNHA, P.C.R. Atributos do solo e produtividade do milho e do feijoeiro irrigado sob sistema integração lavoura pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v.46, n.10, p.1170-1175, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000008>

SIQUEIRA NETO, M.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. J.; VENZKE FILHO, S. P.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Rotação de culturas no sistema plantio direto em Tibagi (PR): Emissões de CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>O. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.4, p.1023-1029, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400026>

SIQUEIRA NETO, M.; PICCOLO, M. D. C.; COSTA JUNIOR, C.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M. Greenhouse gas emission caused by different land-uses in brazilian Savannah. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, p. 63-76, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000100006>

SOUZA, A. L.; BOINA, A.; SOARES, C. P. B.; VITAL, B. R.; GASPAR, R. O.; LANA, J. M. Estrutura fitossociológica, estoques de volume, biomassa, carbono e dióxido de carbono em floresta estacional semidecidual. **Revista Árvore**, v.36, n.1, p.169-179, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000100018>

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry**. New York: Wiley & Sons, p. 198, 1982.

STEVENSON, F. J. **Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions** Wiley-Interscience. New York, p. 496, 1994.

STOLF R, MURAKAMI JH, BRUGNARO C, SILVA LG, MARGARIDO LAC. Penetrômetro de impacto Stolf - programa computacional de dados em EXCEL-VBA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.774-782, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000300009>

STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.25, p395-401, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000200015>

STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M.; MOREIRA, J.A. **Atributos físico-hídricos do solo sob plantio direto**. Embrapa Arroz e Feijão, p. 39, 2006.

SUZUKI, L.E.A.S.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & LIMA, C.L.R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, p. 1159-1167, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000800013>

SWIFT, R. S. Organic matter characterization, In: SPARKS, D. L.; PAGE, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATABAI, M. A.; JOHNSTON, C. T.; SUMNER, M. E. (Ed.). Methods of soil analysis, Madison: **Soil Science Society of America**: American Society of Agronomy, p.1011-1020, 1996.

TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Compressibility of Oxisol aggregates under no-till in response to soil water potential. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33 p.1525-1533, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000600002>

TAYLOR, S.A.; ASHCROFT, G.L. Physical edaphology - **The physics of irrigated and nonirrigated soils**. W.H. Freeman, San Francisco, 1972.

TEIXEIRA, P. C., DONAGEMMA, G. K., FONTANA, A., TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa, v. 2, p. 573, 2017.

TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, M. **Decifrando a Terra**. Companhia Editora Nacional, v. 3, 2009.

TIMM, L.C.; PIRES, L.F.; ROVERATTI, R.; ARTHUR, R.C.J.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA, J. C.M. & BACCHI, O.O.S. Field spatial and temporal patterns of soil water content and bulk density changes. **Scientia Agricola**. v.63 p.55-64, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162006000100009>

TISDALL, J.M. & OADES, J.M. Organic matter and waterstable aggregates in soil. **Journal of Soil Science**. v.33 p.141-163, 1982. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>

TORRES, J. L. R.; MAZETTO JÚNIOR, J. C.; SILVA JÚNIOR, J.; VIEIRA, D. M. S.; SOUZA, Z.M.; ASSIS, R. L.; LEMES. E.M. Soil physical attributes and organic matter accumulation under no-tillage systems in the Cerrado. **Soil Research**, v.57, n.7, p.712-718, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR19047>

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; ASSIS, R. L. de; SOUZA, Z. M. de. Atributos físicos de um latossolo vermelho cultivado com plantas de cobertura, em semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 428-437, 2015a. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140597>

TORRES, J.L.R.; COSTA, D.D.A.; SILVA NETO, O.F.; ARAÚJO, A.S.; SILVA, V.R.; VIEIRA, D.M.S. Avaliação da resistência à penetração e densidade do solo num Latossolo sob semeadura direta há doze anos. **Global Science and Technology**, v. 08, n. 01, p.131 – 140, 2015b. DOI: <https://doi.org/10.14688/1984-3801/gst.v8n1p131-140>

TORRES, J.L.R.; PEREIRA, M.G.; RODRIGUES JUNIOR, D.J.; LOSS, A. Production, decomposition of residues and yield of maize and soybeans grown on cover crops. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.46, n.3, p.451-459, 2015c. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20150026>

TORRES, J.L.R.; ARAUJO, A.S.; BARRETO, A.C.; SILVA NETO, O.F.; SILVA, V.R.; VIEIRA, D.M.S. Desenvolvimento e produtividade da couve-flor e repolho

influenciados por tipos de cobertura do solo. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 33, n.4, p. 510-514, 2015d. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-053620150000400017>

TORRES, J.L.R.; FABIAN, A.J.; PEREIRA, M.G. Alterações dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 35, p. 437-45, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000300001>

TORRES, J.L.R.; PEREIRA, M.G. Dinâmica do potássio nos resíduos vegetais de plantas de cobertura no Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p.1609-18, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000400025>

TORRES, J.L.R.; RODRIGUES JUNIOR, D, J.; SENE, G.A.; JAIME, D.G.; VIEIRA, D.M.S. Resistência à penetração em área de pastagem de capim Tifton, influenciada pelo pisoteio e irrigação. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.28, n.1, p.232-239, 2012.

UBERABA (MG). Secretaria de Desenvolvimento Econômico e Turismo. **Uberaba em dados**. Uberaba: Prefeitura municipal, 2009. 23 p. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/prefeituradeuberaba/uberaba-em-dados-17>. Acesso em: 30 out. 2017.

VASCONCELOS, L. G. T., KATO, O. R., & VASCONCELOS, S. S. **Matéria orgânica leve do solo em sistema agroflorestal de corte e Trituração sob manejo de capoeira**. Embrapa Amazônia Oriental-Artigo em periódico indexado 2012

VEZZANI, F.M.; CONCEIÇÃO, P.C.; MELLO, N.A. & DIECKOW, J. **Matéria orgânica e qualidade do solo. Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre, Cinco Continentes, v. 2, p. 483-494, 2008.

VEZZANI, F.M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.1, p.213-223, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000100020>

VIANA, E. T.; BATISTA, M. A.; TORMENA, C. A.; COSTA, A. C. S.; INOUE, T. T. Atributos físicos e carbono orgânico em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 2105-2114, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600025>

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; NEVES J. C. L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, p.487-94, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005000500010>

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.19, p.1467-1476, 1988. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103628809368027>

ZHANG, H.; HARTGE, K.H.; RINGE, H. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactability. **Soil Science Society of America**

**Journal**, Madison, v.61, n.1, p.239-245, 1997. DOI:  
<https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010033x>