

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

Daniela Basso Facco

**ATRIBUTOS QUÍMICOS E MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO SOB
DIFERENTES MANEJOS EM LATOSSOLO DO CERRADO**

Santa Maria, RS
2020

Daniela Basso Facco

**ATRIBUTOS QUÍMICOS E MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO SOB DIFERENTES
MANEJOS EM LATOSSOLO DO CERRADO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo**.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Souza da Silva

Santa Maria, RS
2020

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Facco, Daniela Basso
Atributos químicos e matéria orgânica do solo sob diferentes manejos em
Latosolo do Cerrado / Daniela Basso Facco.- 2020.
96 f.; 30 cm

Orientador: Leandro Souza da Silva Coorientador:
Gerson Laerson Drescher
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de
Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, RS, 2020

1. Ciclagem de nutrientes 2. Fertilidade do solo 3. Plantas de cobertura 4.
Qualidade do solo 5. Sistemas de produção I. da Silva, Leandro Souza II. Drescher,
Gerson Laerson III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

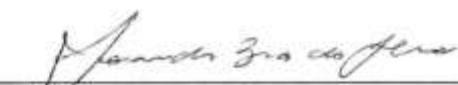
Declaro, DANIELA BASSO FACCO, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Daniela Basso Facco

**ATRIBUTOS QUÍMICOS E MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO SOB DIFERENTES
MANEJOS EM LATOSSOLO DO CERRADO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo**.

Aprovada em 25 de setembro de 2020:



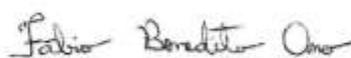
Leandro Souza da Silva, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Gerson Laerson Drescher, Dr. (UARK)
(Coorientador)



Frederico Costa Beber Vieira, Dr. (Unipampa)



Fábio Benedito Ono, Dr. (Fundação MT)

Santa Maria, RS
2020

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Delfa e Leucride, e meus irmãos, Francine e Gustavo, por todo apoio recebido durante minha caminhada acadêmica, e à Giovana, por trazer mais felicidade à nossa família.

Ao meu companheiro, Rodrigo Knevez Hammerschmitt, por todo carinho, compreensão e apoio oferecido e por sempre estar disponível me auxiliando.

À Universidade Federal de Santa Maria, em especial ao Departamento de Solos, e à CAPES por toda a estrutura disponibilizada e pela bolsa concedida.

Ao professor Leandro Souza da Silva, pela confiança e orientação durante o andamento desse trabalho.

Ao Gerson Laerson Drescher, pela amizade, paciência e orientação durante o andamento deste trabalho.

À Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso (Fundação MT), pela disponibilidade do experimento utilizado neste trabalho, por todo apoio e estrutura fornecida durante e após as coletas, em especial ao pesquisador Fábio Benedito Ono, que sempre esteve disponível.

À Fundação Agrisus, pela concessão de auxílio financeiro para realização do trabalho.

Aos colegas de laboratório, em especial ao Gerson Laerson Drescher, Rodrigo Knevez Hammerschmitt, Leandro Geremia Vicenzi e Gustavo Dal Molin, pelo auxílio na coleta das amostras e análises em laboratório.

Muito obrigado!

RESUMO

ATRIBUTOS QUÍMICOS E MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO SOB DIFERENTES MANEJOS EM LATOSSOLO DO CERRADO

AUTORA: Daniela Basso Facco

ORIENTADOR: Leandro Souza da Silva

O algodão (*Gossypium hirsutum* L.) é uma importante cultura agrícola no Cerrado brasileiro e é frequentemente cultivada sob preparo convencional (PC) do solo e monocultivo ou em sucessão com culturas de grãos, como a soja (*Glycine max* L. Merrill). Dessa forma, os solos dessas áreas manejadas sob PC podem apresentar baixa qualidade e estarem em processo de degradação. Sistemas de cultivo que envolvem o plantio direto (PD) e uso de plantas de cobertura em sucessão/rotação com as culturas principais são alternativas viáveis para os sistemas de produção do Cerrado. A adoção dessas práticas de manejo promove mudanças nos atributos químicos, na dinâmica da matéria orgânica (MOS) e na qualidade do solo que ainda não são bem compreendidos para o ambiente do Cerrado, bem como seus reflexos na produtividade das culturas de produção de grãos. Nesse sentido, o trabalho objetiva avaliar o efeito de diferentes práticas de manejo a longo prazo sobre a distribuição vertical de nutrientes, a dinâmica da MOS, a qualidade do solo e sua influência sobre a produtividade da soja em um Latossolo de textura argilosa. Amostras de solo estratificadas foram coletadas em experimento conduzido pela Fundação MT em Itiquira - MT envolvendo diferentes sistemas de culturas [pousio, algodão, milho (*Zea mays* L.), soja, milheto (*Pennisetum glaucum*), braquiária (*Urochloa ruziziensis*) e crotalária (*Crotalaria* sp.)] e preparos de solo (PC e PD), após 11 anos da instalação do experimento. Foram analisadas as propriedades químicas (atributos da acidez e disponibilidade de nutrientes), o carbono orgânico total (COT) e as frações físicas do carbono, os índices de qualidade do solo e sua relação com a produtividade da soja. O PD apresentou melhores condições de acidez do solo e disponibilidade de nutrientes na camada superficial, mas apresentou algumas limitações abaixo de 10 cm de profundidade. Além disso, o PD apresentou um forte gradiente de disponibilidade de nutrientes no perfil do solo, enquanto que sob PC a distribuição de nutrientes foi mais homogênea até 20 cm de profundidade. O impacto dos sistemas de culturas e preparos de solo sobre o COT e suas frações foram mais acentuadas na camada superficial do solo, onde as maiores concentrações foram observadas sob PD e nos sistemas de culturas que receberam plantas de cobertura. Os sistemas de culturas mais diversificados apresentaram pouca ou nenhuma diferença em relação aos indicadores da qualidade do solo [Estoque de Carbono, Razão de Estratificação de Carbono (REC) e Índice de Manejo de Carbono (IMC)], mas diferiram do sistema sob pousio. Dessa forma, o PD associado a sistemas de culturas diversificados apresenta maior capacidade de promover a qualidade do solo, o que é evidenciado pelos maiores valores dos indicadores REC e IMC. A produtividade da soja não foi afetada pelo preparo de solo, mas respondeu aos sistemas de culturas, sendo inferior no sistema sob pousio quando comparado aos demais sistemas de culturas. O sistema de culturas sob pousio apresentou níveis de fertilidade semelhantes aos demais sistemas de culturas, indicando que a qualidade do solo foi responsável por determinar a produtividade da soja.

Palavras-chave: Ciclagem de nutrientes. Fertilidade do solo. Plantas de cobertura. Qualidade do solo. Sistemas de produção.

ABSTRACT

SOIL CHEMICAL ATTRIBUTES AND ORGANIC MATTER IN A “CERRADO” OXISOL UNDER DIFFERENT MANAGEMENT SYSTEMS

AUTHOR: Daniela Basso Facco
ADVISOR: Leandro Souza da Silva

Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) is an important agricultural crop in the Brazilian Cerrado region and is frequently grown under conventional soil tillage (CT), monoculture and/or in succession with grain crops, such as soybean (*Glycine max* L. Merrill). Therefore, the soils in areas under CT can have low quality and be in a process of degradation. Crop systems that involve no-tillage (NT) and cover crops in succession and/or rotation with the main crops are important and viable alternatives to the Cerrado's production systems. These management practices promote changes in the soil chemical attributes, the soil organic matter (SOM) dynamics, and the overall soil quality. However, the intensity of such processes is yet not well understood for the Cerrado's environment neither it's reflexes on the grain crops productivity. Therefore, this study aims to evaluate the effect of different long-term management practices on the vertical nutrient distribution, SOM dynamics, soil quality and its influence on soybean yield in a heavy clay Oxisol. Stratified soil samples were collected in an experiment conducted by the Fundação MT in Itiquira - MT involving different crop systems [fallow, cotton, corn (*Zea mays*), soybean, millet (*Pennisetum glaucum*), brachiaria (*Urochloa ruziziensis*) and crotalaria (*Crotalaria sp.*)] and soil tillage (CT and NT) after 11 years of experiment conduction. Selected soil chemical properties (acidity attributes and nutrient availability indexes), total organic carbon (TOC), physical fractions of carbon, indexes of soil quality, and its relationship with soybean yield were analyzed. The NT presented better soil acidity conditions and nutrient availability in the soil superficial layer while presenting certain limitations below the soil top 10 cm layer. Moreover, the NT system has a strong gradient of nutrient availability along the soil profile, while at the CT the nutrients' distribution was more homogeneous at the soil top 20 cm layer. The impact of both crop and soil tillage system on soil TOC and its fractions was more evident in the topsoil, where the highest TOC concentrations were observed under NT and in the cropping systems with cover crops. The most diversified cropping systems had little or no influence on the soil quality indexes [Carbon stock, Carbon Stratification Ratio (CSR), and Carbon Management Index (CMI)] but differed from the fallow system. Hence, the NT associated with diversified cropping systems has a greater capacity to enhance soil quality, which is evidenced by the higher CSR and CMI indexes values. Soybean yield was not affected by soil tillage but responded positively to the cropping systems, with lower yields occurring in the fallow system compared to the other cropping systems. The fallow crop system presented similar soil fertility levels but significantly lower yield than other cropping systems, which indicates that the soil quality was responsible for determining soybean productivity.

Keywords: Nutrient cycling. Soil fertility. Cover crops. Soil quality. Production systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Localização do Centro de Aprendizagem e Difusão – Sul, da Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso, com destaque para o experimento, localizado no município de Itiquira, estado do Mato Grosso, Brasil.....31
- Figura 2 – Distribuição da precipitação e temperatura média de sete anos (agosto de 2012 a julho de 2019) e da safra 2018/2019 (agosto de 2018 a julho de 2019) na estação experimental da Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso, localizada no município de Itiquira-MT.....32
- Figura 3 – Estoque de carbono orgânico total na camada de 0-20 cm de profundidade de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalaria–Milho+Braquiária) após 11 anos de cultivo e sob área de vegetação natural (VN), localizados no município de Itiquira - MT.....58
- Figura 4 – Estoque de carbono orgânico associado à areia grossa (COAG), carbono orgânico associado à areia fina (COAF) e carbono orgânico associado aos minerais (COAM) na camada de 0-20 cm de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalaria–Milho+Braquiária) (a) sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) (b) após 11 anos de cultivo, e sob área de vegetação natural (VN), localizados no município de Itiquira - MT.....63
- Figura 5 – Razão de estratificação do carbono (REC) do solo na camada de 0-20 cm de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalaria–Milho+Braquiária), sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) após 11 anos de cultivo e sob área de vegetação natural (VN) em Itiquira – MT.....64
- Figura 6 – Índice de manejo do carbono do solo para a camada de 0-20 cm de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+ Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalaria–Milho+Braquiária) (a) e sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) (b) após 11 anos de cultivo e sob área de vegetação natural (VN), localizados no município de Itiquira-MT.....65
- Figura 7 – Produtividade da soja sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/ Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalaria–Milho+Braquiária) na safra 2018/19, após 11 anos de cultivo, em experimento localizado no município de Itiquira/MT.....66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sequência de culturas utilizadas a partir da safra 2008/09 até a safra 2018/19, nos sistemas de culturas implementados no experimento localizado no Centro de Aprendizagem e Difusão – Sul, da Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso em Itiquira/MT.....	34
Tabela 2 – Cultivares de algodão e soja, híbridos de milho e espécies de plantas de cobertura utilizadas em cada ano agrícola de condução do experimento.....	36
Tabela 3 – Quantidade anual de nutrientes adicionados ao solo através da adubação para as culturas de produção de grãos (soja e milho) e fibras (algodão) e total adicionado ao solo em cada sistema de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalaria–Milho+Braquiária) após 11 anos de cultivo.....	37
Tabela 4 – Valores de pH do solo em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalaria–Milho+Braquiária) e preparos de solo (preparo convencional e plantio direto), após onze anos de cultivo em Itiquira - MT.....	45
Tabela 5 – Saturação por bases do solo em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalaria–Milho+Braquiária) e preparos de solo (preparo convencional e plantio direto), após onze anos de cultivo em Itiquira - MT.....	46
Tabela 6 – Acidez potencial do solo em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalaria–Milho+Braquiária), após onze anos de cultivo em Itiquira - MT.....	47
Tabela 7 – Acidez potencial do solo em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob preparo convencional e plantio direto, após onze anos de cultivo em Itiquira – MT.....	48
Tabela 8 – Alumínio trocável e saturação por alumínio do solo em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob preparo convencional e plantio direto, após onze anos de cultivo em Itiquira -MT.....	48
Tabela 9 – Fósforo disponível do solo em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalaria–Milho+Braquiária) e preparos de solo (preparo convencional e plantio direto), após onze anos de cultivo em Itiquira - MT.....	50

- Tabela 10 – Potássio disponível do solo em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalária–Milho+Braquiária) e preparos de solo (preparo convencional e plantio direto), após onze anos de cultivo em Itiquira - MT.....51
- Tabela 11 – Cálcio trocável em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto /Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalária–Milho+Braquiária) e preparos de solo (preparo convencional e plantio direto), após onze anos de cultivo em Itiquira - MT.....52
- Tabela 12 – Magnésio trocável em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalária–Milho+Braquiária) e preparos de solo (preparo convencional e plantio direto), após onze anos de cultivo em Itiquira - MT.....53
- Tabela 13 – Matéria orgânica do solo em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalária–Milho+Braquiária) e preparos de solo (preparo convencional e plantio direto), após onze anos de cultivo em Itiquira - MT.....55
- Tabela 14 – Capacidade de troca de cátions potencial do solo ($CTC_{pH\ 7,0}$) em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão ; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalária–Milho+Braquiária) e preparos de solo (preparo convencional e plantio direto), após onze anos de cultivo, em experimento localizado no município de Itiquira - MT.....56
- Tabela 15 – Carbono orgânico total do solo em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalária–Milho+Braquiária) e preparos de solo (preparo convencional e plantio direto), após onze anos de cultivo em Itiquira - MT.....57
- Tabela 16 – Carbono orgânico associado a areia grossa (COAG) do solo em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalária–Milho+Braquiária) e preparos de solo (preparo convencional e plantio direto), após onze anos de cultivo em Itiquira - MT.....59

Tabela 17 – Carbono orgânico associado a areia fina (COAF) do solo em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalária–Milho+Braquiária) e preparos de solo (preparo convencional e plantio direto), após onze anos de cultivo em Itiquira - MT.....	60
Tabela 18 – Carbono orgânico associado aos minerais (COAM) do solo em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalária–Milho+Braquiária) após onze anos de cultivo em Itiquira - MT.....	61
Tabela 19 – Carbono orgânico associado aos minerais (COAM) do solo em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob preparo convencional do solo e plantio direto após onze anos de cultivo, em experimento localizado no município de Itiquira/MT.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MOS	Matéria orgânica do solo
MT	Mato Grosso
PC	Preparo convencional
COS	Carbono orgânico do solo
SPD	Sistema plantio direto
PD	Plantio direto
C	Carbono
IMC	Índice de manejo do carbono
REC	Razão de estratificação do carbono
Fe	Ferro
Al	Alumínio
N	Nitrogênio
P	Fósforo
K	Potássio
H + Al	Acidez potencial
Ca	Cálcio
Mg	Magnésio
CTC	Capacidade de troca de cátions
VN	Vegetação natural
EC	Estoque de carbono
KMnO ₄	Permanganato de potássio
CAD	Centro de Aprendizagem e Difusão
Fundação MT	Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso
P/A	Pousio/Algodão
Mt/A	Milheto/Algodão
S/M–Mt/A	Soja/Milho–Milheto/Algodão
Mt/A–S/M+B–B/A	Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão
B/A–S/C–M+B	Braquiária/Algodão–Soja/Crotalária–Milho+Braquiária
SSP	Superfosfato simples
MAP	Monoamônio fosfato
KCl	Cloreto de potássio
S	Enxofre
SA	Sulfato de amônio
Zn	Zinco
B	Boro
NaOH	Hidróxido de sódio
C ₄ H ₆ CaO ₄	Acetato de cálcio
CTC _{pH 7,0}	Capacidade de troca de cátions potencial
V	Saturação por bases
<i>m</i>	Saturação por alumínio
(NaPO ₃) ₆	Hexametáfosfato de sódio
COAG	Carbono orgânico associado à areia grossa
COAF	Carbono orgânico associado à areia fina
COT	Carbono orgânico total
COP	Carbono orgânico particulado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	CARACTERIZAÇÃO DO CERRADO BRASILEIRO	16
2.1.1	Características edafoclimáticas	16
2.1.2	Sistemas de produção no Cerrado	17
2.2	EFEITOS DO MANEJO SOBRE OS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO	19
2.3	EFEITOS DO MANEJO SOBRE A MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO	21
2.4	FRACIONAMENTO DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO	24
2.5	INDICADORES DA QUALIDADE DO SOLO	27
3	HIPÓTESES	29
4	OBJETIVOS	30
4.1	OBJETIVO GERAL.....	30
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	30
5	MATERIAL E MÉTODOS	31
5.1	CARACTERIZAÇÃO E HISTÓRICO DA ÁREA DE ESTUDO	31
5.2	DESIGN EXPERIMENTAL	33
5.3	MANEJO DAS CULTURAS	35
5.4	AMOSTRAGEM E PREPARO DAS AMOSTRAS DE SOLO	37
5.5	ANÁLISES QUÍMICAS DO SOLO.....	38
5.6	DETERMINAÇÃO DO CARBONO ORGÂNICO TOTAL E ESTOQUE DE CARBONO DO SOLO.....	39
5.7	FRACIONAMENTO FÍSICO DO CARBONO ORGÂNICO DO SOLO	40
5.8	RAZÃO DE ESTRATIFICAÇÃO DE CARBONO	40
5.9	ÍNDICE DE MANEJO DE CARBONO	41
5.10	PRODUTIVIDADE DE GRÃOS	42
5.11	ANÁLISE ESTATÍSTICA	42
6	RESULTADOS	44
6.1	ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO	44
6.1.1	Atributos da acidez do solo	44
6.1.2	Disponibilidade de P, K, Ca e Mg	49
6.1.3	Matéria orgânica e capacidade de troca de cátions potencial do solo	54
6.2	INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO.....	56
6.2.1	Carbono orgânico do solo	56
6.2.2	Índices de qualidade do solo	63
6.3	PRODUTIVIDADE DA SOJA.....	65
7	DISCUSSÃO	67
7.1	ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO	67
7.1.1	Atributos da acidez do solo	67
7.1.2	Disponibilidade de P, K, Ca e Mg	70
7.1.3	Capacidade de troca de cátions e matéria orgânica do solo	74
7.2	INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO.....	76
7.2.1	Carbono orgânico do solo	76
7.2.2	Índices de qualidade do solo	80
7.3	PRODUTIVIDADE DA SOJA	82
8	CONCLUSÃO	83
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
	REFERÊNCIAS	85

APÊNDICE A – IMAGENS DA ÁREA EXPERIMENTAL E DA COLETA DAS AMOSTRAS DE SOLO	95
APÊNDICE B – CROQUI DA ÁREA EXPERIMENTAL	96
APÊNDICE C – DENSIDADE DO SOLO	97
APÊNDICE D – TABELA DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA).....	98
ANEXO A – INTERPRETAÇÃO AGRONÔMICA DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO	99

1 INTRODUÇÃO

Os solos da região do Cerrado brasileiro se caracterizam por serem bastante intemperizados, com baixa fertilidade natural, alta acidez e com baixo teor de matéria orgânica do solo (MOS), especialmente quando manejados inadequadamente. Apesar destas características, a região apresenta grande atrativo para as culturas anuais de interesse agrícola, especialmente a soja (*Glycine max* L. Merrill), o milho (*Zea mays* L.) e o algodão (*Gossypium hirsutum* L.). O algodão foi por muito tempo cultivado sob preparo convencional do solo devido a sua alta suscetibilidade a pragas e doenças. Dessa forma, o revolvimento do solo era realizado com a finalidade de extinguir os restos culturais do algodão visando o controle de pragas e doenças. Atualmente, o controle dos restos culturais é realizado quimicamente e o revolvimento do solo é realizado apenas em situações de compactação do solo ou incorporação de insumos agrícolas. Além disso, o cultivo do algodão era frequentemente realizado sob monocultivo. Entretanto, atualmente, o cultivo de algodão passou a ser realizado na segunda safra, em sucessão com a soja, representando cerca de 95% do sistema de produção do algodão no estado do Mato Grosso (MT), principal produtor brasileiro dessas culturas.

O preparo convencional (PC), caracterizado pelo revolvimento do solo, aumenta a aeração do solo, quebra os agregados e aumenta o contato dos resíduos das culturas com o solo pela incorporação, aumentando a exposição e oxidação da MOS. Aliado a isso, a adoção de sistemas de cultivo pouco diversificados e com baixo aporte de resíduos vegetais ao solo, como o monocultivo, associado ao longo período de pousio que pode se estender até cinco meses em um ano, tem grande participação na redução dos teores de MOS nos solos do Cerrado. Conseqüentemente, solos cultivados com algodão frequentemente apresentam baixo conteúdo de carbono orgânico do solo (COS) devido ao histórico de PC do solo e monocultivo.

A redução dos teores de MOS pode impactar a produtividade das culturas e a qualidade do solo. Diante disso, tem-se estudado alternativas de manejo que favoreçam o incremento da MOS, como o uso do sistema plantio direto (SPD) e uma maior diversidade de culturas nos sistemas de produção do Cerrado. O SPD se caracteriza pela ausência do preparo do solo, manutenção de resíduos culturais sobre o solo, semeadura direta sobre os resíduos das culturas e introdução de novas espécies em sistemas de sucessão e/ou rotação de culturas. O uso de plantas de cobertura tem um papel importante na ciclagem de nutrientes, na melhoria da aquisição de nutrientes do solo ou de fertilizantes adicionados e no aumento do conteúdo de MOS. Dessa forma, o plantio direto (PD) combinado com a rotação de culturas tem potencial de aumentar a produtividade das culturas de interesse econômico.

Apesar dos benefícios do uso de sistemas produtivos mais diversificados, a maioria dos agricultores da região do Cerrado não utiliza espécies de plantas de cobertura em suas áreas, muito menos mistura de espécies. Além disso, existe dificuldade em estabelecer rotações de culturas no Cerrado que sejam favoráveis ao acúmulo de carbono (C) no solo, produzindo quantidades adequadas ou mesmo resíduos das culturas de maior qualidade visando manter a cobertura do solo. Isso ocorre, em parte, pelas precipitações sazonais e temperaturas elevadas, inviabilizando o cultivo na entressafra e acelerando a decomposição dos resíduos.

O teor de C do solo pode ser considerado um bom indicador da qualidade do solo, contudo, conhecer apenas o teor total de C no solo é pouco informativo no que diz respeito à estabilidade e funções da MOS nos processos do solo. Logo, uma estratégia para entender as funções da MOS é separá-la em frações de C, identificando aquelas que são mais sensíveis às mudanças nas práticas de manejo. Assim, o fracionamento físico do COS é uma ferramenta útil para se obter os compartimentos de C e avaliar os impactos dos manejos sobre a MOS, uma vez que algumas frações físicas são mais sensíveis ao manejo do solo em comparação à separação da MOS pela sua estrutura química.

Além disso, é importante considerar que, o aumento do conteúdo de C, a melhoria da fertilidade do solo e, conseqüentemente, o aumento da qualidade do solo, são processos lentos e, de certo modo, pouco perceptíveis em um curto espaço de tempo, sendo necessários estudos de longo prazo. A qualidade do solo pode ser avaliada, entre outras medidas, pela fertilidade do solo, por meio da avaliação de formas mais lábeis de nutrientes e pelo maior acúmulo de C no solo. Além disso, a qualidade do solo também pode ser avaliada por meio de índices que utilizam o C do solo como referência, como o Índice de Manejo de Carbono (IMC) e a Razão de Estratificação do Carbono (REC). Logo, a identificação de sistemas de manejo que permitam uma maior ciclagem e acúmulo de nutrientes, melhoria nos atributos da acidez, bem como uma maior estabilização do C do solo e maior qualidade do solo é de suma importância nestes solos visando o aumento da produtividade das culturas.

Dessa forma, avaliar os efeitos do uso de plantas de cobertura sobre a compartimentalização do COS e os atributos químicos no perfil do solo em PC e PD pode trazer mais informações a respeito da contribuição destas sobre a qualidade do solo. Estudos devem ser realizados visando identificar sistemas produtivos que utilizam diversificação de espécies de plantas que promovam mudanças benéficas nos atributos químicos do solo, aumento do conteúdo de COS, melhoria na qualidade do solo e, conseqüentemente, proporcionem aumento da produtividade das culturas, podendo favorecer a expansão de sistemas produtivos conservacionistas no Cerrado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CARACTERIZAÇÃO DO CERRADO BRASILEIRO

2.1.1 Características edafoclimáticas

O bioma Cerrado ocupa cerca de 2 milhões de km² do Planalto Central, correspondendo a aproximadamente 24% do território brasileiro (BUSTAMANTE et al., 2012). A vegetação nativa corresponde a sub-bosques de gramíneas, com cobertura de arbustos e árvores. O clima da região, segundo classificação de Köppen, é Aw (Tropical úmido) e se caracteriza por ser úmido e sazonal, com precipitações que variam de 800 a 1.500 mm, sendo que cerca de 90% da precipitação anual ocorre entre os meses de outubro e abril, considerada a estação chuvosa (BUSTAMANTE et al., 2012). A temperatura média anual do Cerrado varia de 20 a 26°C.

A classe de solo predominante nessa região é o Latossolo, ocupando cerca de 46% da área. Os Latossolos se caracterizam por serem altamente intemperizados, profundos, porosos e com teor de argila acima de 15% (VINHAL-FREITAS et al., 2012). Além disso, os Latossolos apresentam baixa fertilidade natural (BATLLE-BAYER; BATJES; BINDRABAN, 2010; BUSTAMANTE et al., 2012), alta acidez (CARVALHO et al., 2009) e são ricos em óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) (VINHAL-FREITAS et al., 2013). Logo, nessas condições, as culturas anuais apresentam suscetibilidade a toxidez por Al³⁺, além de deficiências nutricionais, não se desenvolvendo adequadamente na ausência de calagem e adubação (HARIDASAN, 2008). Além disso, os solos apresentam baixo teor de MOS, especialmente quando manejados inadequadamente.

Nos trópicos úmidos e sub-úmidos, a taxa de conversão da vegetação nativa para terras agrícolas é relativamente alta, impulsionada pela pressão econômica (CORBEELS et al., 2006). A partir da década de 1970, ocorreu uma rápida expansão da agricultura comercial de grande escala na região do Cerrado. Na ocasião, parte do bioma Cerrado foi convertido em terras agrícolas. A introdução da atividade agrícola intensiva na região do Cerrado gerou riqueza econômica, mas também problemas ambientais, como a degradação do solo (BATLLE-BAYER; BATJES; BINDRABAN, 2010; MARTINELLI et al., 2010). As operações relacionadas às mudanças no uso da terra são as principais causas de perda da MOS (CORBEELS et al., 2006; RABBI et al., 2014) e constituem um limitante para o aumento da produção das culturas e melhoria na qualidade do solo.

2.1.2 Sistemas de produção no Cerrado

Por muito tempo, o Cerrado brasileiro foi considerado impróprio para agricultura por consequência dos seus solos pobres. No entanto, os avanços agronômicos e tecnológicos, incentivos governamentais, condições de relevo favoráveis à mecanização e o baixo preço da terra contribuíram para transformar o Cerrado em uma região agrícola em expansão (GOEDERT, 1983). A partir de 1970, iniciou-se a expansão da produção mecanizada de produtos agrícolas para exportação, principalmente soja, milho, algodão e café (*Coffea sp.*) (KLINK; MACHADO, 2005), culturas estas tradicionalmente cultivadas sob PC do solo (CORBEELS et al., 2006). Exemplo disso, são os municípios de Lucas do Rio Verde, Sorriso e Rondonópolis, no estado do MT, que apresentam topografia suave (SANO et al., 2010), altamente atrativo para as culturas mecanizadas. Entretanto, embora a precipitação anual na região seja relativamente alta (1.500 mm), há uma estação seca prolongada que dura em torno de 4 meses, de junho a setembro (KOZOVITS et al., 2007), inviabilizando cultivos de plantas na entressafra sem o uso da irrigação.

O algodão é amplamente cultivado no Cerrado brasileiro devido as condições climáticas favoráveis, topografia que permite a mecanização agrícola, programas de incentivos governamentais e uso intensivo de tecnologia moderna (MOTOMIYA et al., 2011). O estado do MT, localizado no bioma Cerrado, apresenta a maior área plantada de algodão no Brasil, com cerca de 1.065 mil hectares na safra 2018/19, o que representa cerca de 67% da área cultivada no país (CONAB, 2019). Nessa região, o algodão foi por muito tempo cultivado sob monocultivo. Entretanto, atualmente cerca de 95% da área do estado do MT é cultivado em segunda safra, em sucessão com a soja (BERGER; LIMA; OLIVEIRA, 2019). Além disso, o PC do solo foi amplamente utilizado no cultivo do algodão com o objetivo de extinguir os restos culturais para controle de pragas e doenças. Atualmente, o controle dos restos culturais é realizado quimicamente. Entretanto, devido à alta suscetibilidade a pragas e doenças, há a necessidade de realizar diversas aplicações de agroquímicos na cultura do algodão, conseqüentemente, há um intenso tráfego de máquinas nessas áreas, resultando em problemas de compactação do solo. Dessa forma, o revolvimento do solo tem sido utilizado nessas áreas a fim de corrigir problemas de compactação, além de incorporar insumos agrícolas.

O revolvimento do solo altera a decomposição da MOS, aumentando a aeração do solo, quebrando os agregados e incorporando os resíduos na camada arada, proporcionando maior contato dos resíduos culturais com o solo (USSIRI; LAL, 2009) e, conseqüentemente, aumentando a exposição da MOS e acelerando sua decomposição. A magnitude da perda de

CO₂ do solo devido às práticas de preparo do solo está altamente relacionada a intensidade do distúrbio causado pelo preparo do solo (USSIRI; LAL, 2009). Consequentemente, solos cultivados com algodão frequentemente apresentam baixo conteúdo de COS devido ao histórico de monocultivo e PC do solo (CAUSARANO et al., 2006).

Uma crescente preocupação com a degradação dos solos no Cerrado levou à introdução do SPD a partir de 1990 (CORBEELS et al., 2006; VINHAL-FREITAS et al., 2013), associado ao uso de múltiplos sistemas de cultivo com plantas de cobertura (BATLLE-BAYER; BATJES; BINDRABAN, 2010; SÁ et al., 2014) em substituição ao tradicional monocultivo seguido de pousio (CORBEELS et al., 2006). O SPD contribui para melhorar as características químicas, físicas e biológicas do solo (BHATT, 2016; BUSARI et al., 2015) e aumentar os teores de C e nitrogênio (N) total do solo (BUSARI et al., 2015; MAZZONCINI et al., 2016). O uso do PD, combinado com rotação de culturas, aumenta a produtividade das culturas de interesse econômico (BATLLE-BAYER; BATJES; BINDRABAN, 2010; CAMPBELL et al., 2011), pois auxilia na manutenção e melhoria da fertilidade do solo, no aumento da MOS (CAMPBELL et al., 2011) e na melhoria da estrutura e da capacidade de retenção de água no solo (BATLLE-BAYER; BATJES; BINDRABAN, 2010), fatores importantes para reduzir os riscos de degradação do solo.

O SPD apresenta potencial de armazenamento de C no solo, uma vez que favorece a entrada de C via resíduos culturais e reduz as perdas por erosão do solo e decomposição da MOS devido a redução da perturbação do solo (CORBEELS et al., 2006). Entretanto, as condições ambientais do Cerrado brasileiro favorecem uma rápida decomposição dos resíduos culturais depositados na superfície do solo (CORBEELS et al., 2006). Assim, faz-se necessário a utilização de uma cultura de cobertura de solo após a cultura principal, fornecendo cobertura e proteção da superfície do solo contra a erosão. Entretanto, existe uma dificuldade em se estabelecer plantas de cobertura nos solos do Cerrado uma vez que as precipitações pluviométricas na região são sazonais.

Na região do Cerrado, as rotações de culturas adotadas em áreas sob SPD são, principalmente, soja, algodão ou milho como culturas principais, seguidos por uma cultura de cobertura, como a braquiária (*Urochloa sp.*), milheto (*Pennisetum sp.*), sorgo (*Sorghum bicolor*) ou o milho de segunda safra (CORBEELS et al., 2006; MALTAS et al., 2007). Wright et al. (2008) relatam que a inclusão do milho em sucessão com o algodão sobre PC do solo aumentou o conteúdo de C e N do solo para níveis próximos ao conteúdo encontrado em solo cultivado sob PD e monocultivo de algodão. Dessa forma, o uso do milho em sistemas de rotação e/ou sucessão de culturas pode ser importante no aumento do conteúdo de C devido a

quantidade de resíduos adicionados ao solo, podendo compensar a degradação da MOS causado pelo preparo do solo. O uso de sistemas de cultivo que adicionem quantidade e qualidade de resíduos de uma maior diversidade de plantas contribuem para maiores teores de C e N no solo em comparação ao monocultivo de algodão (WRIGHT et al., 2008), aumentando a qualidade do solo, o potencial produtivo das culturas e a rentabilidade da área.

2.2 EFEITOS DO MANEJO SOBRE OS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

Solos altamente intemperizados apresentam, naturalmente, alta acidez e baixa fertilidade (BORTOLUZZI et al., 2015). As plantas nativas do Cerrado têm desenvolvido adaptações para sobreviver a ambientes secos, podendo resistir a queimadas de curta duração, solos ácidos e à toxidez por Al^{3+} . Entretanto, as culturas de interesse agrônômico, como o algodão, soja e milho, são suscetíveis ao Al^{3+} e à deficiência de fósforo (P) e potássio (K) (ARUNAKUMARA; WALPOLA; YOON, 2013). Nestas condições, as plantas não se desenvolvem bem sem práticas de calagem e adubação. Aliado a isso, práticas conservacionistas, como o PD e o uso de plantas de cobertura no sistema produtivo, que melhoram a qualidade do solo, devem ser priorizadas com a finalidade de se obter altos rendimentos.

Embora o SPD esteja consolidado no Cerrado, sua efetividade está relacionada à quantidade e qualidade dos resíduos vegetais adicionados ao solo (NASCENTE; STONE, 2018) e a utilização de plantas de cobertura com alta capacidade de promover ciclagem de nutrientes (CRUSCIOL et al., 2015; NASCENTE; LI; CRUSCIOL, 2013). A utilização de plantas de cobertura nos sistemas de produção proporciona vários benefícios, como a maior conservação da umidade do solo, proteção contra a erosão, perdas de água e o aumento da fertilidade do solo (FAGERIA; BALIGAR; BAILEY, 2005). Entretanto, apesar dos benefícios do uso de plantas de cobertura, a maioria dos agricultores da região do Cerrado não utiliza espécies de plantas de cobertura em suas áreas, tampouco a mistura de espécies (NASCENTE; STONE, 2018), especialmente quando incluem o algodão no sistema de produção.

Solos cultivados sob SPD apresentam alta fertilidade química, especialmente na camada superficial do solo, devido à deposição dos resíduos culturais e fertilizantes em superfície, consequentemente, promovendo maior estratificação dos nutrientes no perfil do solo. Por sua vez, nas camadas mais profundas do solo, apresentam alto conteúdo de Al^{3+} e baixa disponibilidade de nutrientes (CALEGARI et al., 2013; MARTÍNEZ et al., 2016; TIECHER; DOS SANTOS; CALEGARI, 2012). Dessa forma, ocorre uma limitação ao crescimento das

raízes às camadas superficiais devido à maior concentração de nutrientes (FRANCHINI et al., 2017), reduzindo a área de solo explorada pelas raízes em camadas mais profundas (NUNES et al., 2015). As plantas de cobertura têm um papel importante, especialmente quando o solo não é perturbado, pois aumentam a ciclagem de nutrientes e o conteúdo de MOS (CONCEIÇÃO; DIECKOW; BAYER, 2013) e melhoram a aquisição de nutrientes do solo ou de fertilizantes adicionados (TELES et al., 2017).

O uso de plantas de cobertura com alto crescimento radicular e maior contato solo-raiz, são importantes para absorção de nutrientes, especialmente P e K, que apresentam baixa mobilidade em solos altamente intemperizados, como os Latossolos (KAMINSKI et al., 2010). As plantas de cobertura têm um importante papel neste cenário, pois, além de aumentar o conteúdo de MOS, aumentam a ciclagem de nutrientes (CONCEIÇÃO; DIECKOW; BAYER, 2013), melhoram as propriedades físicas do solo (CALONEGO et al., 2017) e melhoram a aquisição de nutrientes do solo ou de fertilizantes adicionados (TELES et al., 2017). Entretanto, Nascente e Stone (2018) verificaram, em um estudo realizado no Cerrado, que o uso de plantas de cobertura sozinhas não proporciona mudanças nas propriedades químicas do solo. No entanto, o uso de plantas de cobertura em sistema de rotação de culturas aumenta o pH do solo e reduz o Al^{3+} e a acidez potencial (H+Al) do solo e aumenta os teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg), K e Fe do solo. O uso de sistemas de rotação de culturas pode alterar a disponibilidade de P do solo a longo prazo devido ao aumento da exsudação da enzima fosfatase ácida pelas plantas, acessando o P orgânico do solo (CHAVARRÍA et al., 2016; CUI et al., 2015). Além disso, a falta de reciclagem de nutrientes proporcionada pelos resíduos culturais em sistemas de monocultivo, a longo prazo, podem causar a depleção do K não-trocável do solo (SRINIVASARAO et al., 2014).

Perdas de nutrientes ocorrem em todos os sistemas de produção (ROSOLEM; CALONEGO, 2013), entretanto, essas perdas podem ser reduzidas com a utilização de plantas de cobertura que promovem o acúmulo de nutrientes no tecido vegetal, mantendo o nutriente no sistema solo-planta (CALEGARI et al., 2013; TIECHER et al., 2017). Por exemplo, Tiecher et al. (2017) observaram maior disponibilidade de P e K no solo cultivado com plantas que apresentam maior rendimento de biomassa seca. Dessa forma, destaca-se a importância do cultivo de plantas de cobertura para aumentar a disponibilidade de nutrientes através da reciclagem pela deposição e decomposição de resíduos culturais na superfície do solo (TELES et al., 2017). Logo, espera-se que o cultivo de plantas de cobertura em sistemas de rotação e/ou sucessão de culturas podem acessar os nutrientes ao longo do tempo, alterando a ciclagem de nutrientes e a acidez do solo, especialmente em SPD (TIECHER et al., 2017).

O milheto é uma opção de cobertura vegetal a ser utilizada nos sistemas de produção de algodão devido à alta produção de biomassa, rápida degradação da palha e, conseqüentemente, rápida liberação de nutrientes, que podem ser utilizados pelas culturas sucessoras (NASCENTE; LI; CRUSCIOL, 2013). Outra opção são algumas pastagens perenes como a *Urochloa sp.*, que apresenta grande produção de biomassa e maior persistência no solo (CRUSCIOL et al., 2015). Além disso, gramíneas do gênero *Urochloa* e *Panicum* estão sendo utilizadas como plantas de cobertura nos sistemas produtivos de milho e soja (NASCENTE; CRUSCIOL, 2012). Estas espécies forrageiras perenes são originárias da África e possuem sistemas radiculares vigorosos e profundos, alta tolerância à seca e grande produção de biomassa (NASCENTE; CRUSCIOL, 2012), apresentando grande potencial de cultivo nas condições edafoclimáticas do Cerrado.

2.3 EFEITOS DO MANEJO SOBRE A MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

A MOS apresenta relação com a maioria das propriedades relacionadas à capacidade produtiva do solo, tais como estabilidade e estrutura dos agregados, infiltração e retenção de água, resistência à erosão, atividade biológica, capacidade de troca de cátions (CTC) do solo e a disponibilidade de nutrientes (CAUSARANO et al., 2008; FRANZLUEBBERS, 2002; SÁ; LAL, 2009; TIVET et al., 2013). Dessa forma, o COS tem mostrado sua importância em solos agrícolas e tem sido utilizado em muitos estudos como um indicador para avaliar a qualidade do solo (FANG et al., 2012; FERREIRA et al., 2013) devido a sua influência nas propriedades biológicas, químicas e físicas do solo e na produtividade das culturas (ISLAM; WEIL, 2000), sendo sensível às mudanças drásticas de manejo, como as práticas de preparo do solo.

Além de proporcionar uma melhoria nos atributos químicos do solo, promovendo maior acesso das plantas aos nutrientes, o uso de sistemas de rotação e/ou sucessão de culturas, com presença de plantas de cobertura, pode promover o aumento do conteúdo de MOS. Estudos mostram uma forte relação entre a entrada de C pela biomassa das plantas e o conteúdo de COS (SÁ et al., 2014, 2015; TIVET et al., 2013). Ferreira et al. (2018) verificaram que, em clima subtropical, o COS aumenta quando o sistema é baseado em um bom manejo da fertilidade do solo e alta entrada de C no solo através dos resíduos culturais. Em um Argissolo no sul do Brasil, Bayer et al. (2000) verificaram que cerca de 19% do C adicionado através dos resíduos da parte aérea das culturas tornou-se parte do COS. Contudo, no Cerrado, onde o clima é quente e úmido, ocorre uma alta taxa de mineralização do COS (BAYER et al., 2004; DIECKOW et

al., 2009; SÁ et al., 2001) e o principal desafio dessa região é desenvolver sistemas com alta entrada de C pela biomassa (TIVET et al., 2013) para promover aporte de MOS.

Além disso, a MOS apresenta estreita relação entre o C e o N orgânico. Logo, o acúmulo e a conservação da MOS é afetada pela composição das espécies vegetais cultivadas e pela entrada de matéria seca e N no sistema (RAPHAEL et al., 2016). Em estudo realizado em dois solos de Botucatu, no estado de São Paulo, avaliando a concentração e a qualidade da MOS em decorrência de rotações de culturas sob SPD após 10 anos, Raphael et al. (2016) verificaram que a concentração de C do solo foi maior nos sistemas sob rotação de culturas com maior entrada de N, especialmente onde a *Crotalaria juncea* foi cultivada na primavera. Além disso, os autores verificaram que a ausência de plantas de cobertura na primavera resultou em menor C total no solo da camada 0-10 cm.

Geralmente, solos argilosos apresentam maiores conteúdos de COS devido à característica protetora da argila contra a degradação dos compostos orgânicos. As partículas de argila não atuam de forma isolada, mas sim formando microagregados de argila e silte, que estabilizam a MOS via adsorção por encapsulamento físico (VIRTO; BARRÉ; CHENU, 2008), tornando a MOS inacessível aos microrganismos. Em estudo realizado por Bayer et al. (2006) em dois Latossolos representativos do Cerrado (350 e 650 g de argila kg⁻¹) sob vegetação natural (VN) e com adição semelhante de resíduos ao solo, foi verificado que o estoque de carbono (EC) no Latossolo argiloso (54 Mg C ha⁻¹) foi maior que o Latossolo arenoso (35,4 Mg C ha⁻¹). Isso ocorre, devido a maior proteção física à MOS proporcionada pelo solo argiloso, consequentemente resultando em maior estabilidade da MOS. Além disso, a mudança no manejo destes solos, do PC para o PD, resultou em uma taxa anual de sequestro de C de 0,60 Mg C ha⁻¹ (aumento no estoque de 3 Mg C ha⁻¹) para o solo mais argiloso e de 0,30 Mg C ha⁻¹ (aumento no estoque de 2,4 Mg C ha⁻¹) para o solo mais arenoso.

Em um Latossolo sob SPD cultivado com plantas de cobertura, Sá et al. (2001) verificaram um aumento no EC de 0,81 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ (0-20 cm). Em condições subtropicais, Bayer et al. (2004) relataram um aumento de 0,25-0,78 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ sob PD em comparação ao PC, dependendo do tipo de planta de cobertura presente. Em estudo realizado por Corbeels et al. (2006), os autores verificaram que a adoção do SPD com plantas de cobertura após o monocultivo de soja em sistema convencional e com pousio aumenta o EC do solo (0-20 cm) em 0,83 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹, pelo menos nos primeiros 12 anos. Assim, as condições menos oxidativas do PD, potencializada pela utilização de sistemas de culturas com plantas de cobertura, favorecem o acúmulo de COS, especialmente na presença de plantas leguminosas,

pois permitem maior produção de massa das gramíneas cultivadas em sucessão, devido ao maior fornecimento de N (COSTA et al., 2008).

As taxas médias de sequestro de C do solo foram estimadas para solos sob PD nas regiões tropical (Cerrado) e subtropical do Brasil, sendo de 0,35 e 0,48 Mg C ha⁻¹, respectivamente (BAYER et al., 2006). Porém, a adoção do PD como estratégia isolada pode não produzir os efeitos positivos esperados em relação ao acúmulo de C no solo em clima tropical. Nessas condições, o estabelecimento de sistemas de cultivo diversificados e com alto nível de adição de resíduos culturais, especialmente resíduos oriundos de plantas leguminosas, pode ser uma importante estratégia (CONCEIÇÃO; DIECKOW; BAYER, 2013). Sisti et al. (2004) observaram que, após 13 anos de cultivo de trigo (*Triticum aestivum*)/soja/ervilhaca (*Vicia cracca*), houve aumento no EC do solo em cerca de 1,3 Mg C ha⁻¹ sob PD, comparado ao PC; enquanto que no sistema menos diversificado (trigo/soja) nenhum acúmulo foi verificado, mesmo em PD. Estes resultados ressaltam a importância do alto aporte de resíduos vegetais quando se visa o acúmulo de C no solo, mesmo em PD. Amado et al. (2001) sugerem que o uso de leguminosas, combinado com maior diversidade de espécies em sucessão ou rotação de culturas, aumenta de forma significativa o acúmulo de C e N no solo.

Solos sob cultivo de algodão frequentemente apresentam baixos teores de MOS devido ao longo histórico de monocultivo e PC do solo (CAUSARANO et al., 2006). A perda de C em função do manejo do solo ocorre principalmente no solo da camada superficial (0-20 cm) (BUSTAMANTE et al., 2012). Dessa forma, o SPD tem potencial de aumentar o sequestro de C em solos cultivados com algodão (WRIGHT; HONS; MATOCHA, 2005). Em solos cultivados em SPD no Cerrado, a taxa de acúmulo de C varia de 0,3 a 1,91 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ em comparação ao PC (BATLLE-BAYER; BATJES; BINDRABAN, 2010).

No Cerrado, a adoção do SPD por um longo período pode favorecer o aumento do conteúdo de MOS para níveis superiores aos encontrados em solos sob VN (SIQUEIRA NETO et al., 2010). A redução da perturbação do solo, a sucessão/rotação de culturas e a manutenção da cobertura do solo por resíduos culturais contribuem para o aumento dos níveis de MOS (SIQUEIRA NETO et al., 2009). Em contrapartida, a adoção de sistemas de cultivo pouco diversificados, associado ao longo período de pousio (PRASAD et al., 2016), têm grande participação na redução dos teores de MOS devido à exposição e oxidação da MOS e ao pouco aporte de material vegetal ao solo. Além disso, o sequestro de C pode ser melhorado quando associado a rotações de culturas, que minimizam os períodos de pousio e aumentam a diversidade de culturas (CAUSARANO et al., 2006).

Em estudo realizado em um Latossolo argiloso do Cerrado, Vinhal-Freitas et al. (2013) verificaram um impacto positivo do PD associado à rotação de culturas sobre o C do solo. O solo cultivado sob PD apresentou cerca de 1,57 vezes mais C quando comparado ao solo sob VN do Cerrado (14,1 g C kg⁻¹). Além disso, os autores verificaram valores de C da biomassa microbiana do solo 1,85 vezes maior no solo sob PD quando comparado à VN do Cerrado (268,6 g C kg⁻¹). Assim, estes dados demonstram a importância da rotação de culturas na qualidade do solo devido ao aumento da atividade microbiana e aumento do conteúdo de COS, que proporcionam benefícios ao sistema, como por exemplo, melhor estrutura e fertilidade do solo.

2.4 FRACIONAMENTO DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

O teor de MOS pode ser considerado um bom indicador da qualidade do solo. Contudo, conhecer apenas o teor total de C no solo é pouco informativo no que diz respeito à estabilidade e funções da MOS nos processos do solo. Logo, uma estratégia para entender como o C está estabilizado no solo é separar a MOS em frações de C, identificando aquelas que são mais sensíveis às mudanças nas práticas de manejo (PARTON; RASMUSSEN, 1994). No entanto, a maioria dos estudos no Brasil, e especialmente no Cerrado, avaliou apenas a fração total de COS, enquanto que, para uma melhor compreensão dos efeitos do manejo agrícola a longo prazo, seria necessária a separação do COS em frações.

As informações de pesquisa são escassas em relação as mudanças nas frações de COS lábil e dinâmica de C em relação aos diferentes processos de estabilização do C no Brasil (TIVET et al., 2013). Essas frações estão estabilizadas ou protegidas contra a decomposição microbiana através de alguns mecanismos. Neste sentido, Sollins et al. (1996) identificaram os seguintes mecanismos de proteção da MOS no solo: (I) características moleculares das substâncias húmicas do solo (recalcitrância); (II) baixa acessibilidade dos microrganismos aos materiais e (III) interação dos materiais orgânicos e inorgânicos. Entretanto, Krull et al. (2003) sugerem que os mecanismos devem ser apenas divididos em “recalcitrância bioquímica” e “proteção física”. Embora os mecanismos que controlam a estabilidade COS tenham sido resumidos de maneira diferente, o papel da associação com os minerais do solo tem sido reconhecido por diversos pesquisadores (CONCEIÇÃO; DIECKOW; BAYER, 2013; KLEBER et al., 2011; LÜTZOW et al., 2006; WANG et al., 2014).

Dessa forma, a MOS é frequentemente separada em frações operacionais de laboratório a fim de investigar a estabilização do COS. As técnicas aplicadas evoluíram de acordo com o

entendimento atual da estabilização do C nos solos. Tradicionalmente, pensava-se que o C era estabilizado através da humificação dos resíduos vegetais, envolvendo a síntese secundária de substâncias húmicas que se estabilizavam quimicamente (BURDON, 2001). Nessa abordagem, as frações de C são separadas quimicamente usando extração alcalina e ácida, isolando as frações ácido húmico, ácido fúlvico e humina (POEPLAU et al., 2018). Entretanto, não há evidências de que as substâncias húmicas obtidas em laboratório realmente existam sob condições naturais (LEHMANN; KLEBER, 2015) e não há uma relação muito clara entre as frações da MOS e suas funções no solo. Assim, o fracionamento físico da MOS (granulometria e sedimentação) é uma ferramenta útil para obter os compartimentos da MOS e avaliar os impactos dos manejos sobre a MOS (SÁ et al., 2001), uma vez que, algumas frações físicas são mais sensíveis ao manejo do solo em comparação à separação pela estrutura química da MOS (SEQUEIRA; ALLEY; JONES, 2011; ZOTARELLI et al., 2007).

A maioria dos métodos de fracionamento da MOS recentemente desenvolvidos utilizam abordagens de fracionamento físico, realizando a separação da MOS de acordo com os diferentes tamanhos e/ou densidades, com ou sem dispersão prévia para quebrar os agregados. As frações obtidas são caracterizadas como fração leve ou carbono orgânico particulado, presente dentro e entre os agregados do solo, e a fração pesada ou fração de carbono orgânico associado aos minerais (silte e argila), crucial para a estabilização do COS. Esta separação mostra como minerais de diferentes tamanhos potencialmente protegem o COS (HAN et al., 2016), embora diferentes níveis de separação e, conseqüentemente, diferentes frações possam ser obtidas de acordo com o procedimento laboratorial utilizado nos estudos de fracionamento físico.

As frações particuladas de C são consideradas mais jovens, minimamente transformadas e estão menos associadas aos constituintes minerais do solo (SALVO; HERNÁNDEZ; ERNST, 2010). Essa fração é mais dinâmica e está associada à disponibilidade de nutrientes a curto prazo. Além disso, essa fração está diretamente relacionada ao suprimento de resíduos vegetais acima e abaixo do solo (SÁ; LAL, 2009; SALVO; HERNÁNDEZ; ERNST, 2010). As frações particuladas do COS são consideradas por alguns autores um indicador altamente sensível para detectar alterações provocadas pelo uso de diferentes práticas de manejo do solo (BAYER et al., 2001; CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992).

A fração de C associada aos minerais consiste, principalmente, de tecidos microbianos ou metabólitos que são estabilizados no solo pela interação organo-mineral via processos de adsorção (KLEBER et al., 2011), resultando em armazenamento do C à longo prazo devido ao menor acesso pelos microrganismos. Essa fração é considerada bastante estável ao longo do

tempo e difícil de degradar devido a sua estrutura complexa e, principalmente, o alto grau de estabilização com a fração mineral (SALVO; HERNÁNDEZ; ERNST, 2010). Solos com alto teor de argila e óxidos apresentam maior potencial de estabilização do COS pois maior proteção é oferecida ao COS devido à associação entre as partículas inorgânicas do solo e as moléculas orgânicas (TIVET et al., 2013). Vários estudos, incluindo Bayer et al. (2001) e Tivet et al. (2013), destacaram a importância da interação organo-mineral para a proteção e aumento do conteúdo de C do solo.

Baseado nestas considerações, o fracionamento físico pode ser uma ferramenta útil para esclarecer mudanças na MOS (GMACH et al., 2018), uma vez que mudanças no manejo são difíceis de serem detectadas a curto prazo devido à alta heterogeneidade do solo (BLAIR; LEFROY; LISLE, 1995). O C particulado constitui uma importante ferramenta indicadora da qualidade do solo em curtos períodos de avaliação, podendo ser usada para avaliar a dinâmica da MOS (BLAIR; LEFROY; LISLE, 1995; GERA EI et al., 2016). Esta fração é considerada a parte mais lábil do C do solo, respondendo prontamente aos manejos utilizados (PRAGANA et al., 2012), permitindo que seja utilizada para avaliação da qualidade do solo em sistemas de manejo recentes, onde as alterações do teor total de MOS ainda não são de grande magnitude (CONCEIÇÃO et al., 2005). Em contrapartida, o C associado aos minerais não apresenta sensibilidade imediata às alterações de manejo, sendo considerado a fração mais estável do solo, devido ao seu avançado estado de humificação e estabilidade conferido pela interação com a fração mineral do solo (TIVET et al., 2013). Essa fração geralmente compreende mais de 90% do total do C no solo (CHRISTENSEN, 2001), apresentando um papel importante no acúmulo de C do solo devido a estabilização da MOS via proteção física.

A adoção do PD pode aumentar o conteúdo total de C no solo e, conseqüentemente, aumentar as frações de C particulado e associado aos minerais. Entretanto, estas frações também são dependentes da entrada de biomassa, clima, tempo de adoção do SPD e mineralogia da fração argila (BAYER et al., 2004; SÁ et al., 2001). Em estudo realizado por Gmach et al. (2018), avaliando o potencial de restaurar os níveis de MOS com diferentes usos da terra na região do Cerrado, foi verificado que o solo cultivado com pastagem *Urochloa brizantha* apresentou níveis de C orgânico particulado e associado aos minerais na camada superficial semelhantes aos níveis observados no solo sob VN. No entanto, neste mesmo estudo, também foi verificado que no solo após nove anos de cultivo sob SPD, os níveis de C associado aos minerais foram semelhantes aos do solo sob VN, enquanto que os níveis de C particulado foram mais baixos na superfície do solo, mesmo com a presença de cobertura morta. Isso demonstra

a maior sensibilidade da fração particulada da MOS em detectar as alterações provocadas pelo manejo do solo.

2.5 INDICADORES DA QUALIDADE DO SOLO

A qualidade do solo pode ser avaliada, entre outras medidas, pela fertilidade do solo, por meio da avaliação de formas mais lábeis de nutrientes e pelo maior acúmulo de C no solo. Além disso, a qualidade do solo também pode ser avaliada por meio de índices que utilizam o C do solo como referência, como o IMC e a REC.

Em condições naturais, a concentração de C decresce da superfície para as camadas mais profundas do solo. Esse processo está relacionado à entrada contínua de resíduos vegetais acima do solo e a ausência de perturbação do solo. Quando o solo é cultivado sob PD, também ocorre a estratificação gradual do C entre as camadas superficial e subsuperficial do solo à longo prazo (FERREIRA et al., 2012; FRANZLUEBBERS, 2002). Entretanto, o PC do solo provoca a inversão das camadas do solo, provocando uma distribuição mais uniforme do C ao longo do perfil (SÁ et al., 2015). Essa característica tem sido usada como indicador de qualidade do manejo do solo (FERREIRA et al., 2013), através do índice de qualidade chamado de REC. Entretanto, estudos de longo prazo, relacionando o índice REC e a qualidade do solo em sistemas de produção são escassos, especialmente em solos tropicais e subtropicais.

A REC é a razão entre o conteúdo de COS de duas camadas distintas de solo. A camada mais superficial do solo é usada pois é fortemente influenciado pelo sistema de cultivo, pois recebe grande parte dos fertilizantes e agroquímicos, impacto das gotas da chuva, concentra a maior atividade biológica e é responsável pelas partições de água, gases e energia no agroecossistema; e a segunda camada é o subsolo, que é menos afetado pelas operações agrícolas (FERREIRA et al., 2012). Maiores valores de REC indicam que o manejo do solo adotado melhora a qualidade do solo (FERREIRA et al., 2012; FRANZLUEBBERS, 2002, 2010).

O tempo de adoção de práticas conservacionistas de manejo do solo aumenta a REC. No Sudeste dos Estados Unidos, um estudo mostrou que a REC aumentou de 2,4 para 3,1 após 5 anos de conversão do PC para o PD, atingindo 3,6 após 12 anos (FRANZLUEBBERS, 2010). Para climas temperados, vários estudos mostram que o valor crítico de REC para manter a qualidade do solo é de 2,0 (FRANZLUEBBERS, 2002). Entretanto, esses valores não podem ser aplicados diretamente para solos tropicais e subtropicais, sendo este valor menor para essas condições (FERREIRA et al., 2013).

Além disso, Blair et al. (1995) sugerem o índice IMC como um indicador para avaliar a qualidade do solo. O IMC relaciona o EC do solo sob práticas agrícolas e o EC do solo de uma área de referência, geralmente sob VN. Dessa forma, o IMC permite a avaliação dos processos de ganho ou perda da qualidade do solo e a comparação entre os diferentes sistemas de manejo quanto aos seus efeitos sobre a qualidade do solo (DIEKOW et al., 2005), uma vez que valores mais altos significam maior qualidade do solo e vice-versa (BLAIR; LEFROY; LISLE, 1995). Ferreira et al. (2013) encontrou valores altos de COS, REC e IMC quando o solo foi minimamente perturbado e a rotação de culturas foi intensificada. Entretanto, quando o solo permaneceu por curtos períodos em pousio e com menor diversidade de plantas, os índices encontrados foram baixos, demonstrando que esses índices podem ser efetivos em avaliar a qualidade do solo.

A estimativa do IMC é realizada pela integração do EC e da labilidade do C. A labilidade do C é a razão entre o conteúdo de C lábil e o não lábil do solo. Blair et al. (1995) propôs como fração lábil aquele C oxidável em solução 0,333 mol L⁻¹ de permanganato de potássio (KMnO₄). Entretanto, alguns aspectos metodológicos, como a concentração da solução, tempo de reação, umidade da amostra de solo (WEIL et al., 2003) e o potencial de decomposição do KMnO₄ devido a exposição com a luz (BLAIR; LEFROY; LISLE, 1995) ainda devem ser mais bem esclarecidas ao se utilizar o KMnO₄ para determinar o C lábil do solo. Essas podem ser as principais razões pelas quais o índice IMC é pouco utilizado nas avaliações de qualidade do solo.

Levando em consideração as limitações do método de oxidação química, Vieira et al. (2007) propuseram a utilização do fracionamento físico da MOS como um método alternativo para determinar o conteúdo de C lábil do solo e, portanto, determinar o IMC dos sistemas de produção. Dessa forma, esses autores propõem que a determinação do C lábil pelo fracionamento físico é um método mais eficiente para esse tipo de avaliação, uma vez que a extração química foi menos sensível aos diferentes sistemas de cultivo e apresentou tendência de superestimar a fração de C lábil do solo.

3 HIPÓTESES

- (i) A utilização de plantas de cobertura nos sistemas de produção de algodão no Cerrado resulta em aumento da fertilidade de solo, devido à melhoria nos atributos da acidez do solo e na disponibilidade de nutrientes do solo de camadas mais superficiais.
- (ii) O uso do preparo convencional do solo nos sistemas de produção de algodão no Cerrado proporciona melhores condições de fertilidade de solo na camada arável, enquanto que os benefícios do plantio direto são mais intensos no solo da camada superficial.
- (iii) Sistemas de produção de algodão no Cerrado cultivados em solos argilosos, que incluem rotação de culturas com maior diversidade de espécies, promovem maior acúmulo de C lábil no solo e proporcionam melhor qualidade do solo em relação aos cultivos menos diversificados, como o cultivo em pousio ou a sucessão de culturas, especialmente quando cultivados sob plantio direto.
- (iv) Melhores produtividades de soja, quando cultivadas nos sistemas de produção de algodão no Cerrado, ocorrem nos sistemas de produção com melhores condições de fertilidade e, principalmente, com melhor qualidade do solo.

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os efeitos de diferentes práticas de manejo, a longo prazo, sobre a fertilidade, o carbono orgânico e a qualidade do solo em um Latossolo cultivado nas condições edafoclimáticas do Cerrado.

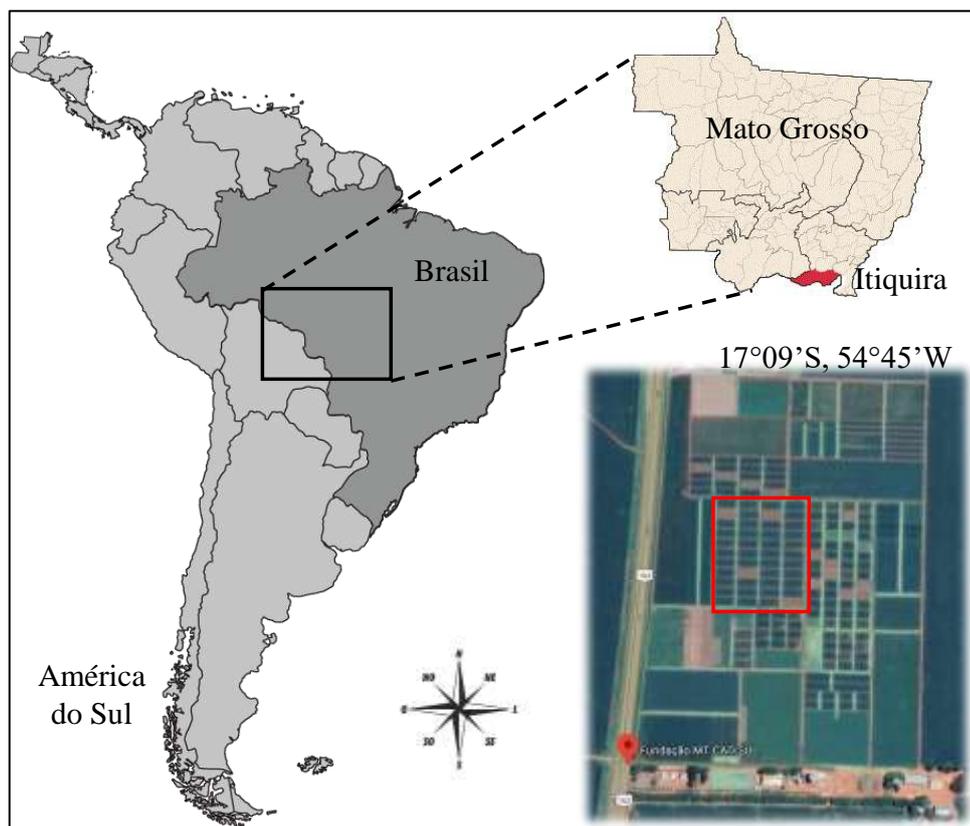
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- (i) Avaliar a distribuição vertical dos atributos químicos do solo relacionados a acidez do solo e a disponibilidade de nutrientes em um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de produção de algodão e preparos de solo no Cerrado.
- (ii) Avaliar as alterações provocadas pelos diferentes sistemas de produção de algodão sobre o carbono orgânico total, bem como, sobre as frações físicas do carbono orgânico do solo, no perfil de um Latossolo no Cerrado.
- (iii) Quantificar o estoque de carbono total, das frações de carbono orgânico do solo, bem como determinar os índices de qualidade de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de sucessão/rotação de culturas no Cerrado, sob plantio direto e preparo convencional do solo.
- (iv) Avaliar a produtividade da soja após 11 anos da implantação dos sistemas de produção de algodão no Cerrado.

5 MATERIAL E MÉTODOS

Neste estudo foram utilizadas amostras de solo de um experimento envolvendo preparo do solo e rotação/sucessão de culturas com 11 anos de condução (2008 a 2019), localizado no Centro de Aprendizagem e Difusão (CAD) – Sul ($17^{\circ}09'S$, $54^{\circ}45'W$ e 490 m de altitude) da Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso (Fundação MT), localizado no município de Itiquira-MT (Figura 1).

Figura 1 – Localização do Centro de Aprendizagem e Difusão – Sul, da Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso, com destaque para o experimento, localizado no município de Itiquira, estado do Mato Grosso, Brasil.

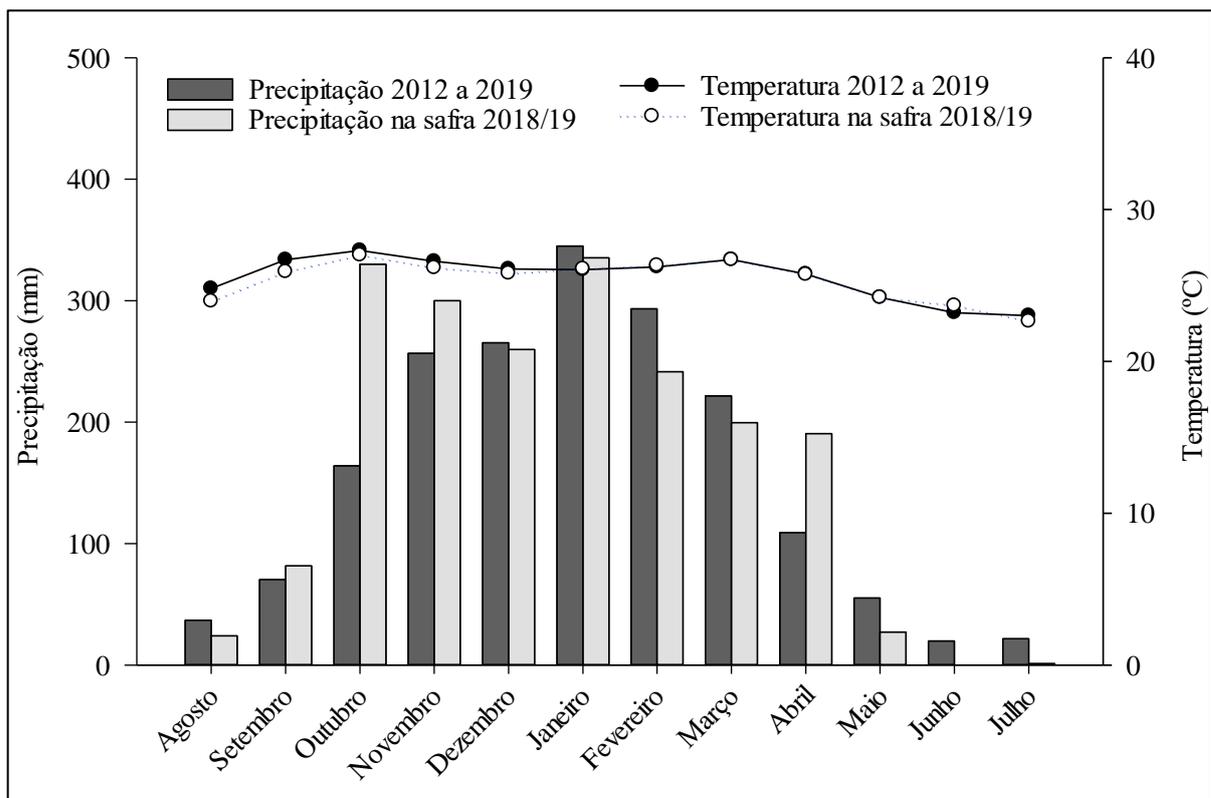


5.1 CARACTERIZAÇÃO E HISTÓRICO DA ÁREA DE ESTUDO

O experimento foi conduzido no bioma Cerrado sobre um Latossolo Vermelho distrófico (EMBRAPA, 2018), de textura muito argilosa. A distribuição das frações de textura do solo na camada 0-20 cm é de 664 g argila kg^{-1} , 167 g silte kg^{-1} e 169 g areia kg^{-1} . O clima da região, segundo classificação de Köppen, é Aw (Tropical úmido), com chuvas concentradas

no verão (outubro a abril) e estação seca pronunciada entre os meses de maio e setembro. A pluviosidade média anual da região é de 1.800 mm e temperatura média de 25,5 °C. A temperatura média anual e a precipitação média anual dos últimos 7 anos e na safra 2018/2019 na estação experimental estão apresentadas na Figura 2.

Figura 2 – Distribuição da precipitação e temperatura média de sete anos (agosto de 2012 a julho de 2019) e da safra 2018/2019 (agosto de 2018 a julho de 2019) na estação experimental da Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso, localizada no município de Itiquira-MT.



Fonte: dados obtidos na estação experimental localizada no Centro de Aprendizagem e Difusão – Sul da Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso, localizado no município de Itiquira-MT.

O experimento foi implantado em 2008 em uma área de 5,1 ha. Antes da implantação do experimento, nos 25 anos anteriores, a área foi cultivada com soja, sob alta tecnologia, com eventuais culturas de entressafra (milheto, sorgo ou milho). Aplicações de corretivo da acidez e fertilizantes foram realizadas em taxas desconhecidas. Na implantação do experimento foi realizado o preparo da área com subsolador (profundidade de 40 cm), grade aradora com disco 32” (homogeneização) e grade niveladora (nivelamento para semeadura). As propriedades químicas do solo no momento da implantação do experimento, na camada de 0-20 cm, eram as seguintes: $pH_{(CaCl_2)} = 5,1$; $H+Al = 4,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, $Al \text{ trocável} = 0,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; P disponível

(Mehlich-1) = 20,3 mg dm⁻³; K disponível (Mehlich-1) = 86 mg dm⁻³; Ca trocável (KCl 1 M) = 2,4 cmol_c dm⁻³; Mg trocável (KCl 1 M) = 0,9 cmol_c dm⁻³; MOS = 2,7%; CTC_{pH 7,0} = 7,6 cmol_c dm⁻³; e saturação por bases = 46%. No momento da implantação do experimento não houve aplicação de corretivo da acidez do solo.

5.2 DESIGN EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido em bifatorial 6 x 2 com parcela subdividida, sendo seis sistemas de culturas e dois preparos de solo, totalizando 12 tratamentos. O experimento foi conduzido em delineamento blocos ao acaso, com quatro repetições. O fator principal é composto por seis diferentes sistemas de culturas e o fator de subparcela é composto pelo PC e PD. Os sistemas de culturas consistem em:

- (i) Algodão seguido de pousio na entressafra;
- (ii) Milheto como planta de cobertura seguido de algodão;
- (iii) Braquiária como planta de cobertura seguida de algodão até a safra 2013/14; milheto como planta de cobertura seguido de algodão a partir da safra 2014/15;
- (iv) Soja seguido de milho de segunda safra e no ano seguinte milheto como planta de cobertura seguido de algodão;
- (v) Milheto como planta de cobertura seguido de algodão, no ano seguinte cultivo de soja seguido de milho de segunda safra em consórcio com braquiária na entrelinha, e no terceiro ano cultivo de crotalária como planta de cobertura seguido de algodão. A partir da safra 2016/17 a crotalária não foi mais utilizada como planta de cobertura, permanecendo o solo coberto pela presença da braquiária proveniente do cultivo na safra anterior;
- (vi) Milheto como planta de cobertura seguido de algodão, no segundo ano cultivo de soja seguido de crotalária como cultura de cobertura e no terceiro ano milho como cultura principal em consórcio com braquiária até a safra 2013/14. A partir da safra 2014/15, o milheto não foi mais utilizado como planta de cobertura neste sistema, permanecendo o solo coberto pela braquiária proveniente do cultivo na safra anterior.

Na safra 2018/19, o cultivo do algodão foi substituído por soja em todas as parcelas experimentais. O sistema de culturas iii não foi utilizado neste estudo, pois as parcelas desse sistema sob PD passaram a receber subsolagem anual a partir do ano de 2014, descaracterizando o PD. As culturas que foram utilizadas em cada tratamento e em cada ano agrícola de condução do experimento estão descritas na Tabela 1. Maiores detalhes podem ser observados no croqui do experimento (Apêndice B).

Tabela 1 – Sequência de culturas utilizadas a partir da safra 2008/09 até a safra 2018/19, nos sistemas de culturas implementados no experimento localizado no Centro de Aprendizagem e Difusão – Sul da Fundação de Apoio à Pesquisa Agropecuária de Mato Grosso, em Itiquira/MT.

Safra	Tratamentos				
	P/A ⁽¹⁾	Mt/A	S/M–Mt/A	Mt/A–S/M+B–B/A	B/A–S/C–M+B
2008/09	Pousio/Algodão	Milheto/Algodão	Soja/Milho	Milheto/Algodão	Milheto/Algodão
2009/10	Pousio/Algodão	Milheto/Algodão	Milheto/Algodão	Soja/ Milho + Braquiária	Soja/Crotalária
2010/11	Pousio/Algodão	Milheto/Algodão	Soja/Milho	Crotalária/Algodão	Milho + Braquiária
2011/12	Pousio/Algodão	Milheto/Algodão	Milheto/Algodão	Milheto/Algodão	Milheto/Algodão
2012/13	Pousio/Algodão	Milheto/Algodão	Soja/Milho	Soja/ Milho + Braquiária	Soja/Crotalária
2013/14	Pousio/Algodão	Milheto/Algodão	Milheto/Algodão	Crotalária/Algodão	Milho + Braquiária
2014/15	Pousio/Algodão	Milheto/Algodão	Soja/Milho	Milheto/Algodão	Braquiária ⁽²⁾ /Algodão
2015/16	Pousio/Algodão	Milheto/Algodão	Milheto/Algodão	Soja/ Milho + Braquiária	Soja/Crotalária
2016/17	Pousio/Algodão	Milheto/Algodão	Soja/Milho	Braquiária ⁽²⁾ /Algodão	Milho + Braquiária
2017/18	Pousio/Algodão	Milheto/Algodão	Milheto/Algodão	Milheto/Algodão	Braquiária ⁽²⁾ /Algodão
2018/19	Pousio/Soja	Soja/Milheto	Soja/Milho	Soja/Milho + Braquiária	Soja/Crotalária

⁽¹⁾ P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalária–Milho+Braquiária. ⁽²⁾ Braquiária remanescente do cultivo na safra anterior.

O PC do solo consiste na utilização de grade aradora na entressafra. Até o ano de 2016, a gradagem foi realizada em todas as parcelas experimentais cultivadas sob PC, independente da cultura presente. A partir do ano de 2016, o uso da grade aradora foi realizado apenas nos sistemas de culturas sob PC que foram cultivados com algodão, com o objetivo de eliminar os restos culturais. O PD consiste na semeadura direta, com mínimo revolvimento do solo e manutenção da palhada sobre a superfície do solo.

A dimensão da parcela principal é de 20 x 43 m onde são cultivados os sistemas de culturas. As parcelas principais são subdivididas, onde são realizados o PD e o PC do solo em subparcelas de 10 x 43 m, totalizando 430 m² por tratamento. Todos os sistemas de culturas possuem parcelas adicionais para que as culturas utilizadas nos sistemas de culturas sejam repetidas todos os anos, variando apenas a ordem (ano) em que são cultivadas no tratamento, com o objetivo de reduzir o efeito da variação climática sobre a produtividade das culturas. Nos tratamentos que possuem parcelas adicionais, apenas uma parcela foi amostrada para ser utilizada neste estudo, já que tinham sido submetidas aos mesmos tratamentos após 11 anos de condução. Todos os tratamentos permanecem por algum período em pousio no inverno, sendo que o período é determinado pelo ciclo das culturas.

5.3 MANEJO DAS CULTURAS

A soja e o milho são utilizados como culturas produtoras de grãos, o algodão é utilizado como cultura produtora de fibras e as demais culturas são utilizadas como plantas de cobertura. As cultivares de algodão e soja, os híbridos de milho (primeira e segunda safra) e as espécies de plantas de cobertura utilizadas em cada ano agrícola estão descritas na Tabela 2. Na semeadura das culturas é utilizado espaçamento de 45 cm entre linhas para a soja e o milho de primeira e segunda safra e 90 cm de espaçamento para o algodão. A densidade de plantas utilizada é definida de acordo com a recomendação de cada cultura. As plantas de cobertura foram semeadas a lanço até a safra 2014/15, e incorporadas ao solo pelo arraste de correntes sobre a superfície do solo. A partir da safra 2015/16, as plantas de cobertura passaram a ser semeadas com espaçamento de 17 cm, com exceção da braquiária. A braquiária foi semeada no sulco de semeadura do milho misturada junto aos fertilizantes nas safras 2015/16 e 2016/17. A partir da safra 2017/18, a braquiária foi semeada sobre a superfície do solo, e incorporada com o auxílio da máquina semeadoura no momento da semeadura do milho.

Tabela 2 – Cultivares de algodão e soja, híbridos de milho e espécies de plantas de cobertura utilizadas em cada ano agrícola de condução do experimento.

Safr	Algodão	Soja	----- Milho -----		----- Plantas de cobertura -----		
			1ª safra	2ª safra	Milheto	Braquiária	Crotalária
2008/09	FMT 701 ⁽¹⁾	TMG 123 RR	P30F35	30K75Y	<i>P. glaucum</i> (ADR-300)	<i>Urochloa ruziziensis</i>	<i>Crotalaria ochroleuca</i>
2019/10	FMT 707	TMG 123 RR	DKB 390 Y	DKB 390 Y	<i>P. glaucum</i> (ADR-300)	<i>Urochloa ruziziensis</i>	<i>Crotalaria ochroleuca</i>
2010/11	FMT 701	TMG 1176 RR	P30F35 Hx	P30F35 Hx	<i>P. glaucum</i> (ADR-300)	<i>Urochloa ruziziensis</i>	<i>Crotalaria ochroleuca</i>
2011/12	FMT 709	TMG 1176 RR	P30F35 Hx	P30F35 Hx	<i>P. glaucum</i> (ADR-300)	<i>Urochloa ruziziensis</i>	<i>Crotalaria spectabilis</i>
2012/13	FMT 709	TMG 1176 RR	P30F35 Hx	P30F35 Hx	<i>P. glaucum</i> (ADR-300)	<i>Urochloa ruziziensis</i>	<i>Crotalaria ochroleuca</i>
2013/14	TMG 81 WS	TMG 1176 RR	P30F35 YH	P30F35 YH	<i>P. glaucum</i> (ADR-300)	<i>Urochloa ruziziensis</i>	<i>Crotalaria ochroleuca</i>
2014/15	TMG 81 WS	TMG 7262 RR	DKB310 PRO	DKB310 PRO	<i>P. glaucum</i> (ADR-300)	<i>Urochloa ruziziensis</i>	<i>Crotalaria ochroleuca</i>
2015/16	TMG 47 B2RF	M 7739 IPRO	2B610 PW	2B610 PW	<i>P. glaucum</i> (ADR-300)	<i>Urochloa ruziziensis</i>	<i>Crotalaria ochroleuca</i>
2016/17	TMG 47 B2RF	BRS 7380RR	2B610 PW	2B610 PW	<i>P. glaucum</i> (ADR-300)	<i>Urochloa ruziziensis</i>	<i>Crotalaria ochroleuca</i>
2017/18	TMG 47 B2RF	TMG 7067 IPRO	P30F35 VYHR	P30F35 VYHR	<i>P. glaucum</i> (ADR-300)	<i>Urochloa ruziziensis</i>	<i>Crotalaria ochroleuca</i>
2018/19	–	BMX Ultra IPRO	P3707 VYH	P3707 VYH	<i>P. glaucum</i> (ADR-300)	<i>Urochloa ruziziensis</i>	<i>Crotalaria ochroleuca</i>

⁽¹⁾ FMT = Fundação Mato Grosso; TMG = Tropical Melhoramento & Genética; ADR = ATTO Adriana Sementes; DKB = DEKALB Brasil; P = Pionner; BRS = Embrapa; BMX = Brasmax.

A adubação das culturas é realizada apenas nas culturas comerciais. A adubação fosfatada é realizada no sulco de semeadura para as culturas da soja, milho e algodão. A fonte utilizada para soja e o algodão é o superfosfato simples (SSP, 18% de P₂O₅, 18% de Ca e 10% de S), e para o milho é o monoamônio fosfato (MAP, 48% de P₂O₅ e 9% de N). A adubação potássica é realizada em superfície logo após a semeadura das culturas e a fonte utilizada é o cloreto de potássio (KCl, 58% de K₂O). Na cultura do milho e algodão, a fonte de N utilizada é a uréia (45% de N) aplicado em superfície no solo no estágio fenológico V4 das culturas. Além disso, é realizado uma adubação suplementar em superfície de N e enxofre (S) via sulfato de amônio (SA, 20% de N e 23% de S) na cultura do algodão. Na semeadura do milho foi adicionado ao solo zinco (Zn) via Zincodur (25% de Zn e 6% de S) e na semeadura do algodão foi adicionado Produbor (10% de B) como fonte de boro (B). As quantidades de nutrientes adicionados para cada cultura em cada ano agrícola e a quantidade total de nutrientes em cada sistema de culturas, adicionados via adubação, após 11 anos de cultivo estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Quantidade anual de nutrientes adicionados ao solo através da adubação para as culturas de produção de grãos (soja e milho) e fibras (algodão) e total adicionado ao solo em cada sistema de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalária–Milho+Braquiária) após 11 anos de cultivo.

Cultura	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	S	B	Zn
Aplicação anual (kg ha ⁻¹)							
Soja	–	45	90 ⁽²⁾	38	25	–	–
Milho verão	40+120 ⁽¹⁾	50	50 ⁽²⁾	–	–	–	2,5
Milho safrinha	40+60 ⁽¹⁾	40	30 ⁽²⁾	–	–	–	2,5
Algodão	40+120 ⁽¹⁾	70	120 ⁽²⁾	60	38+72 ⁽¹⁾	2	–
Sistemas de culturas Aplicação total após 11 anos de cultivo (kg ha ⁻¹)							
P/A	1600	745	1290	638	1125	20	-
Mt/A	1600	745	1290	638	1125	20	-
S/M–Mt/A	1400	860	1320	528	700	10	15
Mt/A–S/M+B–B/A	1760	870	1400	572	870	14	10
B/A–S/C–M+B	1120	610	990	392	540	8	7,5

⁽¹⁾ Aplicação no sulco de semeadura e em superfície. ⁽²⁾ Aplicação em superfície.

O calcário dolomítico (PRNT próximo à 90%) foi aplicado quatro vezes, em 2012, 2014, 2016 e 2018 a uma taxa de 2,5 Mg ha⁻¹ por aplicação, totalizado 10 Mg ha⁻¹ em todas as parcelas. O gesso agrícola foi aplicado no ano de 2018 a uma taxa de 3,2 Mg ha⁻¹ em todas as parcelas. O calcário dolomítico e o gesso agrícola foram aplicados em superfície no PD e incorporado no PC.

5.4 AMOSTRAGEM E PREPARO DAS AMOSTRAS DE SOLO

Para este estudo, amostras de solo foram coletadas em setembro de 2019, após 11 anos de cultivo. As amostras de solo deformadas foram coletadas de 0 a 40 cm de profundidade em seis camadas estratificadas: 0-5, 5-10; 10-15; 15-20; 20-30 e 30-40 cm. Para isso, em cada parcela foi aberto uma trincheira de aproximadamente 50 x 50 x 50 cm, localizada em posição central na parcela experimental. A coleta foi realizada no sentido perpendicular à linha de semeadura, iniciando-se do meio de uma entrelinha e até o meio da outra entrelinha. Após a coleta, o solo foi seco em estufa de circulação forçada de ar a 45°C, destorroado com rolo de madeira, peneirado em malha de 2 mm e armazenado em recipientes plásticos para posterior análise em laboratório.

Nas camadas 0-5 e 5-20 cm foram coletadas amostras de solo indeformadas para determinação da densidade aparente do solo usando anéis volumétricos metálicos, segundo metodologia descrita por Teixeira et al. (2017). Após a coleta, as amostras foram secas em estufa a 105°C por 48 horas e determinada a massa seca de solo em balança analítica de precisão.

Além da coleta do solo na área experimental, a fim de conhecer e caracterizar as condições naturais do solo do Cerrado, amostras de solo também foram coletadas em uma área sob VN do Cerrado, adjacente a área experimental (17°09'06,7"S, 54°42'27,5"W e 490 m de altitude). A sistemática de amostragem, as camadas amostradas e os procedimentos de preparo do solo para análises foram as mesmas adotadas no solo do experimento.

5.5 ANÁLISES QUÍMICAS DO SOLO

Uma porção do solo coletado em cada camada, seco e peneirado com malha 2 mm, foi separado para as análises químicas dos atributos da acidez e dos teores de macronutrientes do solo. O pH do solo foi determinado em suspensão aquosa (1:2,5) segundo metodologia descrita por Teixeira et al. (2017). Os teores de Al, Ca e Mg trocáveis do solo foram extraídos por solução KCl 1 mol L⁻¹ (1:20) (TEDESCO et al., 1995). O Al trocável foi determinado por titulação com solução padronizada de hidróxido de sódio (NaOH) 0,0125 mol L⁻¹ e o Ca e Mg trocáveis em espectrofotômetro de absorção atômica (PerkinElmer - AAnalyst 200). Os teores de K e P disponíveis do solo foram extraídos por solução Mehlich-1 (1:10), de acordo com metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). O teor de K foi determinado em espectrofotômetro de chama e o teor de P foi determinado por fotolorimetria pelo método de Murphy e Riley (1962). A acidez potencial do solo foi determinada, após extração com solução de acetato de cálcio (C₄H₆CaO₄) 0,5 mol L⁻¹ (pH 7,1-7,2), por titulação com solução de NaOH 0,025 mol L⁻¹ padronizada (TEIXEIRA et al., 2017). A capacidade de troca de cátions potencial (CTC_{pH 7,0}) do solo foi calculada pela soma de (H + Al) + Ca + Mg + K. A saturação por Al (*m*) do solo foi calculada da seguinte forma: $m (\%) = \text{Al} / (\text{Al} + \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K}) * 100$. A saturação por bases (*V*) do solo foi calculada da seguinte forma: $V (\%) = (\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K}) / \text{CTC}_{\text{pH } 7,0} * 100$.

5.6 DETERMINAÇÃO DO CARBONO ORGÂNICO TOTAL E ESTOQUE DE CARBONO DO SOLO

Uma porção do solo seco e peneirado com malha 2 mm foi moído em almofariz até obter granulometria de talco para determinação dos teores totais de COS em analisador elementar de combustão seca (Flash EA 1112, Thermo Finnigan, Milan, Italy). O teor de MOS foi calculado multiplicando o teor total de COS por 1,724 (fator de Van-Bemmelen), assumindo que 58% da MOS é composta de C orgânico. O EC do solo na camada 0-20 cm foi calculado pelo método da massa equivalente de solo, utilizando o solo da área sob vegetação natural do Cerrado como referência. O EC do solo foi calculado pela seguinte equação:

$$EC_c = EC - M_{ex} * (C/1000) \quad (1)$$

Onde: EC_c = estoque de carbono corrigido ($Mg\ C\ ha^{-1}$); M_{ex} = massa de solo excedente (g); C = conteúdo de carbono do solo ($g\ kg^{-1}$).

O EC foi calculado de acordo com a equação 2:

$$EC = C * D_s * E * 10 \quad (2)$$

Onde: D_s = densidade do solo ($g\ cm^{-3}$); E = espessura da camada (m).

A massa excedente de solo foi calculada de acordo com a equação 3:

$$M_{ex} = M_{s(treatamento)} - M_{s(referência)} \quad (3)$$

Onde: M_s = massa de solo (g).

A massa de solo foi calculada de acordo com a equação 4:

$$M_s = D_s * E * 100 \quad (4)$$

O EC foi calculado para o solo das camadas 0-5 e 5-20 cm. Para o solo da camada 5-20 cm foi utilizada a média do teor de C do solo das camadas 5-10, 10-15, e 15-20 cm. O EC do solo da camada 0-20 cm foi calculado pela soma do EC do solo das camadas 0-5 e 5-20 cm.

5.7 FRACIONAMENTO FÍSICO DO CARBONO ORGÂNICO DO SOLO

O fracionamento do COS foi realizado no solo das camadas amostradas até 20 cm de profundidade pelo método granulométrico adaptado de Cambardella e Elliott (1992). Para isso, 20 gramas do solo seco e peneirado com malha de 2 mm foram adicionados em frascos do tipo “snap-cap” com capacidade para 100 ml. Em cada snap-cap foram adicionadas 2 esferas de teflon com aproximadamente 5 mm de diâmetro para favorecer o processo de desagregação do solo. Posteriormente, foram adicionados 70 ml de hexametáfosfato de sódio $[(\text{NaPO}_3)_6]$ na concentração de 5 g L^{-1} e realizada a agitação das amostras por 15 horas em agitador horizontal (120 oscilações por minuto).

Após a agitação, a suspensão foi passada em peneiras de malha 0,250 mm e 0,053 mm com auxílio de um jato de água. Os materiais retidos nas peneiras foram transferidos separadamente para recipientes metálicos e secos em estufa a 55°C até peso constante. Após a secagem, foi determinada a massa de cada amostra em balança analítica de precisão. As amostras foram moídas em almofariz e determinado o conteúdo de C orgânico em analisador elementar de combustão seca (Flash EA 1112, Thermo Finnigan, Milan, Italy). O C da fração não retida nas peneiras constitui o material de tamanho correspondente a silte e argila. A concentração de C nesta fração foi obtida pela diferença entre o teor de C total e o teor de C obtidos nas demais frações.

Dessa forma, foram isoladas três frações: fração de tamanho 250–2000 μm , denominada fração de carbono associado a areia grossa (COAG), consistindo de resíduos orgânicos em estágio inicial de decomposição; fração de tamanho de 53–250 μm , denominada fração de carbono associada a areia fina (COAF), que consiste em materiais em grau intermediário de decomposição; e fração de tamanho menor que 53 μm , denominada fração de carbono associado aos minerais silte e argila (COAM), que corresponde ao carbono orgânico do solo estabilizado na fração mineral. O EC das frações também foi calculado para o solo da camada 0-20 cm.

5.8 RAZÃO DE ESTRATIFICAÇÃO DE CARBONO

A REC foi calculada conforme proposto por Franzluebbbers (2002) e apresentada na equação 5:

$$REC = \frac{\text{COS da camada superficial (0 - 5 cm)}}{\text{COS da camada subsuperficial (5 - 20 cm)}} \quad (5)$$

Onde REC = razão de estratificação de carbono; COS = carbono orgânico do solo (g kg^{-1}).

O teor de carbono orgânico total (COT) do solo na camada subsuperficial foi calculado pela média do teor de COT do solo das camadas 5-10, 10-15 e 15-20 cm, equivalente a profundidade de 5-20 cm.

5.9 ÍNDICE DE MANEJO DE CARBONO

A partir dos resultados de EC total do solo foi calculado o IMC, adaptado de Blair et al. (1995) para o solo da camada 0-20 cm, utilizando como C lábil o carbono orgânico particulado (COP) oriundo do fracionamento físico da COS. O COP foi obtido pela soma das frações COAG e COAF. O índice refere-se à medida relativa das alterações provocadas pelo manejo do solo em comparação a uma situação de solo original, tida como referência. Como condição original foi utilizado o solo coletado na área de VN do Cerrado (IMC=100). O IMC foi calculado de acordo com a equação 6:

$$IMC = IEC * IL * 100 \quad (6)$$

Onde IMC = Índice de manejo de carbono; IEC = índice de estoque de carbono; IL = índice de labilidade.

O índice de estoque de carbono foi calculado de acordo com a equação 7:

$$IEC = \frac{ECOT_{\text{trat}}}{ECOT_{\text{ref}}} \quad (7)$$

Onde IEC = Índice de estoque de carbono; $ECOT_{\text{trat}}$ = estoque de carbono orgânico total corrigido do solo dos tratamentos na camada 0-20 cm (Mg C ha^{-1}); $ECOT_{\text{ref}}$ = estoque de carbono orgânico total corrigido do solo da área de referência na camada 0-20 cm (Mg C ha^{-1}).

O índice de labilidade do carbono foi calculado de acordo com a equação 8:

$$IL = \frac{L_{\text{trat}}}{L_{\text{ref}}} \quad (8)$$

Onde IL = Índice de labilidade do carbono orgânico; L_{trat} = Labilidade do carbono do tratamento em questão; L_{ref} = Labilidade do carbono da área de referência.

A labilidade do carbono foi calculada de acordo com a equação 9:

$$L = \frac{COP}{COAM} \quad (9)$$

Onde L = Labilidade do carbono orgânico; COP = carbono orgânico particulado ($g\ C\ kg^{-1}$); e $COAM$ = carbono orgânico associado aos minerais ($g\ C\ kg^{-1}$).

5.10 PRODUTIVIDADE DE GRÃOS

A determinação da produtividade da soja foi realizada pela equipe da Fundação MT. Para isso, um ponto representativo de cada parcela foi demarcado, constituído de 14 linhas de 5 metros de comprimento, totalizando $31,5\ m^2$. As plantas foram colhidas e a produtividade obtida através da trilha mecânica e pesagem dos grãos oriundos das plantas colhidas da área útil da parcela com a umidade corrigida para 13% (base úmida).

5.11 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para os resultados dos atributos químicos, o delineamento experimental utilizado foi um fatorial $5 \times 2 \times 6$, com os sistemas de culturas como fator principal, preparos de solo como subparcela e camadas de solo como sub-subparcela. Para a análise de variância dos dados (ANOVA), o seguinte modelo foi utilizado:

$$y_{ijkl} = \mu + \beta_i + S_j + \text{erro a}(i, j) + P_k + \text{erro b}(i, k) + SP_{jk} + \text{erro c}(i, j, k) + C_l + \text{erro d}(i, l) + SC_{jl} + \text{erro e}(i, j, l) + PC_{kl} + \text{erro f}(i, k, l) + SPC_{jkl} + \text{erro g}(i, j, k, l)$$

Onde, y_{ijkl} = variável resposta observada; μ = média geral experimental; β = blocos ($i = 4$); S = sistemas de culturas ($j = 5$); P = preparo do solo ($k = 2$); C = camada de solo ($l = 6$) e erro = erro experimental.

Para os resultados de COT e as frações do COS, o delineamento experimental utilizado foi um fatorial $5 \times 2 \times 4$, com os sistemas de culturas como fator principal, preparos de solo

como subparcela e camadas de solo como sub-subparcela. Para a análise de variância dos dados (ANOVA), o seguinte modelo foi utilizado:

$$y_{ijkl} = \mu + \beta_i + S_j + \text{erro a (i, j)} + P_k + \text{erro b (i, k)} + SP_{jk} + \text{erro c (i, j, k)} + C_l + \text{erro d (i, l)} + SC_{jl} + \text{erro e (i, j, l)} + PC_{kl} + \text{erro f (i, k, l)} + SPC_{jkl} + \text{erro g (i, j, k, l)}$$

Onde y_{ijkl} = variável resposta observada; μ = média geral experimental; β = blocos ($i= 4$); S = sistemas de culturas ($j = 5$); P = preparo do solo ($k= 2$); C = camada de solo ($l = 4$) e erro = erro experimental.

Para os resultados de EC total e das frações, índices REC e IMC, e a produtividade da soja, o delineamento experimental utilizado foi fatorial 5×2 , sendo o fator principal os sistemas de culturas e fator de sub-parcela os preparos do solo. O modelo utilizado para análise de variância (ANOVA) está descrito a seguir:

$$y_{ijkl} = \mu + \beta_i + S_j + \text{erro a (i, j)} + P_k + \text{erro b (i, k)} + SP_{jk} + \text{erro c (i, j, k)}$$

Onde y_{ijkl} = variável resposta observada; μ = média geral experimental; β = blocos ($i= 4$); S = sistemas de culturas ($j = 5$); P = preparo do solo ($k= 2$); e erro = erro experimental.

Após a ANOVA, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste Scott-Knott ($p < 0,05$). Todas as análises estatísticas foram realizadas no software SISVAR 5.3 (FERREIRA, 2008).

6 RESULTADOS

6.1 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

6.1.1 Atributos da acidez do solo

Os atributos da acidez do solo avaliados neste estudo foram o pH do solo, a V, o Al trocável, a *m* e a acidez potencial. Na análise de variância (Apêndice D), foi observado interação entre os sistemas de culturas, preparos de solo e camadas de solo para os valores de pH e V do solo do experimento.

Não foi observado diferenças ($p < 0,05$) no valor de pH do solo entre os sistemas de culturas sob PC na camada 0-20 cm (Tabela 4). Nas camadas abaixo de 20 cm, o sistema de cultura Mt/A se distinguiu dos demais sistemas, apresentando os maiores valores de pH do solo. Sob PD, foi observado diferenças no valor de pH do solo na camada 5-20 cm em função dos sistemas de culturas, sendo que o sistema Mt/A se destacou significativamente dos demais, apresentando os maiores valores de pH do solo (entre 6,3 e 5,3).

Os maiores valores de pH (em torno de 6,5) foram observados no solo da camada superficial (0-5 cm) sob PD, enquanto que, nas demais camadas, os maiores valores de pH do solo foram observados sob PC (Tabela 4). O preparo de solo alterou o pH do solo na camada 10-30 cm de profundidade. Sob PC, não foi observado diferenças no valor de pH do solo entre as camadas até 15 a 20 cm aproximadamente, com valores superiores a 6,0. Sob PD, houve um decréscimo gradativo nos valores de pH com o aumento da profundidade de solo.

Sob PC, não houve diferença significativa ($p < 0,05$) para os valores de pH do solo entre as camadas até 15 cm de profundidade para os sistemas de culturas S/M–Mt/A e B/A–S/C–M+B, com valores médios de 6,4 (Tabela 4). Os demais sistemas de culturas não apresentaram diferença estatística entre as camadas de solo até 20 cm de profundidade, com valores médios de pH de 6,2 para os sistemas de culturas P/A e Mt/A, e 6,1 para o sistema de culturas Mt/A–S/M+B–B/A. Já sob PD, houve um decréscimo gradativo nos valores de pH do solo com o aumento da profundidade, independentemente do sistema de culturas. Os maiores valores de pH foram observados no solo da camada superficial e os menores valores no solo das camadas mais profundas, onde os valores foram inferiores a 5,1.

Tabela 4 – Valores de pH do solo em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalária–Milho+Braquiária) e preparos de solo (preparo convencional e plantio direto), após onze anos de cultivo em Itiquira - MT.

Sistemas de culturas	P/A	Mt/A	S/M–Mt/A	Mt/A–S/M+B–B/A	B/A–S/C–M+B
Camada de solo (cm)	----- pH do solo -----				
	Preparo convencional				
0-5	6.1 aA ^{*(1)}	6.3 aA*	6.4 aA	6.3 aA	6.4 aA
5-10	6.2 aA*	6.3 aA	6.5 aA*	6.0 bA	6.4 aA
10-15	6.3 aA*	6.2 aA*	6.4 aA*	6.1 aA*	6.3 aA*
15-20	6.1 aA*	6.2 aA*	5.9 aB*	6.1 aA*	5.9 aB*
20-30	5.1 bB*	5.8 aB*	5.3 bC*	5.3 bB*	5.1 bC*
30-40	4.6 bC	5.1 aC*	4.9 bD	4.8 bC	4.8 bC
	Plantio direto				
0-5	6.5 aA	6.6 aA	6.5 aA	6.5 aA	6.6 aA
5-10	5.7 cB	6.3 aA	6.0 bB	6.0 bB	6.2 aB
10-15	5.1 bC	5.7 aB	5.3 bC	5.3 bC	5.3 bC
15-20	4.9 bD	5.3 aC	5.0 bD	4.9 bD	5.1 bC
20-30	4.8 aD	5.1 aD	4.9 aD	4.8 aD	4.8 aD
30-40	4.6 aD	4.8 aE	4.8 aD	4.7 aD	4.6 aD

⁽¹⁾ Letras minúsculas na linha comparam os sistemas de culturas dentro de cada camada e preparo de solo; letras maiúsculas na coluna comparam as camadas de solo dentro de cada sistema de culturas e preparo de solo; * indica diferença entre os preparos de solo dentro de cada sistema de culturas e camada de solo pelo teste Scott-Knott ($p < 0,05$).

Não houve diferença estatística ($p < 0,05$) para a V entre os sistemas de culturas sob PC no solo das camadas 10-15 e 30-40 cm (Tabela 5). Quando cultivado sob PD, não foi observado diferença significativa para a V entre os sistemas de culturas no solo da camada superficial (0-5 cm), com valor médio de V de 84%. De modo geral, o sistema de culturas Mt/A se destacou dos demais, com maiores valores de V do solo até 20 e 30 cm de profundidade sob PD e PC, respectivamente.

A V do solo foi alterada em resposta aos preparos de solo até 30 cm de profundidade, com exceção do sistema de culturas Mt/A, onde a diferença ocorreu até os 40 cm (Tabela 5). Os maiores valores de V foram observados no solo da camada superficial (0-5 cm) sob PD (entre 81 e 87%), enquanto que, nas demais camadas, os maiores valores foram observados no

solo sob PC. Sob PD, os valores de V não diferiram no solo da camada superficial (0-5 cm) em função dos sistemas de culturas (média de 84%). De modo similar ao pH, os maiores valores de V ocorreram no solo da camada superficial, reduzindo em profundidade.

Tabela 5 – Saturação por bases do solo em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalária–Milho+Braquiária) e preparos de solo (preparo convencional e plantio direto), após onze anos de cultivo em Itiquira - MT.

Sistemas de culturas	P/A	Mt/A	S/M–Mt/A	Mt/A–S/M+B–B/A	B/A–S/C–M+B
Camada de solo (cm)	----- Saturação por bases (%) -----				
	Preparo convencional				
0-5	69 bA ^{*(1)}	72 bA*	77 aA	68 bA*	78 aA*
5-10	65 aA*	70 aA*	71 aB*	55 bB*	70 aB*
10-15	64 aA*	64 aB*	68 aB*	59 aB*	64 aC*
15-20	57 aB*	59 aC*	47 bC*	56 aB*	47 bD*
20-30	29 cC*	41 aD*	26 cD*	34 bC*	27 cE*
30-40	21 aD	25 aE*	23 aD	23 aD	24 aE
	Plantio direto				
0-5	82 aA	86 aA	82 aA	81 aA	87 aA
5-10	44 cB	56 bB	56 bB	48 cB	62 aB
10-15	29 bC	36 aC	32 bC	30 bC	36 aC
15-20	25 bC	32 aC	25 bD	22 bD	27 bD
20-30	18 aD	25 aD	20 aD	21 aD	21 aE
30-40	24 aC	19 aE	21 aD	19 aD	20 aE

⁽¹⁾ Letras minúsculas na linha comparam os sistemas de culturas dentro de cada camada e preparo de solo; letras maiúsculas na coluna comparam as camadas de solo dentro de cada sistema de culturas e preparo de solo; * indica diferença entre os preparos de solo dentro de cada sistema de culturas e camada de solo pelo teste Scott-Knott ($p < 0,05$).

A acidez potencial do solo apresentou efeito de interação entre os sistemas de culturas e camadas de solo e entre os preparos de solo e camadas de solo (Apêndice D). Não foi observado diferença estatística ($p < 0,05$) entre os sistemas de culturas para os valores de acidez potencial no solo da camada superficial (0-5 cm), com exceção do sistema de culturas B/A–S/C–M+B, que apresentou menor valor de acidez potencial ($1,6 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), e no solo da camada 10-15 cm (Tabela 6). No solo da camada 5-10 cm, o sistema de culturas com maior

acidez potencial foi o Mt/A–S/M+B–B/A (4,3 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e no solo das camadas entre 15 e 40 cm de profundidade, os sistemas de culturas P/A e Mt/A não se diferiram entre si e apresentaram menor acidez potencial. Os menores valores de acidez potencial foram observados no solo da camada superficial (inferior a 2,3 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e os maiores valores no solo das camadas mais profundas (superiores a 4,5 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$).

Tabela 6 – Acidez potencial do solo em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalária–Milho+Braquiária), após onze anos de cultivo em Itiquira - MT.

Sistemas de culturas	P/A	Mt/A	S/M–Mt/A	Mt/A–S/M+B–B/A	B/A–S/C–M+B
Camada de solo (cm)	----- Acidez potencial ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) -----				
0-5	2,0 aE ⁽¹⁾	1,9 aD	1,9 aF	2,3 aD	1,6 bD
5-10	3,8 bD	3,1 cC	3,2 cE	4,3 aC	2,9 cC
10-15	4,4 aC	4,3 aB	4,3 aD	4,6 aC	4,5 aB
15-20	4,7 bB	4,6 bB	5,2 aB	5,1 aB	5,2 aA
20-30	5,2 bA	4,9 bA	5,9 aA	5,5 aA	5,5 aA
30-40	4,4 bC	4,4 bB	4,8 aC	5,1 aB	4,4 bB

⁽¹⁾ Letras minúsculas na linha comparam os sistemas de culturas dentro de cada camada de solo; letras maiúsculas na coluna comparam as camadas de solo dentro de cada sistema de culturas pelo teste Scott-Knott ($p < 0,05$).

Foi observado diferença estatística nos valores de acidez potencial do solo entre os preparos de solo até 30 cm de profundidade (Tabela 7). Os maiores valores de acidez potencial ocorreram no solo sob PD, com exceção do solo da camada superficial (0-5 cm), onde o PC apresentou maior valor. Sob PC, os menores valores de acidez potencial foram observados no solo da camada superficial, aumentando com a profundidade. Por sua vez, sob PD há um aumento da acidez potencial até 10 cm de profundidade, sendo o menor valor (1,6 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) observado no solo da camada 0-5 cm e os maiores valores observados no solo das camadas entre 10 e 30 cm, com valor médio de 6,0 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$.

Na análise de variância (Apêndice D) dos valores de Al trocável e m do solo foi observada interação entre preparos de solo e camadas de solo. Houve diferença estatística ($p < 0,05$) entre o preparo de solo para o teor de Al trocável e m no solo das camadas entre 10 e 30 cm de profundidade, sendo os maiores valores observados no solo sob PD (Tabela 8). Não foi

observado Al trocável e *m* no solo das camadas até 20 cm de profundidade sob PC e até 10 cm de profundidade sob PD. Os valores máximos de Al trocável ($0,4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e *m* (22%) foram observados no solo das camadas mais inferiores sob PD.

Tabela 7 – Acidez potencial do solo em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob preparo convencional e plantio direto, após onze anos de cultivo em Itiquira - MT.

Camada de solo (cm)	Preparo convencional	Plantio direto
	----- Acidez potencial ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) -----	
0-5	2,3 aE ⁽¹⁾	1,6 bD
5-10	2,8 bD	4,2 aC
10-15	2,9 bD	6,0 aA
15-20	3,8 bC	6,2 aA
20-30	5,0 bA	5,7 aA
30-40	4,5 aB	4,8 aB

⁽¹⁾ Letras minúsculas na linha comparam os preparos de solo dentro de cada camada de solo; letras maiúsculas na coluna comparam as camadas de solo dentro de cada preparo de solo pelo teste Scott-Knott ($p < 0,05$).

Tabela 8 – Alumínio trocável e saturação por alumínio do solo em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob preparo convencional e plantio direto, após onze anos de cultivo em Itiquira -MT.

Camada de solo (cm)	Preparo convencional	Plantio direto
	----- Alumínio trocável ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) -----	
0-5	0,00 aC ⁽¹⁾	0,00 aC
5-10	0,00 aC	0,00 aC
10-15	0,00 bC	0,15 aB
15-20	0,00 bC	0,32 aA
20-30	0,18 bB	0,40 aA
30-40	0,32 aA	0,39 aA
	----- Saturação por alumínio (%) -----	
0-5	0,0 aC	0,0 aD
5-10	0,0 aC	0,0 aD
10-15	0,0 bC	5,2 aC
15-20	0,0 bC	13,0 aB
20-30	7,5 bB	20,6 aA
30-40	19,2 aA	23,2 aA

⁽¹⁾ Letras minúsculas na linha comparam os preparos de solo dentro de cada camada de solo; letras maiúsculas na coluna comparam as camadas de solo dentro de cada preparo de solo pelo teste Scott-Knott ($p < 0,05$).

6.1.2 Disponibilidade de P, K, Ca e Mg

Os teores de nutrientes do solo avaliados neste estudo foram P e K disponíveis e Ca e Mg trocáveis. Na análise de variância (Apêndice D), os teores de P e de K disponíveis e de Ca e de Mg trocáveis apresentaram efeito de interação entre sistemas de culturas, preparos de solo e camadas de solo.

Foi observado diferença estatística para o conteúdo de P disponível entre os sistemas de culturas sob PC apenas no solo das camadas entre 10 e 20 cm de profundidade (Tabela 9). Os maiores conteúdos de P disponível no solo da camada 10-15 cm ocorreram nos sistemas de culturas S/M-Mt/A e B/A-S/C-M+B (média de 20,5 mg P kg⁻¹), enquanto que o menor conteúdo foi observado no solo sob o sistema de culturas Mt/A (6,8 mg P kg⁻¹). Por sua vez, sob PD houve diferença estatística significativa no conteúdo de P disponível do solo entre os sistemas de culturas até 20 cm de profundidade. De modo geral, o sistema de culturas P/A apresentou os maiores conteúdos de P disponível, acima de 27 mg kg⁻¹ no solo até 15 cm de profundidade e 11,7 mg kg⁻¹ no solo da camada 15-20 cm.

Comparando os preparos de solo, de modo geral, foi observado diferença estatística no conteúdo de P disponível do solo até 20 cm de profundidade para os sistemas de culturas Mt/A-S/M+B-B/A e B/A-S/C-M+B; até 15 cm de profundidade para os sistemas de culturas P/A e Mt/A; enquanto que, para o sistema de culturas S/M-Mt/A, houve diferença apenas no solo da camada 5-10 cm de profundidade (Tabela 9). A maior disponibilidade de P foi observada no solo sob PD. No solo das camadas abaixo de 20 cm de profundidade, independente do preparo de solo, foram observados teores de P disponível inferiores a 2,6 mg kg⁻¹.

Os sistemas de culturas P/A, Mt/A e Mt/A-S/M+B-B/A sob PC apresentaram duas camadas distintas entre si, 0-20 cm e 20-40 cm. Até 20 cm de profundidade, não foi observado diferença estatística no conteúdo de P disponível do solo entre esses sistemas de culturas (Tabela 9). Nos sistemas de culturas S/M-Mt/A e B/A-S/C-M+B, percebe-se incremento de P no solo da camada 10-15 cm, estatisticamente diferente das demais camadas. Sob PD, de modo geral, os maiores conteúdos de P disponível ocorrem no solo das camadas até 15 cm de profundidade, independente do sistema de culturas.

Tabela 9 – Fósforo disponível do solo em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalária–Milho+Braquiária) e preparos de solo (preparo convencional e plantio direto), após onze anos de cultivo em Itiquira – MT.

Sistemas de culturas	P/A	Mt/A	S/M–Mt/A	Mt/A–S/M+B–B/A	B/A–S/C–M+B
Camada de solo (cm)	----- Fósforo disponível (mg kg ⁻¹) -----				
	Preparo convencional				
0-5	12,8 aA ^{*(1)}	10,1 aA*	13,4 aB	12,7 aA	14,1 aB*
5-10	12,6 aA*	8,7 aA*	12,8 aB*	13,3 aA*	11,8 aB*
10-15	13,4 bA*	6,8 cA*	21,1 aA	11,6 bA*	19,9 aA
15-20	13,5 aA	5,9 bA	8,0 bC	11,2 aA*	12,2 aB*
20-30	2,5 aB	2,6 aB	4,4 aC	1,8 aB	1,8 aC
30-40	0,0 aB	0,0 aB	0,0 aD	0,0 aB	0,0 aC
	Plantio direto				
0-5	27,9 aA	21,6 bA	15,6 cB	14,6 cC	21,0 bA
5-10	27,0 aA	17,5 bA	20,8 bA	23,8 aB	19,8 bA
10-15	28,6 aA	12,5 cB	22,2 bA	29,6 aA	24,8 bA
15-20	11,7 aB	10,7 aB	6,8 bC	4,2 bD	6,8 bB
20-30	1,6 aC	0,4 aC	1,3 aD	1,1 aD	0,4 aC
30-40	0,0 aC	0,0 aC	0,1 aD	0,3 aD	0,0 aC

⁽¹⁾ Letras minúsculas na linha comparam os sistemas de culturas dentro de cada camada e preparo de solo; letras maiúsculas na coluna comparam as camadas de solo dentro de cada sistema de culturas e preparo de solo; * indica diferença entre os preparos de solo dentro de cada sistema de culturas e camada de solo pelo teste Scott-Knott ($p < 0,05$).

Para o teor de K disponível, houve diferença estatística entre os sistemas de culturas no solo das camadas até 30 cm de profundidade sob PC e, de modo geral, até 20 cm de profundidade sob PD (Tabela 10). O sistema de culturas Mt/A se destacou dos demais, apresentando teores de K que chegaram a 304 e 270 mg K kg⁻¹ no solo da camada superficial (0-5 cm) sob PC e PD, respectivamente.

O preparo de solo promoveu diferença no teor de K disponível no solo da camada 0-5 cm em todos os sistemas de culturas, com exceção do sistema B/A–S/C–M+B (Tabela 10). Para o sistema de culturas P/A, foi observado diferença entre os preparos de solo até 15 cm de profundidade, e no sistema de culturas Mt/A–S/M+B–B/A até 10 cm de profundidade. O sistema de culturas Mt/A, além da camada superficial (0-5 cm), e o B/A–S/C–M+B

apresentaram diferença estatística no teor de K disponível no solo das camadas entre 15 a 40 e 15 a 30 cm, respectivamente. Ao contrário do que foi observado para o conteúdo de P disponível, a maior disponibilidade de K foi observada no solo sob PC. Houve decréscimo gradativo nos teores de K do solo com o aumento da profundidade, independentemente do sistema de culturas e preparo de solo. Os maiores valores de K disponível (superiores 147 mg K kg⁻¹) foram observados no solo da camada superficial (0-5 cm) e os menores valores (inferiores a 50 mg K kg⁻¹) no solo das camadas mais profundas analisadas.

Tabela 10 – Potássio disponível do solo em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalária–Milho+Braquiária) e preparos de solo (preparo convencional e plantio direto), após onze anos de cultivo em Itiquira - MT.

Sistemas de culturas	P/A	Mt/A	S/M–Mt/A	Mt/A–S/M+B–B/A	B/A–S/C–M+B
Camada de solo (cm)	----- Potássio disponível (mg kg ⁻¹) -----				
	Preparo convencional				
0-5	200 bA ^{*(1)}	304 aA*	206 bA*	185 cA*	147 dA
5-10	90 aB*	101 aB	43 cB	59 bB*	68 bB
10-15	62 aC*	64 aC	33 cB	33 cC	46 bC
15-20	48 bD	61 aC*	25 cC	31 cC	42 bC*
20-30	31 bE	49 aD*	24 bC	25 bC	51 aC*
30-40	30 aE	32 aE*	23 aC	24 aC	41 aC
	Plantio direto				
0-5	152 cA	270 aA	190 bA	147 cA	150 cA
5-10	71 bB	93 aB	44 dB	35 dB	61 cB
10-15	48 bC	63 aC	35 cB	26 cB	36 cC
15-20	37 aC	44 aD	29 bB	22 bB	29 bC
20-30	32 aC	27 aE	29 aB	22 aB	33 aC
30-40	35 aC	18 bE	30 aB	26 bB	37 aC

⁽¹⁾ Letras minúsculas na linha comparam os sistemas de culturas dentro de cada camada e preparo de solo; letras maiúsculas na coluna comparam as camadas de solo dentro de cada sistema de culturas e preparo de solo; * indica diferença entre os preparos de solo dentro de cada sistema de culturas e camada de solo pelo teste Scott-Knott (p < 0,05).

Os maiores teores de Ca (Tabela 11) e Mg (Tabela 12) trocáveis foram observados no solo cultivado com os sistemas de culturas S/M–Mt/A e B/A–S/C–M+B, sob PC, sem diferença

estatística entre si no solo das camadas até 15 e 20 cm de profundidade, respectivamente. Quando cultivados sob PD, os maiores teores de Ca trocável foram observados no solo cultivado com os sistemas de culturas B/A–S/C–M+B e Mt/A até 15 e 20 cm de profundidade, respectivamente. Os maiores teores de Mg trocável do solo ocorreram nos sistemas de culturas Mt/A e B/A–S/C–M+B, sem diferença estatística até os 20 cm de profundidade.

Tabela 11 – Cálcio trocável em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto /Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalaria–Milho+Braquiária) e preparos de solo (preparo convencional e plantio direto), após onze anos de cultivo em Itiquira - MT.

Sistemas de culturas	P/A	Mt/A	S/M–Mt/A	Mt/A–S/M+B–B/A	B/A–S/C–M+B
Camada de solo (cm)	----- Cálcio trocável (cmol _c kg ⁻¹) -----				
	Preparo convencional				
0-5	3,4 bA ^{*(1)}	3,6 bA*	4,1 aA*	3,6 bA*	4,1 aA*
5-10	3,3 bA*	3,9 aA*	4,0 aA*	3,3 bA*	3,9 aA
10-15	3,3 bA*	3,1 bB*	3,6 aB*	3,5 aA*	3,6 aB*
15-20	3,0 bA*	3,0 bB*	2,2 cC*	3,3 aA*	2,5 cC*
20-30	1,2 bB*	1,6 aC*	1,1 bD	1,6 aB*	1,2 bD*
30-40	0,7 aC	0,6 aD	0,7 aE	0,8 aC	0,7 aE
	Plantio direto				
0-5	5,2 bA	5,9 aA	5,4 bA	5,1 bA	5,7 aA
5-10	2,8 dB	3,2 cB	3,6 bB	3,2 cB	3,9 aB
10-15	1,8 bC	2,0 aC	1,9 bC	1,6 bC	2,2 aC
15-20	1,3 bD	1,8 aC	1,4 bD	1,2 bD	1,3 bD
20-30	0,7 aE	1,0 aD	0,9 aE	0,9 aE	0,8 aE
30-40	0,8 aE	0,6 aE	0,7 aE	0,6 aE	0,5 aE

⁽¹⁾ Letras minúsculas na linha comparam os sistemas de culturas dentro de cada camada e preparo de solo; letras maiúsculas na coluna comparam as camadas de solo dentro de cada sistema de culturas e preparo de solo; * indica diferença entre os preparos de solo dentro de cada sistema de culturas e camada de solo pelo teste Scott-Knott ($p < 0,05$).

De modo geral, foram observadas diferenças estatísticas entre os preparos de solo para os teores de Ca trocável do solo até 30 cm de profundidade, independente do sistema de culturas utilizado (Tabela 11). Os maiores teores de Ca trocável ocorreram no solo da camada superficial (0-5 cm) sob PD, enquanto que nas demais camadas os maiores teores foram observados no solo sob PC. Os teores de Mg trocável do solo apresentaram comportamento semelhante entre

os sistemas de culturas P/A, Mt/A e Mt/A–S/M+B–B/A (Tabela 11). Nos sistemas de culturas S/M–Mt/A e B/A–S/C–M+B, houve diferença estatística significativa para o teor de Mg no solo das camadas entre 5 e 20 cm de profundidade.

Tabela 12 – Magnésio trocável em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalária–Milho+Braquiária) e preparos de solo (preparo convencional e plantio direto), após onze anos de cultivo em Itiquira - MT.

Sistemas de culturas	P/A	Mt/A	S/M–Mt/A	Mt/A–S/M+B–B/A	B/A–S/C–M+B
Camada de solo (cm)	----- Magnésio trocável (cmol _c kg ⁻¹) -----				
	Preparo convencional				
0-5	1,5 cA*(¹)	1,8 bA*	2,0 aA	1,6 cA*	2,1 aA
5-10	1,4 cB*	1,7 bA*	2,0 aA*	1,3 cB	1,9 aB*
10-15	1,3 cB*	1,5 bB*	1,8 aB*	1,4 cB*	1,7 aC*
15-20	1,3 aB*	1,5 aB*	1,3 aC*	1,3 aB*	1,3 aD*
20-30	0,7 cC*	1,2 aC*	0,7 cD	0,9 bC*	0,7 cE
30-40	0,5 aD	0,6 aD	0,6 aD	0,6 aD	0,5 aE
	Plantio direto				
0-5	1,9 bA	2,2 aA	1,9 bA	2,1 aA	2,2 aA
5-10	1,0 cB	1,3 bD	1,4 bB	1,3 bB	1,5 aB
10-15	0,7 bC	1,1 aC	0,8 bC	0,8 bC	1,0 aC
15-20	0,6 bC	0,9 aC	0,7 bD	0,7 bC	0,8 aD
20-30	0,5 aC	0,7 aD	0,6 aD	0,6 aC	0,6 aE
30-40	0,5 aC	0,5 aE	0,6 aD	0,6 aC	0,5 aE

(¹) Letras minúsculas na linha comparam os sistemas de culturas dentro de cada camada e preparo de solo; letras maiúsculas na coluna comparam as camadas de solo dentro de cada sistema de culturas e preparo de solo; * indica diferença entre os preparos de solo dentro de cada sistema de culturas e camada de solo pelo teste Scott-Knott (p < 0,05).

Os maiores teores de Ca trocável foram observados no solo até 20 cm de profundidade, sem diferença significativa entre as camadas de solo nos sistemas de culturas P/A e Mt/A–S/M+B–B/A sob PC (valores em torno de 3,4 cmol_c Ca kg⁻¹) (Tabela 11). Nos demais sistemas de culturas, os maiores teores de Ca trocável foram observados no solo até 10 cm de profundidade, com valores médios de 3,8 cmol_c kg⁻¹ para o sistema de culturas Mt/A e 4,0 cmol_c kg⁻¹ para os sistemas S/M–Mt/A e B/A–S/C–M+B. Quando cultivados sob PD, os maiores

teores de Ca trocável foram observados, de modo geral, no solo da camada superficial (0-5 cm), independente do sistema de culturas, com valores superiores a $5,1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. De modo geral, os maiores teores de Mg trocável foram observados no solo da camada superficial, independente do sistema de culturas e preparo de solo utilizado, com valores maiores que $1,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Tabela 12).

6.1.3 Matéria orgânica e capacidade de troca de cátions potencial do solo

A MOS e a $\text{CTC}_{\text{pH } 7,0}$ do solo apresentaram efeito de interação entre sistemas de culturas, preparos de solo e camadas de solo (Apêndice A). Sob PC, os maiores teores de MOS foram observados no solo cultivado sob os sistemas de culturas S/M–Mt/A e B/A–S/C–M+B até 10 cm de profundidade (cerca de 4,1%), enquanto que os menores teores foram observados no sistema P/A (cerca de 3,3%) (Tabela 13). Sob PD, não foi observada diferença estatística para o teor de MOS entre os sistemas de culturas no solo das camadas entre 10 e 30 cm de profundidade, com valores entre 2,8 a 3,5%. No solo da camada 0-5 cm de profundidade, os maiores teores de MOS foram observados nos sistemas Mt/A e B/A–S/C–M+B (5,3%), e no solo da camada 5-10 cm os maiores teores foram observados nos sistemas S/M–Mt/A, Mt/A–S/M+B–B/A e B/A–S/C–M+B (3,8%).

Houve diferença estatística entre os preparos de solo apenas no solo da camada superficial (0-5cm), onde os maiores valores (acima de 4%) foram observados no solo sob PD (Tabela 13). Sob PC, os maiores teores de MOS foram observados no solo das camadas até 20 cm de profundidade nos sistemas de culturas P/A, Mt/A e Mt/A–S/M+B–B/A, com teores de MOS de 3,3, 3,6 e 3,7%, respectivamente. Nos sistemas S/M–Mt/A e B/A–S/C–M+B, os maiores teores de MOS foram observados no solo das camadas até 10 cm de profundidade, com teores de 4,1%. Os menores valores de MOS foram observados no solo das camadas mais inferiores. Sob PD, houve redução nos teores de MOS com o aumento da profundidade do solo, independentemente do sistema de culturas, sendo os maiores valores observados o solo da camada superficial (superiores a 4%) e os menores valores no solo da camada mais profunda (inferiores a 2,4%).

Não houve diferença estatística para os valores de $\text{CTC}_{\text{pH } 7,0}$ do solo das camadas 0-5 e 30-40 cm entre os sistemas de culturas sob PC, com valores médios de $8,4$ e $5,8 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, respectivamente (Tabela 14). O sistema de culturas P/A apresentou menor valor de $\text{CTC}_{\text{pH } 7,0}$ ($7,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) no solo da camada 5-10 cm, enquanto que os demais sistemas apresentam valor médio de $8,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. No solo das demais camadas, os sistemas de culturas S/M–Mt/A,

Mt/A–S/M+B–B/A e B/A–S/C–M+B sob PC apresentaram teores mais elevados de CTC_{pH 7,0}. Quando cultivados sob PD, não houve diferença entre os sistemas de culturas no solo das camadas 5-10 e 15-20 cm, com valores médios de 9 e 8,5 cmol_c kg⁻¹, respectivamente. De modo geral, o sistema de culturas Mt/A sob PD apresentou maior valor de CTC_{pH 7,0} do solo.

Tabela 13 – Matéria orgânica do solo em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalária–Milho+Braquiária) e preparos de solo (preparo convencional e plantio direto), após onze anos de cultivo em Itiquira - MT.

Sistemas de culturas	P/A	Mt/A	S/M–Mt/A	Mt/A–S/M+B–B/A	B/A–S/C–M+B
Camada de solo (cm)	----- Matéria orgânica do solo (%) -----				
	Preparo convencional				
0-5	3,4 cA ^{*(1)}	3,8 bA*	4,2 aA*	3,8 bA*	4,2 aA*
5-10	3,3 dA	3,6 cA	4,0 aA	3,7 bA	4,0 aA
10-15	3,2 bA	3,5 aA	3,7 aB	3,7 aA	3,7 aB
15-20	3,2 aA	3,4 aA	3,4 aB	3,5 aA*	3,4 aB
20-30	2,5 bB	2,8 aB	3,1 aC	2,9 aB	2,9 aC
30-40	1,9 bC	2,0 bC	2,5 aD*	2,1 bC*	2,0 bD
	Plantio direto				
0-5	4,0 cA	5,3 aA	5,0 bA	4,8 bA	5,3 aA
5-10	3,6 bB	3,6 bB	3,8 aB	3,8 aB	3,9 aB
10-15	3,5 aB	3,5 aB	3,5 aB	3,4 aC	3,6 aC
15-20	3,2 aC	3,2 aC	3,3 aC	3,2 aC	3,2 aD
20-30	2,7 aD	2,9 aD	2,9 aD	3,0 aD	2,6 aE
30-40	1,9 bE	2,2 aE	2,0 bE	2,4 aE	2,2 aF

⁽¹⁾ Letras minúsculas na linha comparam os sistemas de culturas dentro de cada camada e preparo de solo; letras maiúsculas na coluna comparam as camadas de solo dentro de cada sistema de culturas e preparo de solo; * indica diferença entre os preparos de solo dentro de cada sistema de culturas e camada de solo pelo teste Scott-Knott (p < 0,05).

Comparando os preparos de solo, de modo geral, o PD apresentou os maiores valores de CTC_{pH 7,0} do solo até a profundidade de 20 cm nos sistemas de culturas Mt/A e S/M–Mt/A, até 15 cm nos sistemas P/A e B/A–S/C–M+B e até 10 cm no sistema Mt/A–S/M+B–B/A, quando comparado ao PC (Tabela 14). Os maiores valores de CTC_{pH 7,0} foram observados no solo das camadas mais superficiais, reduzindo com o aumento da profundidade.

Tabela 14 – Capacidade de troca de cátions potencial do solo ($CTC_{pH\ 7,0}$) em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão ; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalária–Milho+Braquiária) e preparos de solo (preparo convencional e plantio direto), após onze anos de cultivo, em experimento localizado no município de Itiquira - MT.

Sistemas de culturas	P/A	Mt/A	S/M–Mt/A	Mt/A–S/M+B–B/A	B/A–S/C–M+B
Camada de solo (cm)	----- $CTC_{pH\ 7,0}$ (cmol _c kg ⁻¹) -----				
	Preparo convencional				
0-5	7,9 aA ^{*(1)}	8,5 aA*	8,6 aA*	8,4 aA*	8,4 aA*
5-10	7,5 bA*	8,4 aA	8,6 aA	8,5 aA*	8,4 aA
10-15	7,3 bA*	7,4 bB*	8,1 aB*	8,3 aA	8,4 aA*
15-20	7,8 bA	7,8 bB*	7,7 bB*	8,5 aA	8,3 aA
20-30	6,8 bB	7,1 bB	7,7 aB	7,6 aB	7,5 aB
30-40	5,8 aC	5,3 aC	6,0 aC	6,2 aC	5,7 aC
	Plantio direto				
0-5	9,2 bA	10,2 aA	9,6 bA	9,4 bA	9,6 bA
5-10	9,1 aA	8,5 aC	9,1 aA	9,5 aA	9,0 aA
10-15	8,8 bA	9,3 aB	8,8 bB	8,4 bB	9,3 aA
15-20	8,2 aB	8,7 aC	8,5 aB	8,3 aB	8,1 aB
20-30	6,8 bC	7,4 aD	7,6 aC	7,6 aC	6,9 bC
30-40	5,6 bD	6,0 bE	6,2 aD	6,7 aD	5,6 bD

⁽¹⁾ Letras minúsculas na linha comparam os sistemas de culturas dentro de cada camada e preparo de solo; letras maiúsculas na coluna comparam as camadas de solo dentro de cada sistema de culturas e preparo de solo; * indica diferença entre os preparos de solo dentro de cada sistema de culturas e camada de solo pelo teste Scott-Knott ($p < 0,05$).

6.2 INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO

6.2.1 Carbono orgânico do solo

O teor de COT do solo apresentou efeito de interação entre sistemas de culturas, preparos de solo e camadas de solo (Apêndice D). Sob PC, os menores teores de COT foram observados no solo cultivado com o sistema de culturas P/A e os maiores valores foram observados no solo sob os sistemas S/M–Mt/A e B/A–S/C–M+B nas camadas até 15 cm de profundidade. Sob PD, o sistema de culturas B/A–S/C–M+B apresentou maior conteúdo de

COT no solo até 10 cm de profundidade e o sistema de culturas P/A apresentou o menor valor de COT no solo da camada superficial (0-5 cm). No solo das camadas abaixo de 10 cm de profundidade, não houve diferença estatística significativa entre os sistemas de culturas sob PD.

Tabela 15 – Carbono orgânico total do solo em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalaria–Milho+Braquiária) e preparos de solo (preparo convencional e plantio direto), após onze anos de cultivo em Itiquira - MT.

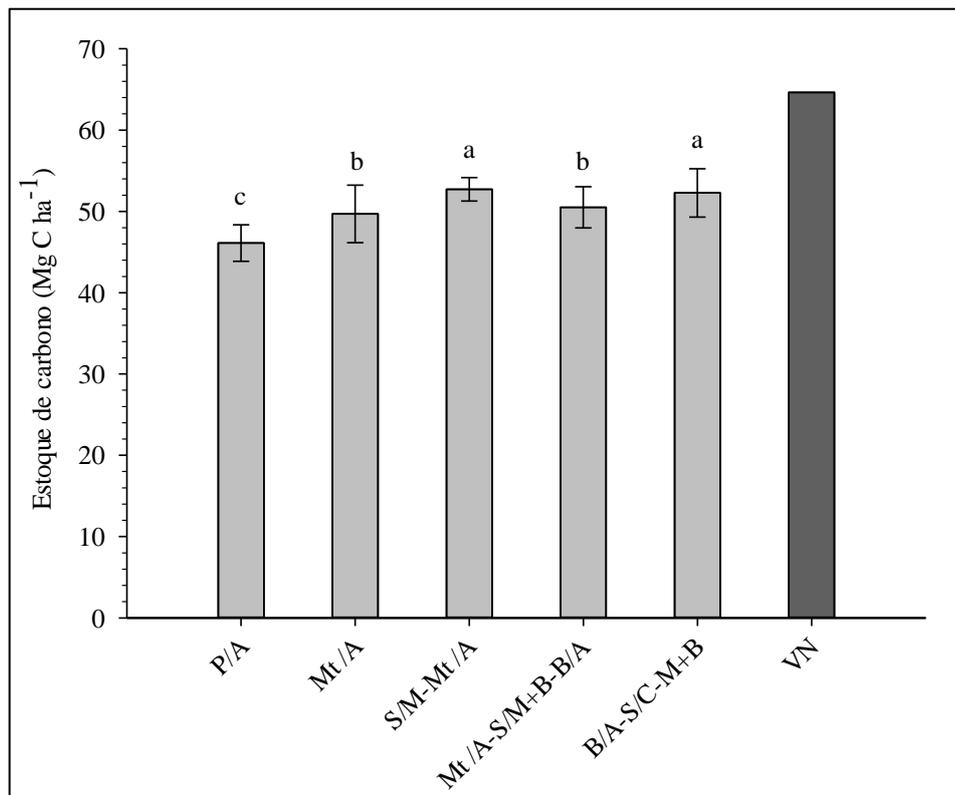
Sistemas de culturas	P/A	Mt/A	S/M–Mt/A	Mt/A–S/M+B–B/A	B/A–S/C–M+B
Camada de solo (cm)	----- Carbono orgânico total (g C kg ⁻¹) -----				
	Preparo convencional				
0-5	19,4 cA*(¹)	22,1 bA*	24,6 aA*	22,3 bA*	24,4 aA*
5-10	19,0 cA*	20,8 bA	23,2 aA	21,7 aA	22,4 aB
10-15	18,8 bA	20,4 aA	21,5 aB	21,2 aA	21,3 aC
15-20	18,3 aA	19,7 aA	20,0 aB	20,8 aA*	19,7 aC
	Plantio direto				
0-5	21,8 cA	30,5 aA	28,3 bA	28,0 bA	30,7 aA
5-10	20,7 bA	20,4 bB	22,2 aB	22,3 aB	22,7 aB
10-15	20,2 aA	20,4 aB	20,5 aC	19,9 aC	20,8 aC
15-20	18,9 aB	18,1 aC	19,1 aC	18,5 aC	19,1 aD

(¹) Letras minúsculas na linha comparam os sistemas de culturas dentro de cada camada e preparo de solo; letras maiúsculas na coluna comparam as camadas de solo dentro de cada sistema de culturas e preparo de solo; * indica diferença entre os preparos de solo dentro de cada sistema de culturas e camada de solo pelo teste Scott-Knott ($p < 0,05$).

O teor de COT do solo diferiu entre os preparos de solo nas camadas até os 10 cm de profundidade no sistema de culturas P/A, enquanto que nos demais houve efeito apenas no solo da camada superficial (0-5 cm) (Tabela 15). Os maiores valores de COT foram observados no solo sob PD. Não houve diferença significativa ($p < 0,05$) no conteúdo de COT entre as camadas de solo nos sistemas de culturas P/A, Mt/A e Mt/A–S/M+B–B/A sob PC. Nos demais sistemas de culturas, observa-se uma redução nos teores de COT do solo com o aumento da profundidade. Sob PD, esse mesmo comportamento é observado para todos os sistemas de culturas, com exceção do sistema P/A, onde não foi observado diferença no conteúdo de COT no solo das camadas até 15 cm de profundidade.

Foi observado efeito significativo dos sistemas de culturas sobre o EC total do solo. (Apêndice D). Os maiores valores de EC do solo foram observados no solo sob os sistemas de culturas S/M–Mt/A e B/A–S/C–M+B (média de 52,5 Mg C ha⁻¹), sem diferença estatística entre si (Figura 3). Os sistemas de culturas Mt/A e Mt/A–S/M+B–B/A apresentaram menor EC que esses sistemas, com valor médio de 50,12 Mg C ha⁻¹, mas significativamente maior que o sistema de culturas P/A (46,1 Mg C ha⁻¹). Cabe destacar que todos os sistemas de culturas apresentaram menor EC no solo da camada 0-20 cm quando comparado ao solo sob VN (64,6 Mg C ha⁻¹), mesmo sem comparação estatística.

Figura 3 – Estoque de carbono orgânico total na camada de 0-20 cm de profundidade de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalaria–Milho+Braquiária) após 11 anos de cultivo e sob área de vegetação natural (VN), localizados no município de Itiquira - MT.



Letras minúsculas comparam os sistemas de culturas pelo teste Scott-Knott ($p < 0,05$).

Houve interação entre os sistemas de culturas, preparos de solo e camadas de solo para as frações COAG e COAF (Apêndice D). A fração COAG diferiu entre os sistemas de culturas

sob PC até 10 cm de profundidade, onde os maiores valores foram observados no solo sob os sistemas de culturas S/M–Mt/A e B/A–S/C–M+B, com valores médios de 2,19 g C kg⁻¹ para o solo da camada 0-5 cm e 1,38 g C kg⁻¹ para o solo da camada 5-10 cm (Tabela 16). Sob PD, houve diferença entre os sistemas de culturas apenas no solo da camada superficial (0-5 cm), onde o menor valor foi observado no sistema de cultura P/A (1,68 g C kg⁻¹), seguido do sistema S/M–Mt/A (3,57 g C kg⁻¹), e os maiores valores observados nos demais sistemas de culturas (média de 4,10 g C kg⁻¹).

Tabela 16 – Carbono orgânico associado a areia grossa (COAG) do solo em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalária–Milho+Braquiária) e preparos de solo (preparo convencional e plantio direto), após onze anos de cultivo em Itiquira - MT.

Sistemas de culturas	P/A	Mt/A	S/M–Mt/A	Mt/A–S/M+B–B/A	B/A–S/C–M+B
Camada de solo (cm)	----- COAG (g C kg ⁻¹) -----				
	Preparo convencional				
0-5	0,74 cA*(¹)	1,55 bA*	2,02 aA*	1,47 bA*	2,36 aA*
5-10	0,66 bA	0,97 bB	1,55 aB	0,84 bB	1,21 aB
10-15	0,63 aA	0,94 aB	0,78 aC	0,91 aB	0,73 aC
15-20	0,57 aA	0,65 aB	0,49 aC	0,82 aB	0,37 aC
	Plantio direto				
0-5	1,68 cA	4,31 aA	3,57 bA	4,04 aA	3,95 aA
5-10	0,86 aB	0,61 aB	1,13 aB	1,07 aB	1,01 aB
10-15	0,63 aB	0,63 aB	0,73 aC	0,54 aC	0,62 aC
15-20	0,54 aB	0,45 aB	0,60 aC	0,43 aC	0,51 aC

(¹) Letras minúsculas na linha comparam os sistemas de culturas dentro de cada camada e preparo de solo; letras maiúsculas na coluna comparam as camadas de solo dentro de cada sistema de culturas e preparo de solo; * indica diferença entre os preparos de solo dentro de cada sistema de culturas e camada de solo pelo teste Scott-Knott (p < 0,05).

Houve diferença estatística entre o preparo de solo para o teor de C na fração COAG apenas no solo da camada superficial (0-5 cm), independente do sistema de culturas utilizado, onde os maiores valores foram observados sob PD, variando de 1,68 g C kg⁻¹ no sistema de culturas P/A a 4,31 g C kg⁻¹ no sistema de culturas Mt/A (Tabela 16). Os maiores valores de

COAG são sempre observados no solo da camada superficial, independente do sistema de culturas e preparo de solo utilizado, com tendência de reduzir com o aumento da profundidade.

Para o teor de C da fração COAF, o sistema de culturas S/M-Mt/A se destacou dos demais, apresentando os maiores teores de C no solo das camadas até 15 cm de profundidade sob PC (Tabela 17). No solo das camadas entre 10 e 20 cm de profundidade, os sistemas de culturas Mt/A e Mt/A-S/M+B-B/A apresentaram os maiores teores de C na fração COAF. Sob PD, não houve diferença entre os sistemas de culturas no solo da camada 5-10 cm. No solo da camada 0-5 cm, o sistema de culturas Mt/A apresentou maior teor de C na fração COAF, no solo da camada 10-15 cm os sistemas de culturas Mt/A e S/M-Mt/A apresentaram maiores valores, e no solo da camada 15-20 cm, maior valor foi observado no sistema de culturas S/M-Mt/A.

Tabela 17 – Carbono orgânico associado a areia fina (COAF) do solo em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M-Mt/A = Soja/Milho-Milheto/Algodão; Mt/A-S/M+B-B/A = Milheto/Algodão-Soja/Milho+Braquiária-Braquiária/Algodão; B/A-S/C-M+B = Braquiária/Algodão-Soja/Crotalária-Milho+Braquiária) e preparos de solo (preparo convencional e plantio direto), após onze anos de cultivo em Itiquira - MT.

Sistemas de culturas	P/A	Mt/A	S/M-Mt/A	Mt/A-S/M+B-B/A	B/A-S/C-M+B
Camada de solo (cm)	----- COAF (g C kg ⁻¹) -----				
	Preparo convencional				
0-5	3,97 cA ^{*(1)}	4,63 bA*	5,36 aA*	4,60 bA*	5,30 aA*
5-10	3,88 bA*	4,16 bB	5,19 aA	4,06 bA*	4,29 bB*
10-15	3,53 bA	3,96 aB	4,47 aB	4,08 aA*	4,29 aB*
15-20	3,06 bB	3,77 aB*	3,47 bC	4,00 aA*	3,45 bC*
	Plantio direto				
0-5	5,37 cA	8,50 aA	7,03 bA	7,01 bA	7,46 bA
5-10	4,56 aB	4,43 aB	4,93 aB	4,90 aB	4,90 aB
10-15	3,71 bC	4,21 aB	4,14 aC	3,52 bC	3,57 bC
15-20	3,05 bD	2,97 bC	3,71 aC	2,93 bD	2,70 bD

⁽¹⁾ Letras minúsculas na linha comparam os sistemas de culturas dentro de cada camada e preparo de solo; letras maiúsculas na coluna comparam as camadas de solo dentro de cada sistema de culturas e preparo de solo; * indica diferença entre os preparos de solo dentro de cada sistema de culturas e camada de solo pelo teste Scott-Knott ($p < 0,05$).

Houve diferença estatística entre os preparos de solo para o teor de C na fração COAF apenas no solo da camada superficial (0-5 cm) nos sistemas de culturas Mt/A e S/M–Mt/A, e no solo das camadas até 10 cm de profundidade no sistema de culturas P/A, onde os maiores valores de C foram observados no solo sob PD (Tabela 17). Nos sistemas de culturas Mt/A–S/M+B–B/A e B/A–S/C–M+B, houve diferença estatística entre os preparos de solo em todas as camadas de solo analisadas. Nesses sistemas, os maiores valores foram observados no solo sob PD nas camadas até 10 cm de profundidade, e abaixo de 10 cm, os maiores valores foram observados no solo sob PC. Os maiores valores de COAF foram observados no solo da camada superficial, independente do sistema de culturas e preparo de solo utilizado, com tendência de reduzir com o aumento da profundidade, com exceção do sistema de culturas Mt/A–S/M+B–B/A sob PC, que não apresentou diferença significativa ($p < 0,05$) entre as camadas de solo.

A fração COAM apresentou efeito de interação entre sistemas de culturas e camadas de solo e entre preparos de solo e camadas de solo (Apêndice D). Os sistemas de culturas apresentaram diferença estatística para o conteúdo de C na fração COAM apenas no solo das camadas até 10 cm de profundidade (Tabela 18). Nessas camadas, os menores teores de C da fração COAM ocorreram no solo cultivado sob o sistema de culturas P/A. Não foi observada diferença entre as camadas de solo nos sistemas de culturas P/A e Mt/A–S/M+B–B/A, enquanto que nos demais, houve diferença apenas no solo da camada superficial (0-5 cm), que apresentou os maiores conteúdos de C da fração COAM.

Tabela 18 – Carbono orgânico associado aos minerais (COAM) do solo em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalária–Milho+Braquiária) após onze anos de cultivo em Itiquira - MT.

Sistemas de culturas	P/A	Mt/A	S/M–Mt/A	Mt/A–S/M+B–B/A	B/A–S/C–M+B
Camada de solo (cm)	----- COAM (g C kg ⁻¹) -----				
	Preparo convencional				
0-5	14,7 cA ⁽¹⁾	16,8 bA	17,5 aA	16,6 bA	18,0 aA
5-10	14,9 bA	15,5 bB	16,3 aB	16,5 aA	16,8 aB
10-15	15,3 aA	15,6 aB	16,0 aB	16,0 aA	16,4 aB
15-20	14,8 aA	15,0 aB	15,4 aB	15,6 aA	15,9 aB

⁽¹⁾ Letras minúsculas na linha comparam os sistemas de culturas dentro de cada camada de solo; letras maiúsculas na coluna comparam as camadas de solo dentro de cada sistema de culturas pelo teste Scott-Knott ($p < 0,05$).

Houve diferença entre os preparos de solo para o teor de C na fração COAM (Tabela 19). No solo da camada superficial (0-5 cm), o maior conteúdo de C da fração COAM foi observado no solo sob PD (16,99 g C kg⁻¹), enquanto que no solo da camada 15-20 cm o maior conteúdo de C foi observado sob PC (15,56 g C kg⁻¹). Comparando as camadas de solo entre si, os maiores conteúdos de C na fração COAM sob PC ocorreram no solo das camadas até 10 cm de profundidade. Sob PD, o maior conteúdo de COAM ocorreu no solo da camada 0-5 cm, decrescendo com o aumento da profundidade.

Tabela 19 – Carbono orgânico associado aos minerais (COAM) do solo em diferentes camadas de um Latossolo cultivado sob preparo convencional do solo e plantio direto após onze anos de cultivo, em experimento localizado no município de Itiquira/MT.

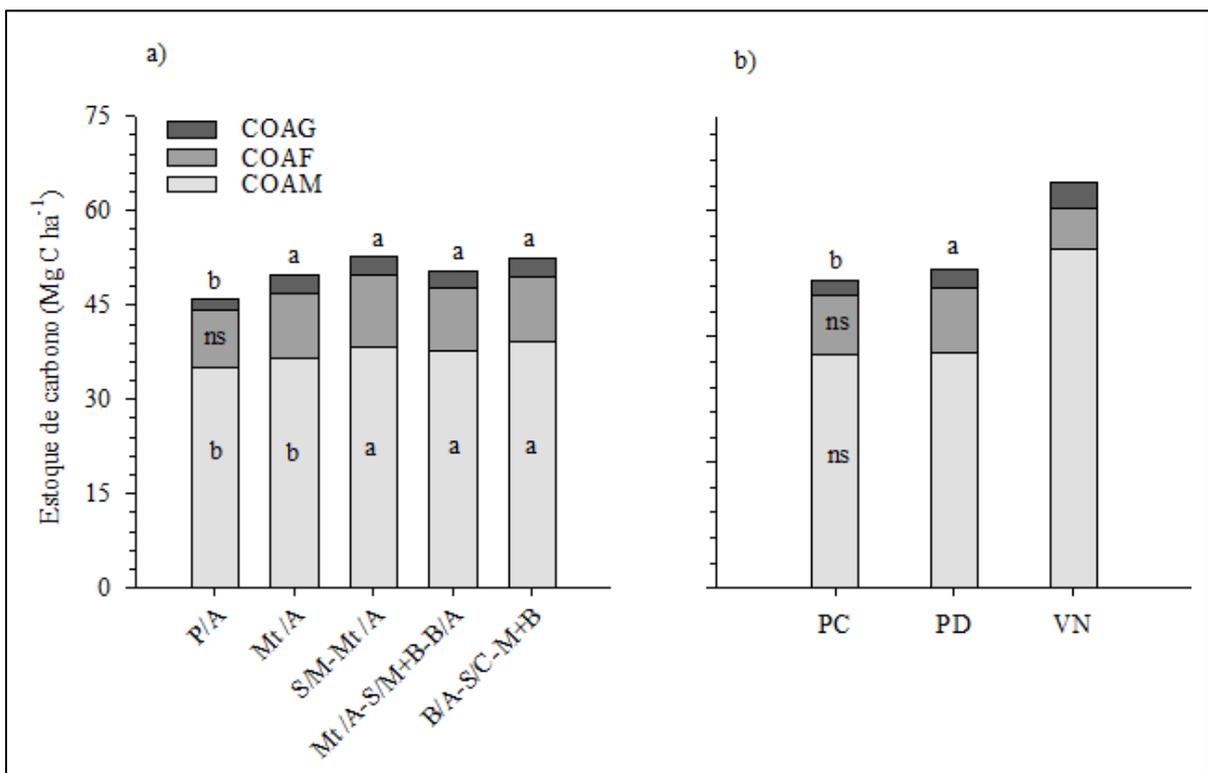
Camada de solo (cm)	Preparo convencional	Plantio direto
	----- COAM (g kg ⁻¹) -----	
0-5	16,4 bA ⁽¹⁾	17,0 aA
5-10	16,0 aA	16,0 aB
10-15	15,8 aB	15,9 aB
15-20	15,6 aB	15,1 bC

⁽¹⁾ Letras minúsculas na linha comparam os preparos de solo dentro de cada camada de solo; e letras maiúsculas na coluna comparam as camadas de solo dentro de cada preparo de solo pelo teste Scott-Knott (p < 0,05).

O EC das frações COAG e COAM apresentaram efeito de sistemas de culturas e apenas o EC da fração COAG apresentou efeito de preparo de solo (Apêndice D). O EC da fração COAF não apresentou efeito de sistemas de culturas e preparos de solo.

O sistema de culturas P/A apresentou o menor EC da fração COAG (1,84 Mg C ha⁻¹) em relação aos demais sistemas de culturas, os quais não diferiram entre si e apresentaram valor médio de 2,91 Mg C ha⁻¹ no solo da camada 0-20 cm (Figura 4a). O EC da fração COAM no solo da camada 0-20 cm foi maior nos sistemas de culturas S/M–Mt/A, Mt/A–S/M+B–B/A e B/A–S/C–M+B, com valor médio de 38,4 Mg C ha⁻¹, enquanto que os sistemas P/A e Mt/A apresentaram EC de 35,8 Mg C ha⁻¹. Apenas o EC da fração COAG apresentou efeito de preparo de solo, sendo o maior valor (3,07 Mg C ha⁻¹) observado no PD, enquanto que no PC o EC da fração COAG foi de 2,33 Mg C ha⁻¹ (Figura 4b).

Figura 4 – Estoque de carbono orgânico associado à areia grossa (COAG), carbono orgânico associado à areia fina (COAF) e carbono orgânico associado aos minerais (COAM) na camada de 0-20 cm de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/ Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+ Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalária–Milho+Braquiária) (a) sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) (b) após 11 anos de cultivo, e sob área de vegetação natural (VN), localizados no município de Itiquira - MT.



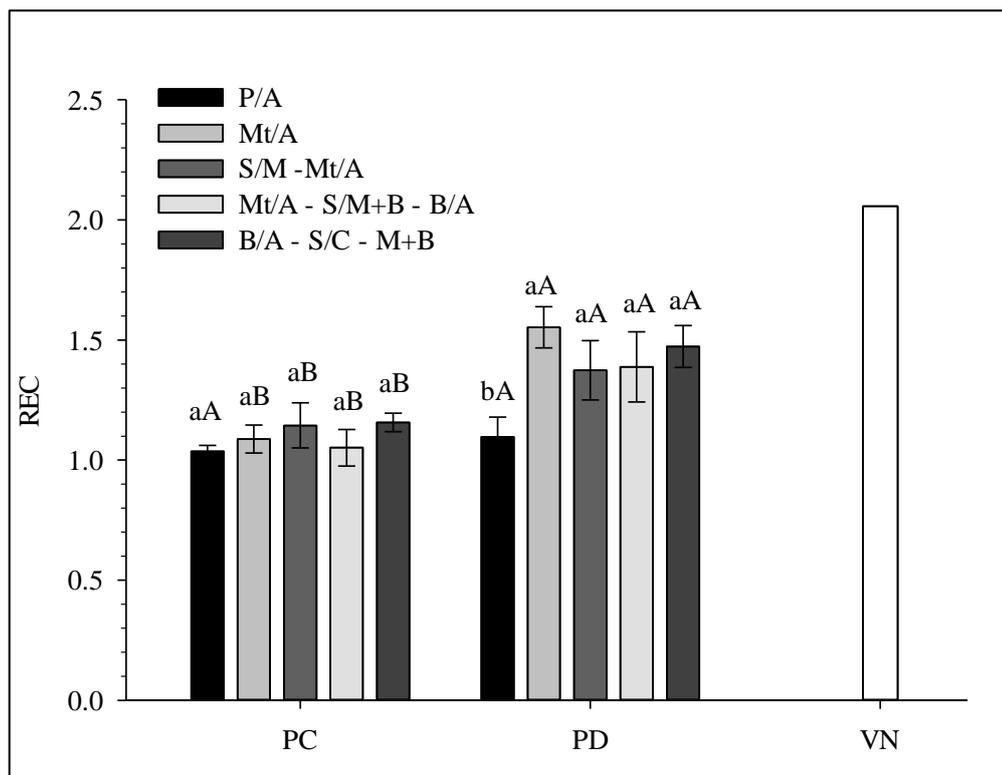
Letras minúsculas na figura (a) comparam os sistemas de culturas e na figura (b) comparam os preparos de solo para cada fração de carbono pelo teste Scott-Knott ($p < 0,05$). A VN representa a condição original do solo e não foi utilizada para comparação estatística.

6.2.2 Índices de qualidade do solo

Os índices de qualidade de solo avaliados neste estudo foram a REC e o IMC. Na análise de variância (Apêndice D) ocorreu interação entre os sistemas de culturas e preparo de solo para os valores de REC. Não houve diferença para a REC entre os sistemas de culturas sob PC, sendo os valores médios de RE de 1,09 (Figura 5). Sob PD, o sistema de cultura P/A apresentou valor de REC de 1,1, estatisticamente menor que os demais sistemas de culturas, que não diferiram entre si e apresentaram valor médio de 1,44. Não foi observado diferença entre os preparos de solo no sistema de culturas P/A. Nos demais sistemas de culturas, houve diferença

estatística entre os preparos de solo, sendo os maiores valores de REC observados sempre nos sistemas de culturas sob PD.

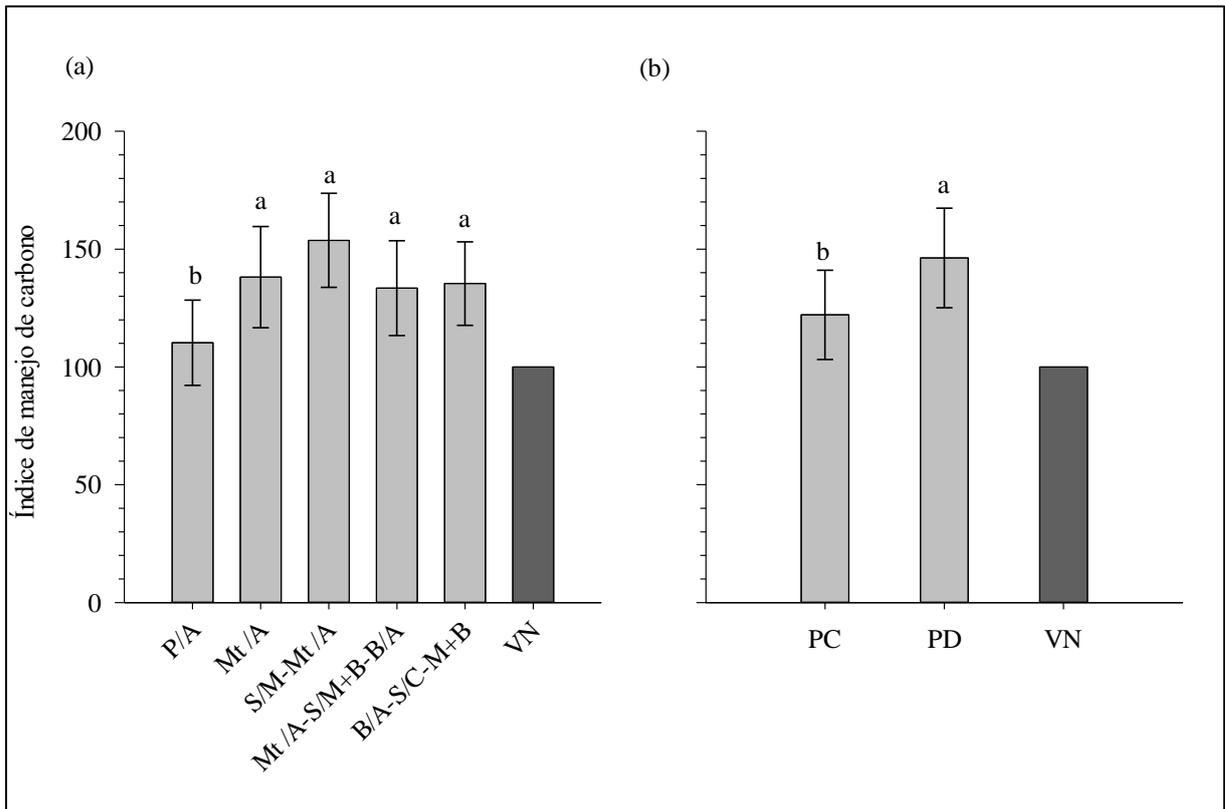
Figura 5 – Razão de estratificação do carbono (REC) do solo na camada de 0-20 cm de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M-Mt/A = Soja/Milho-Milheto/Algodão; Mt/A-S/M+B-B/A = Milheto/Algodão-Soja/Milho+Braquiária-Braquiária/Algodão; B/A-S/C-M+B = Braquiária/Algodão-Soja/Crotalária-Milho+Braquiária), sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) após 11 anos de cultivo e sob área de vegetação natural (VN) em Itiquira - MT.



Letras minúsculas comparam os sistemas de culturas dentro de cada preparo de solo; letras maiúsculas comparam os preparos de solo dentro de cada sistema de culturas pelo teste Scott-Knott ($p < 0,05$). A VN representa a condição original do solo e não foi utilizada para comparação estatística.

Não houve efeito de interação entre os sistemas de culturas e preparo de solo para os valores de IMC do solo, mas houve efeito dos sistemas de culturas e preparos de solo. O sistema de culturas P/A apresentou o menor valor de IMC (125) em comparação com os demais sistemas, que não diferiram entre si e apresentaram valor médio de IMC de 158 (Figura 6a). O PD apresentou maior IMC (164) que o PC (139) (Figura 6b). Todos os sistemas de culturas e preparos de solo apresentaram, sem comparação estatística, valor de IMC maior que a vegetação nativa do Cerrado (100).

Figura 6 – Índice de manejo do carbono do solo para a camada de 0-20 cm de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M-Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalária–Milho+Braquiária) (a) e sob preparo convencional (PC) e plantio direto (PD) (b) após 11 anos de cultivo e sob área de vegetação natural (VN), localizados no município de Itiquira-MT.

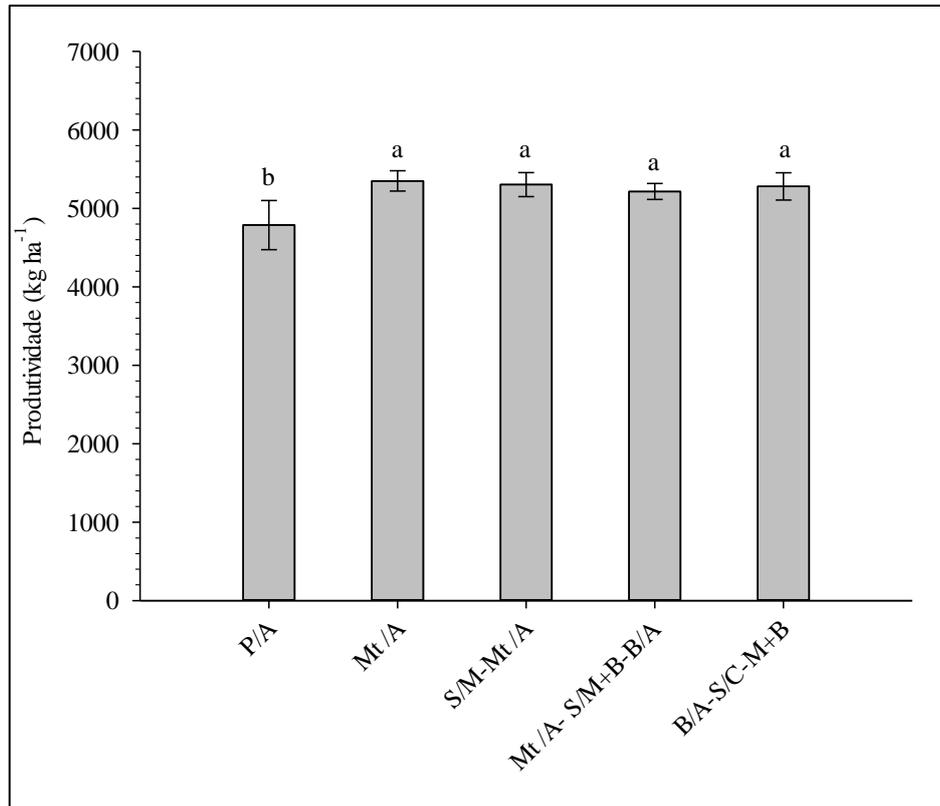


Letras minúsculas na figura (a) comparam os sistemas de culturas; letras minúsculas na figura (b) comparam os preparos de solo pelo teste Scott-Knott ($p < 0,05$). A VN representa a condição original do solo e não foi utilizada para comparação estatística.

6.3 PRODUTIVIDADE DA SOJA

A produtividade da soja na safra 2018/19, após 11 anos de cultivo dos sistemas de produção, não apresentou efeito de interação entre sistemas de culturas e preparos de solo, mas apenas efeito dos sistemas de culturas. O sistema de culturas P/A apresentou 4.787 kg ha^{-1} de produtividade de soja, sendo estatisticamente menor que os demais sistemas, que não diferiram entre si e apresentaram média de 5.287 kg ha^{-1} (Figura 7).

Figura 7 – Produtividade da soja sob diferentes sistemas de culturas (P/A = Pousio/ Algodão; Mt/A = Milheto/Algodão; S/M–Mt/A = Soja/Milho–Milheto/Algodão; Mt/A–S/M+B–B/A = Milheto/Algodão–Soja/Milho+Braquiária–Braquiária/Algodão; B/A–S/C–M+B = Braquiária/Algodão–Soja/Crotalária–Milho+Braquiária) na safra 2018/19, após 11 anos de cultivo, em experimento localizado no município de Itiquira/MT.



Letras minúsculas comparam os sistemas de culturas pelo teste Scott-Knott ($p < 0,05$).

7 DISCUSSÃO

7.1 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

A interpretação dos dados de atributos da acidez e disponibilidade de nutrientes do solo pode ser realizada de duas formas. O mais comum é comparar os dados pelos métodos estatísticos, assumindo uma diferença estatística significativa entre as propriedades do solo avaliadas nos diferentes tratamentos, sem considerar a relevância agrônômica dessas diferenças. Outra forma, é considerar os limites críticos de respostas das culturas, os quais normalmente são pré-estabelecidos por regiões. A classificação dos limites críticos dos atributos químicos do solo para os solos do Cerrado utilizada foi proposta por Sousa e Lobato (2004) e que consta no manual de recomendação de calagem e adubação para os solos do Cerrado, intitulado “Cerrado: correção do solo e adubação”. Neste trabalho, realizamos as duas formas de comparação.

7.1.1 Atributos da acidez do solo

Os maiores valores de pH observado no solo das camadas entre 5 e 30 cm de profundidade estão associadas ao grau e tipo de mobilização do solo. Para neutralizar a acidez em camadas mais profundas, as partículas do calcário ou os produtos da sua dissociação devem ser movidos para baixo no perfil do solo (RHEINHEIMER et al., 2000). Isso é facilitado sob PC, onde ocorre o revolvimento do solo, incorporando calcário em um maior volume e elevando o pH do solo em camadas mais profundas. Entretanto, sob PD, como o calcário é aplicado sobre a superfície do solo, ocorre uma concentração da dose no solo da camada superficial, provocando maiores valores de pH no solo dessa camada. Além disso, como não ocorre o revolvimento do solo no PD, alguns fatores podem contribuir para a migração do calcário no perfil do solo, como por exemplo, bioporos criados pelas raízes das plantas, onde a infiltração de água pelos biocanais pode carregar partículas de calcário (CALEGARI et al., 2013; RHEINHEIMER et al., 2000). Dessa forma, as plantas de cobertura podem facilitar a correção da acidez do solo em camadas subsuperficiais sob PD. Isso pode explicar diferenças entre os sistemas de culturas.

Os maiores valores de pH do solo observados até 20 cm de profundidade no sistema de culturas Mt/A, que se caracteriza pela sucessão milho/algodão, cultivados sob PD, ocorreu, provavelmente, devido ao extenso sistema radicular do milho, com capacidade de explorar

um grande volume de solo. Dessa forma, o seu cultivo anual pode favorecer a movimentação do calcário aplicado em superfície no PD para o solo de camadas subsuperficiais. Por sua vez, sob PC, não foi observado efeito dos sistemas de culturas sobre o pH do solo até 20 cm de profundidade, isso porque, com o revolvimento do solo da camada arada, os efeitos das plantas de cobertura podem ter sido homogeneizados na camada, reduzindo as possíveis diferenças entre os sistemas de culturas. Entretanto, abaixo de 20 cm de profundidade, o sistema de culturas Mt/A também apresentou os maiores valores de pH do solo sob PC. Isso indica que, provavelmente, o sistema radicular do milho possa ter favorecido a descida do calcário além dos 20 cm de profundidade proporcionado pelo preparo do solo.

A V do solo apresentou comportamento semelhante ao pH do solo em resposta ao preparo de solo, tendo em vista que esses dois atributos estão associados (DIAS et al., 2019). A calagem, além de corrigir a acidez do solo e reduzir os efeitos tóxicos dos íons Al^{3+} , também visa aumentar os níveis de cátions básicos do solo, como o Ca e Mg, quando o calcário dolomítico é aplicado (TIRITAN et al., 2016). No PD, o aumento do pH do solo na camada superficial resulta em maior disponibilidade de cátions básicos, conseqüentemente elevando os níveis de V do solo da camada superficial. Já sob PC, com a incorporação de fertilizantes e do corretivo da acidez, o aumento do pH do solo ocorre em camadas mais profundas, além da incorporação dos cátions básicos fornecidos pelo calcário, resultando em maior V no perfil do solo.

Sob PD, estatisticamente, os efeitos dos sistemas de culturas sobre a V do solo foram observados até 20 cm de profundidade. Isso sugere que o efeito do PD nos atributos químicos do solo é restrito aos primeiros 20 cm de solo. Achados semelhantes foram observados por Dias et al. (2019), em estudo avaliando o efeito de diferentes usos do solo no Cerrado brasileiro sobre os atributos químicos de um Latossolo. Neste estudo, os autores verificaram que o efeito do PD sobre a V do solo ocorreu até 20 cm de profundidade. Entretanto, observamos níveis considerados adequados de V ($> 36\%$) (SOUSA; LOBATO, 2004) apenas no solo das camadas mais superficiais (até 10 cm de profundidade), enquanto que, sob PC os níveis foram adequados até 20 cm de profundidade. Dessa forma, mesmo com alterações na V do solo abaixo de 10 cm de profundidade, o PD pode proporcionar um ambiente favorável para o desenvolvimento das plantas apenas em camadas mais superficiais.

Da mesma forma que aconteceu com o pH do solo, os sistemas de culturas apresentaram pouco efeito sobre a V do solo quando cultivado sob PC, resultado do revolvimento do solo e diluição dos efeitos dos sistemas de culturas. Sob PD, a ausência de efeitos dos sistemas de culturas sobre a V do solo da camada superficial ocorreu, provavelmente, devido a aplicação

dos insumos agrícolas (calcário e fertilizantes) em superfície, aumentando os níveis de K e, principalmente, Ca e Mg no solo da camada superficial. Dessa forma, ocorre a elevação da V do solo a níveis muito altos, reduzindo as diferenças entre os sistemas de culturas.

Os teores de Al trocável e a m do solo não foram afetados pelos sistemas de culturas, pois, os efeitos do uso de diferentes plantas de cobertura sobre o Al trocável, e consequentemente sobre a m , são mais frequentemente determinados em nível de rizosfera (LI et al., 2008). Como não avaliamos o solo da rizosfera, é possível que os efeitos dos sistemas de culturas sobre esses atributos da acidez do solo tenham sido diluídos na massa total do solo em cada camada. Além disso, os efeitos dos preparos de solo são mais determinantes nas diferenças e, tendo em vista as aplicações de calcário na área, parte das camadas de solo avaliadas não apresentaram Al trocável e, consequentemente, m .

O teor de Al trocável, e consequentemente a m do solo, foram neutralizados até 10 cm de profundidade sob PD e até 20 cm sob PC. A elevação do pH do solo a valores maiores que 5,5 provocam a precipitação do Al^{3+} da solução do solo em formas não tóxicas para as plantas (TIRITAN et al., 2016). Dessa forma, os menores teores de Al trocável do solo sob PC ocorrem devido aos efeitos da elevação do pH do solo em camadas mais profundas, neutralizando o Al tóxico e aumentando os teores de cátions básicos presentes na CTC efetiva, consequentemente elevando a V do solo. Sob PD esse efeito é observado, principalmente, no solo de camadas mais superficiais. Entretanto, observamos que abaixo de 10 cm de profundidade, o solo sob PD apresentou maior concentração de Al trocável, bem como maior m , comparado ao PC. Dessa forma, é evidente que a aplicação de calcário na superfície do solo sob PD não foi eficiente para neutralizar a toxicidade do Al^{3+} em camadas subsuperficiais, como observado em outros estudos (CALEGARI et al., 2013; VERONESE et al., 2012).

Embora apresente diferença estatística significativa entre as camadas de solo, a m é classificada como baixa (< 20%) até 20 cm de profundidade (SOUSA; LOBATO, 2004) independente do preparo de solo. Entretanto, valores maiores de m foram observados no solo sob PD em camadas subsuperficiais, sendo que abaixo de 20 cm de profundidade foram observados valores superiores a 20%. Dessa forma, a aplicação superficial de calcário pode ser uma alternativa viável apenas quando a acidez e a toxicidade por Al^{3+} na subsuperfície do solo foram previamente corrigidas pela incorporação do calcário no solo da camada arável (CALEGARI et al., 2013), permitindo que as aplicações superficiais após a adoção do PD corrijam apenas o processo de reacidificação do solo que ocorre a partir da superfície (CQFS-RS/SC, 2016).

A acidez potencial do solo apresentou comportamento semelhante ao pH e V do solo em resposta ao preparo de solo. A menor acidez potencial do solo na camada superficial sob PD ocorreu devido a aplicação superficial de calcário, promovendo a elevação do pH do solo (JORIS et al., 2013), e conseqüentemente, a neutralização de íons H^+ e Al^{3+} (ECHART; CAVALLI-MOLINA, 2001), responsáveis pela acidez potencial do solo. Além disso, os maiores teores de MOS observados no solo da camada superficial promovem aumento da quantidade de grupos funcionais capazes de gerar CTC, conseqüentemente reduzindo a acidez potencial do solo. Devido à ausência de revolvimento do solo sob PD, a elevação do pH do solo ocorre de forma mais intensa na superfície, reduzindo com a profundidade, conseqüentemente, aumentando a acidez potencial. Já sob PC, a menor acidez potencial do solo abaixo de 5 cm de profundidade está relacionada à incorporação de calcário e aumento do valor de pH no perfil do solo.

7.1.2 Disponibilidade de P, K, Ca e Mg

O PC do solo apresentou menores teores de nutrientes no solo da camada superficial (0-5 cm) comparado ao PD. Por outro lado, a maior disponibilidade de nutrientes em profundidade foi verificada no solo sob PC. Esse efeito ocorre devido ao revolvimento do solo (JORIS et al., 2016), que acaba incorporando fertilizantes, calcário e resíduos das culturas da camada superficial do solo para camadas mais profundas, proporcionando uma distribuição homogênea de nutrientes no solo da camada arável (MARTÍNEZ et al., 2016), conforme já abordado para os parâmetros de acidez. Além disso, o PD tende a causar uma maior estratificação dos nutrientes no perfil do solo pela deposição dos resíduos das culturas na superfície do solo, promovendo a reciclagem e trazendo nutrientes das camadas mais profundas para as superiores (CALEGARI et al., 2013).

Em termos gerais, o PD contínuo por onze anos resultou em maior fertilidade e menor acidez no solo da camada superficial (0-5 cm). Entretanto, apresentou algumas limitações de disponibilidade de nutrientes e acidez do solo em camadas mais profundas. Vários estudos evidenciam que o PD constrói um gradiente de disponibilidade de nutrientes no solo, concentrando nutrientes em camadas mais superficiais e diminuindo abruptamente com a profundidade do solo (CALEGARI et al., 2013; MARTÍNEZ et al., 2016; TIECHER et al., 2017), o que também foi verificado neste estudo. Entretanto, embora o PD promova melhoria da fertilidade do solo na camada superficial, quando as deficiências nutricionais e a toxicidade do Al^{3+} não forem corrigidas antes da implantação do PD, pode ocorrer deficiência de nutrientes

e limitações para o crescimento das raízes em camadas mais profundas, podendo se tornar um fator limitante para o rendimento das culturas (CALEGARI et al., 2013). Apesar disso, os efeitos deste gradiente sobre a produtividade das culturas são muito dependentes da umidade do solo ao longo dos cultivos, tendo em vista que o acesso das plantas aos nutrientes é dependente de fenômenos como fluxo de massa e difusão (SILVA; ALVAREZ VENEGAS; RUIZ, 2002), influenciando qual a importância do volume de solo explorado pelas raízes.

Semelhante ao que ocorre no PD, a rotação de culturas altera a distribuição de nutrientes no perfil do solo. A profundidade de enraizamento das culturas tem influência sobre a estratificação dos nutrientes no perfil do solo, à medida que culturas com raízes mais profundas extraem nutrientes de camadas mais baixas e os depositam em camadas mais superficiais do solo (MALLARINO; BORGES, 2006). Algumas gramíneas como a braquiária e o milheto possuem grandes sistemas radiculares e com alta capacidade de explorar o perfil do solo (GARCIA; LI; ROSOLEM, 2013), podendo favorecer a ciclagem de nutrientes de camadas mais profundas. Nesse sentido, observamos que, de modo geral, os sistemas de culturas Mt/A e B/A-S/C-M+B apresentaram os maiores conteúdos de K, Ca e Mg no perfil do solo avaliado. O cultivo de plantas como o milheto, o milho e a braquiária apresentam grande potencial de acúmulo de nutrientes nos tecidos vegetais devido ao grande potencial de produção de matéria seca, liberando de forma gradativa ao solo após decomposição dos restos culturais.

Observamos efeito de preparo de solo até 15 a 20 cm de profundidade sobre os teores de P disponível do solo, onde os menores teores foram observados sob PC, de modo geral. Em solos tropicais altamente intemperizados, como os Latossolos, o P é fortemente adsorvido aos oxi-hidróxidos de Fe/Al presentes no solo (KRUSE et al., 2015), minerais argilosos e substâncias húmicas (WEIHRAUCH; OPP, 2018). O revolvimento do solo expõe o P aplicado via fertilizantes aos grupos funcionais do solo capazes de adsorver P, consequentemente reduzindo o conteúdo de P disponível (TIECHER et al., 2012).

Os maiores teores de P disponível do solo sob PD até 15 cm de profundidade não eram esperados, uma vez que, menores valores de pH do solo foram observados em comparação ao solo sob PC. A sorção de P aumenta em meio ácido quando as partículas são predominantemente carregadas positivamente (WEIHRAUCH; OPP, 2018). Dessa forma, menor disponibilidade de P era esperada no solo cultivado sob PD devido aos menores valores de pH, especialmente no solo abaixo de 5 cm de profundidade. Com o aumento do pH, a carga elétrica das partículas da superfície dos argilominerais mudam, ficando predominantemente carregadas negativamente, reduzindo a adsorção de P, consequentemente, aumentando a disponibilidade desse elemento no solo. Dessa forma, a sorção de P é altamente dependente do

pH do solo (FINK et al., 2016). Acima de pH 6,0 a adsorção de P diminui (BINNER; DULTZ; SCHENK, 2015), aumentando a sua disponibilidade por consequência.

Os maiores valores de P disponível sob PD, especialmente no solo das camadas entre 5 e 15 cm de profundidade, ocorreram devido a aplicação de fertilizantes fosfatados no sulco de semeadura, atingindo aproximadamente 8-10 cm de profundidade. Dessa forma, ocorre acúmulo de P no sulco de semeadura e, conseqüentemente, saturação dos locais mais ávidos por P, resultando em acúmulo de P em formas mais lábeis no solo dessas camadas (TIECHER et al., 2012) e certa migração de P no perfil. Além disso, os grupos funcionais da MOS podem alterar as cargas de superfície dos argilominerais, reduzindo a adsorção de P, além de competir por sítios de adsorção, conseqüentemente, aumentando a disponibilidade de P (FINK et al., 2016). Dessa forma, a menor perturbação do solo e o maior acúmulo de C na camada superficial do solo (CORBEELS et al., 2016), proporcionado pelo PD, também favorecem a maior disponibilidade de P, como observado neste estudo.

Quando cultivados sob PC, não houve diferença significativa no teor de P disponível do solo entre os sistemas de culturas até 10 cm de profundidade. A distribuição dos resíduos orgânicos em profundidade, proporcionada pelo revolvimento do solo, provoca a reação do P com o solo após a mineralização dos resíduos, reduzindo as diferenças no conteúdo de P disponível do solo entre os sistemas de culturas. Já sob PD, foram observadas diferenças no teor de P disponível do solo entre os sistemas de culturas até 20 cm de profundidade. Isso demonstra que o cultivo de diferentes espécies vegetais em uma mesma área pode alterar a dinâmica dos nutrientes no solo, principalmente o P (TIECHER et al., 2012; TIECHER; DOS SANTOS; CALEGARI, 2012).

A estratégia de uso de diferentes plantas que proporcionam maior contato solo-raiz é importante na absorção de P, pois este elemento possui baixa mobilidade nos Latossolos (CALEGARI et al., 2013). Plantas com sistema radicular mais extensos podem captar P do solo de camadas mais profundas e acumular na superfície do solo após a deposição de seus resíduos vegetais (RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2001), resultando em gradiente de disponibilidade de P, como foi observado neste estudo. De modo geral, observamos maior P disponível no solo cultivado sob monocultivo (P/A), provavelmente devido à menor exportação pelas culturas de interesse econômico e também devido a menor ciclagem de nutrientes. Dessa forma, a menor disponibilidade de P do solo nos demais sistemas de culturas em relação ao P/A se deve, provavelmente, devido a maior exportação desse elemento pelas culturas de grãos e fibras, bem como pela imobilização do P nos restos culturais das plantas de cobertura, conseqüentemente, reduzindo a disponibilidade imediata do P do solo. Entretanto, a imobilização do P nos resíduos

culturais é temporária e apresenta grande potencial de fornecimento de P ao longo do ciclo das culturas pela mineralização dos resíduos culturais.

Para solos muito argilosos (teor de argila acima de 60%), os níveis adequados de P disponível para os solos argilosos do Cerrado é de 4,1 a 6,0 mg kg⁻¹ na camada 0-20 cm (SOUSA; LOBATO, 2004). Neste estudo, os teores de P disponível no solo da camada 0-20 cm encontraram-se em níveis altos, com teores superiores a 7,9 e 15,6 mg P kg⁻¹ no solo sob PC e PD, respectivamente. No solo da camada superficial ocorrem, também, os maiores valores de pH, que aumentam a disponibilidade de P, principalmente aquele proveniente da adubação fosfatada das culturas. Essa disponibilidade considerada alta e baixos níveis de acidez do solo devem diminuir os efeitos dos sistemas de preparo e de culturas sobre a produtividade das culturas, tendo em vista que o P é um dos nutrientes mais restritivos à produtividade no Cerrado, aliado a toxidez por Al³⁺ (ARAUJO, 2011). Embora o solo da camada 0-20 cm apresente valores altos de P disponível, o solo da camada de 20-40 cm apresenta teores de P disponível muito inferiores, com valores menores que 2,6 mg kg⁻¹, independente do sistema de culturas e preparo de solo utilizado. Isso mostra a dificuldade de promover a correção da deficiência de P do solo de camadas mais profundas, podendo limitar o crescimento das raízes das plantas abaixo de 20 cm de profundidade.

Os maiores teores de K disponível observados no solo sob os sistemas de culturas P/A e Mt/A ocorreram, provavelmente, devido ao cultivo anual de algodão na área. O algodão é uma cultura de alta demanda de K (TARIQ et al., 2018). Dessa forma, as áreas de cultivo de algodão são, frequentemente, caracterizadas por alta taxa de aplicação de fertilizantes potássicos, resultando em maior acúmulo de K no sistema (CHEN et al., 2020). De acordo com Sousa e Lobato (2004), níveis de K disponível entre 51 e 80 mg kg⁻¹ são considerados adequados para os solos do Cerrado. Os sistemas de culturas P/A e Mt/A apresentaram teores de K considerados altos (> 80 mg kg⁻¹) na camada 0-20 cm, principalmente sob PC, com valores superiores a 117 mg K kg⁻¹. Embora esses tratamentos não tenham recebido as maiores quantidades de fertilizantes potássicos (Tabela 3), a menor diversidade de plantas presentes nos sistemas de culturas P/A e Mt/A resulta em uma menor ciclagem dos nutrientes adicionados, resultando em acúmulo de nutrientes em altas quantidades no solo.

Embora os maiores conteúdos de K sejam observados no solo da camada 0-5 cm, os sistemas de culturas S/M-Mt/A, Mt/A-S/M+B-B/A e B/A-S/C-M+B, em ambos os preparos de solo, apresentam teor de K no solo da camada 0-20 cm considerados adequados para obter rendimentos razoáveis das culturas. Isso sugere que as doses aplicadas foram adequadas para manter os rendimentos das culturas e melhorar os níveis de K do solo. Isso provavelmente se

deve ao fato de que o cultivo de algodão nesses sistemas ocorre a cada dois ou três anos, reduzindo a intensidade da adubação potássica, bem como, devido ao uso de diferentes plantas de cobertura com potencial de acúmulo de nutrientes adicionados ao solo.

Garcia et al. (2008) observaram que a utilização da braquiária possui boa capacidade de reciclar K, aumentando o conteúdo de K no solo de camadas mais superficiais. Marcelo et al. (2012) verificaram que o milho e a crotalaria apresentam grande potencial para produção de MS e acúmulo de nutrientes, importante no processo de reciclagem de nutrientes. Além disso, estes autores verificaram que o milho apresentou maior acúmulo de K e Mg, enquanto que a crotalaria acumulou mais N e P na biomassa vegetal. Isso mostra que a diversificação das espécies de plantas de cobertura promove melhores efeitos sobre a ciclagem de nutrientes, uma vez que apresentam potencial de acúmulo de diferentes nutrientes.

Os maiores teores de Ca e Mg do solo foram observados nos sistemas de culturas S/M-Mt/A e B/A-S/C-M+B sob PC e nos sistemas Mt/A e B/A-S/C-M+B sob PD. Plantas como o milho, a braquiária e o milho possuem extenso sistema radicular que favorece a descida de partículas de calcário no perfil do solo e a ciclagem por meio da decomposição das raízes, elevando os níveis de Ca e Mg do solo em profundidade. As maiores concentrações de Ca e Mg observadas no solo das camadas superficiais quando cultivado sob PD e decrescendo com o aumento da profundidade ocorre devido à aplicação de calcário dolomítico na superfície do solo, realizado periodicamente a cada dois anos. Os maiores valores de pH observado no solo da camada superficial sob PD promovem o aumento da capacidade de retenção de cátions, favorecendo o acúmulo destes elementos no solo de camadas mais superficiais. Além disso, a reciclagem desses elementos pela fitomassa das plantas depositadas na superfície do solo tem contribuição na estratificação desses elementos no solo (BAYER; BERTOL, 1999).

7.1.3 Capacidade de troca de cátions e matéria orgânica do solo

Os maiores teores de MOS observados no solo da camada superficial cultivado sob PD ocorre devido à ausência do revolvimento do solo, que resulta no acúmulo dos resíduos culturais na superfície do solo e uma menor taxa de decomposição da MOS (BAYER; BERTOL, 1999). Além disso, nos primeiros anos após o estabelecimento do PD, o aumento da MOS é restrito ao solo das camadas superficiais. No entanto, com o tempo, o aumento do teor de MOS pode ocorrer no solo de camadas mais profundas devido ao desenvolvimento do sistema radicular e à atividade dos organismos do solo (CARVALHO et al., 2007). Em contrapartida, o revolvimento constante do solo sob PC causa a homogeneização do teor de MOS da camada

superior e mais profundas, favorecendo a redução dos teores de MOS (SÁ et al., 2015). Nesse sentido, foi verificado que, de modo geral, o teor de MOS, quando cultivado com os sistemas de culturas sob PC, se manteve uniforme até aproximadamente 15-20 cm de profundidade.

Independente do preparo de solo utilizado, o monocultivo de algodão (P/A) apresentou os menores teores de MOS quando comparado aos sistemas que receberam plantas de cobertura. Além disso, os sistemas de culturas sob PC que apresentaram maiores teores de MOS foram aqueles que receberam plantas com alta capacidade de produção de matéria seca, como o milho e a braquiária, e plantas leguminosas com grande capacidade de fornecer N para o sistema, como a soja e a crotalária. Pesquisas demonstram que o C do solo, e conseqüentemente a MOS, aumentam proporcionalmente à quantidade de resíduos vegetais devolvidos ao solo (BAYER et al., 2004; KELLEY; LONG; TODD, 2003), ressaltando a importância destes sistemas de produção para o aporte de MOS.

O milho apresenta grande potencial em aumentar a MOS devido à grande quantidade de resíduos culturais deixados após a colheita (ASHWORTH et al., 2017). Zuber et al. (2015) verificaram que maiores frequências de cultivo de milho aumentaram o EC do solo. Estes autores atribuem esse fato, além da grande produção de biomassa acima do solo, ao extenso sistema radicular do milho, que pode explorar uma zona maior no perfil do solo, estimulando a agregação e aumentando o aporte de biomassa vegetal abaixo do solo. Algumas gramíneas forrageiras, como a braquiária e o milheto, também possuem grandes sistemas radiculares capazes de explorar um maior volume de solo no perfil (CALONEGO et al., 2017).

A maior $CTC_{pH\ 7,0}$ observada nos solos sob PD está associado ao maior conteúdo de MOS na camada superficial. Solos tropicais, altamente intemperizados, apresentam naturalmente baixa capacidade de retenção de cátions e são altamente dependentes das cargas variáveis derivadas dos grupos funcionais da MOS (DIAS et al., 2019). O PC do solo proporciona maior homogeneidade no perfil do solo, apresentando melhores condições de exploração pelo sistema radicular e, conseqüentemente, podendo favorecer o crescimento das plantas. Entretanto, apresenta menores conteúdos de MOS e $CTC_{pH\ 7,0}$, podendo favorecer as perdas de nutrientes e redução da qualidade do solo. Dessa forma, para manter altos níveis de fertilidade, estratégias de manejo que promovem aumento da MOS devem ser favorecidas, como sistemas menos intensivos, como o PD, com entrada contínua de biomassa ao solo (SÁ et al., 2015). Além disso, Bayer e Bertol (1999) relatam que o efeito da MOS nas propriedades químicas do solo depende da quantidade de resíduos e rotação de culturas utilizadas.

Dessa forma, o cultivo de plantas de cobertura com o objetivo de reciclar os nutrientes do solo, especialmente em SPD, favorece o acúmulo de nutrientes em formas mais lábeis no

solo de camadas mais superficiais (TIECHER et al., 2017), como foi observado neste estudo. As plantas de cobertura tem capacidade de aumentar a disponibilidade de nutrientes através da ciclagem de nutrientes, e também pela reciclagem dos elementos através da deposição dos resíduos das culturas sobre o solo e posterior decomposição (TELES et al., 2017). Assim, as perdas de nutrientes podem ser reduzidas pelo uso de plantas de cobertura que promovem o acúmulo de nutrientes no sistema solo-planta. Além dos efeitos positivos sobre a ciclagem de nutrientes, as plantas de cobertura aumentam o conteúdo de MOS e, conseqüentemente, a CTC do solo, podendo reduzir as perdas de nutrientes. Aliado a isso, a cobertura vegetal solo proporciona maior proteção sobre a superfície do solo, reduzindo as perdas de solo e água.

7.2 INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO

7.2.1 Carbono orgânico do solo

As práticas de manejo alteraram o conteúdo de COT e das frações de C do solo, especialmente nas camadas mais superficiais, onde os maiores conteúdos de C foram observados no solo sob PD. Resultados semelhantes foram observados por Corbeels et al. (2016) em estudo avaliando o acúmulo de C em solo sob PD no Cerrado. A maior estratificação da concentração de C do solo sob PD, quando comparado ao PC, é atribuída à ausência do revolvimento do solo e à maior retenção dos resíduos culturais sobre a superfície do solo (CORBEELS et al., 2016; TIVET et al., 2013). Em contrapartida, sob PC, concentrações semelhantes de COS entre as camadas de solo foram observadas, resultado do revolvimento, e conseqüente incorporação dos resíduos vegetais, tornando o conteúdo de C do solo da camada arável mais homogêneo (FERREIRA et al., 2020).

Entretanto, as diferenças observadas no conteúdo de C no solo da camada superficial não foram suficientes para alterar o EC total do solo entre o PC e o PD. Resultados contraditórios foram observados por Salton et al. (2014) em condições semelhantes a este estudo e verificaram que o PC contínuo diminui o EC do solo ao longo dos anos. O conteúdo semelhante de C no solo da camada 0-20 cm entre os PC e PD deste estudo se deve, provavelmente, ao alto conteúdo de argila do solo (664 g argila kg⁻¹). Solos com alto teor de argila e óxidos proporcionam maior proteção ao COS, aumentando sua estabilização devido à interação organo-mineral (TIVET et al., 2013). Nesse sentido, verificamos que cerca de 75% do COS está associada à fração mineral do solo, resultando em maior proteção do COS e, conseqüentemente, maiores teores de C são observados, mesmo sob PC do solo.

O monocultivo de algodão (sistema de culturas P/A) não promoveu diferenças no teor de C do solo nas camadas analisadas sob PC, enquanto que, sob PD o solo da camada superficial (0-5 cm) apresentou maior conteúdo de C que o solo das demais camadas. Sob PD, mesmo com baixa produção de biomassa vegetal devido ao monocultivo do algodão, o aumento do conteúdo de C no solo da camada superficial é resultado da ausência do revolvimento do solo. Os sistemas de culturas com maior diversidade de plantas apresentaram maior conteúdo de C no solo quando comparado ao sistema que permanece sob pousio. Sob PC, os sistemas de culturas que receberam maior intensidade de plantas leguminosas associadas a plantas com alta capacidade de produção de biomassa vegetal (S/M-Mt/A e B/A-S/C-M+B) apresentaram maior conteúdo de COT, demonstrando que esses sistemas apresentam grande potencial de aumentar o conteúdo de COT do solo, mesmo sob PC.

O EC do solo variou de 46,1 Mg C ha⁻¹ no sistema de culturas P/A a 52,5 Mg C ha⁻¹ nos sistemas de culturas S/M-Mt/A e B/A-S/C-M+B. O aumento do EC do solo é um importante indicador da qualidade do solo, com consequente melhoria da produtividade das culturas (FERREIRA et al., 2020), pois, segundo Srinivasarao et al. (2014), é importante aumentar o EC do solo na zona das raízes para restaurar a qualidade do solo. Entretanto, todos os sistemas de culturas apresentaram EC menor que o solo da área sob VN. O solo da área sob VN apresentou 64,6 Mg C ha⁻¹ e está de acordo com outros valores de EC observados em Latossolos com mais de 60% de argila e sob VN do Cerrado, que variam de 39,5 a 68,1 Mg C ha⁻¹ no solo da camada 0-20 cm (BAYER et al., 2006; CORBEELS et al., 2006; DIECKOW et al., 2009; MARCHÃO et al., 2009).

Em clima subtropical, Ferreira et al. (2018) avaliou o efeito do uso de diferentes intensidades de culturas sob PD em Latossolo e observou maior EC no solo cultivado com sistemas mais intensivos quando comparado ao solo de uma área sob VN. Esse autor sugere que o PD à longo prazo resulta em um novo estado de equilíbrio, superando o EC do solo sob VN. Entretanto, Sá et al. (2014), em condições semelhantes, observaram que os sistemas produtivos sob PD não superaram o EC do solo sob VN, mesmo após 29 anos de cultivo. Sá et al. (2014) sugere que os processos que impulsionam a recuperação do COS são o manejo da fertilidade do solo, aliado ao alto aporte de C através da intensa rotação de culturas.

O uso dos sistemas de culturas e preparos de solo não afetaram apenas o conteúdo de COT do solo, mas também a sua composição. O efeito do preparo de solo e dos sistemas de culturas foi mais visível nas frações particuladas de C (COAG e COAF), especialmente no solo das camadas mais superficiais. As frações particuladas de C são mais jovens, minimamente transformadas e estão menos associadas aos constituintes minerais do solo (SALVO;

HERNÁNDEZ; ERNST, 2010). Portanto, essa fração é mais dinâmica e está associada à disponibilidade de nutrientes a curto prazo. Além disso, essa fração está diretamente relacionada ao suprimento de resíduos vegetais acima e abaixo do solo (SÁ; LAL, 2009; SALVO; HERNÁNDEZ; ERNST, 2010).

Sob PD foi observado maior conteúdo de C na fração COAG, que é constituída de material vegetal em menor grau de decomposição. O aumento do conteúdo de C nessa fração está diretamente ligado ao suprimento de resíduos vegetais acima e abaixo do solo (BAYER et al., 2004; DIEKOW et al., 2005; SÁ; LAL, 2009). Dessa forma, a deposição dos resíduos culturais na superfície do solo sob PD promove o incremento de C em frações mais lábeis. Sob PC, com o revolvimento do solo, ocorre maior exposição dos resíduos culturais ao solo, conseqüentemente, aumentando a decomposição e reduzindo o conteúdo de C das frações mais lábeis. A fração COAF apresentou comportamento semelhante à fração COAG. A fração COAF é composta de resíduos vegetais de menor tamanho e em estado intermediário de decomposição. Dessa forma, essa fração está mais disponível ao ataque microbiano e apresenta maior potencial de liberação de nutrientes a curto prazo.

As frações particuladas do COS são consideradas por alguns autores um indicador altamente sensível para detectar alterações provocadas pelo uso de diferentes práticas de manejo do solo (BAYER et al., 2001; CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992). Os impactos dos sistemas de culturas e preparos de solo após onze anos de cultivo sobre as frações particuladas do COS foram observados apenas no solo das camadas mais superficiais, especialmente na camada 0-5 cm. Os sistemas de culturas sob PD apresentaram maior proporção da fração COAG e COAF, além de maior acúmulo de C nessas frações no solo da camada superficial, quando comparado ao PC. Dessa forma, o uso do PD tem maior capacidade de promover melhor qualidade do solo. Além disso, independente do preparo de solo, os sistemas de culturas que receberam maior diversidade de plantas, comparado ao sistema sob monocultivo, apresentaram maiores conteúdos de C nas frações particuladas, sugerindo que o uso de sistemas mais diversificados são a alternativa de manejo mais adequada. Além disso, o uso de diversidade de espécies associada ao PD nos sistemas de produção, tem um efeito benéfico aditivo sobre a qualidade do solo.

Os principais impactos dos sistemas de culturas sobre o COS e suas frações foram observados especialmente no solo das camadas mais superficiais. No entanto, quando considerado o EC das frações, a fração COAF teve o efeito dos sistemas de culturas e preparos de solo diluídos na massa de solo da camada arável, demonstrando que essa fração apresenta menor potencial como indicador de mudanças nas práticas de manejo e é mais sensível às

práticas de manejo em camadas mais superficiais do solo. O estoque de COT e da fração COAG mantiveram os efeitos dos sistemas de culturas no solo da camada arável, entretanto, apenas a fração COAG manteve o efeito do preparo de solo sobre o EC. Isso sugere que a fração COAG parece ser mais sensível em identificar as mudanças nas práticas de manejos e apresenta maior potencial como indicador da qualidade do solo, quando considerado a camada arável do solo.

No solo das camadas superficiais, o maior conteúdo de COT do solo ocorreu, principalmente, devido ao maior conteúdo de C nas frações mais lábeis (COAG e COAF), uma vez que pouca diferença foi observada para o conteúdo de C da fração COAM entre as camadas de solo. Além disso, a fração COAM apresentou as menores diferenças entre os sistemas de culturas e os preparos de solo. A fração COAM é uma fração bastante estável ao longo do tempo e difícil de degradar devido a sua estrutura complexa e alto grau de estabilização com a fração mineral (SALVO; HERNÁNDEZ; ERNST, 2010), o que resulta, conseqüentemente, em menor variação do conteúdo de C nessa fração quando submetido a diferentes manejos.

Os sistemas de culturas alteraram o conteúdo de C da fração COAM apenas no solo das camadas mais superficiais (até 10 cm de profundidade). Os sistemas de culturas S/M-Mt/A, Mt/A-S/M+B-B/A e B/A-S/C-M+B, que receberam gramíneas e leguminosas durante o período de cultivo, apresentaram maior conteúdo de C na fração COAM. Além disso, esse mesmo efeito se manteve quando considerado o EC da fração COAM no solo da camada arável. Os maiores conteúdos de C na fração COAM no solo cultivado sob esses sistemas de culturas se deve, provavelmente, à grande entrada de C pela presença de plantas como o milheto, milho e braquiária, que apresentam alta capacidade de produzir biomassa vegetal, associado ao cultivo de plantas leguminosas nesses sistemas. Os resíduos das plantas leguminosas apresentam maior labilidade, o que contribui para o uso mais eficiente desses resíduos pelos microrganismos do solo, melhorando a estabilização do C por ligação química com a matriz mineral do solo (COTRUFO et al., 2015; TIVET et al., 2013).

Além disso, o alto teor de argila e óxidos de Fe e Al do solo no local de estudo aumentam a área superficial específica das partículas do solo, aumentando o potencial de estabilização do COS. Dessa forma, à medida que aumenta o conteúdo de materiais mais finos no solo, como argila e óxidos, maior proteção é oferecida ao COS devido à associação entre as partículas inorgânicas do solo e moléculas orgânicas (TIVET et al., 2013). Vários estudos, incluindo Bayer et al. (2001) e Tivet et al. (2013), destacaram a importância da associação organo-mineral para a proteção e aumento do conteúdo de C do solo. Isso também explica porque, mesmo sob PC, o EC do solo permanece elevado e com pouca diferença em relação ao PD. Dessa forma, fica evidente o efeito da proteção do COS pela matriz mineral do solo, uma vez que, mesmo

após onze anos de cultivo, não foram observadas diferenças no EC da fração COAM sob os diferentes preparos de solo.

7.2.2 Índices de qualidade do solo

O índice REC é uma comparação entre o valor de C do solo de duas camadas distintas, geralmente o solo da camada superficial e o solo de uma camada adjacente (FERREIRA et al., 2013). Este índice é utilizado como indicador da qualidade do solo, uma vez que o solo da camada superficial é mais afetado pelas práticas de manejo. Além disso, o incremento do conteúdo de C no solo é um processo lento e ocorre, geralmente, a partir da superfície do solo. Dessa forma, valores mais altos indicam melhoria na qualidade do solo (FERREIRA et al., 2012; FRANZLUEBBERS, 2002, 2010; SÁ; LAL, 2009). Os valores de REC, em função dos diferentes sistemas de culturas e preparos de solo, variaram de 1,0 a 1,6. Para climas temperados, um valor de REC de 2,0 foi sugerido como um limite crítico para manter a qualidade do solo (FRANZLUEBBERS, 2002). Para climas subtropicais, Ferreira et al. (FERREIRA et al., 2013) sugerem valor crítico de REC de 1,5 para Latossolos. Contudo, para climas tropicais, como no presente estudo, um valor crítico de REC ainda é desconhecido.

O PD favorece a estratificação do COS entre as camadas superficiais e subsuperficiais (FERREIRA et al., 2012; FRANZLUEBBERS, 2002), resultando em maiores diferenças entre o conteúdo de C do solo da camada superficial e das demais camadas, especialmente nos sistemas de culturas que incluem plantas de cobertura, consequentemente resultando em maiores valores de REC. O sistema de culturas P/A sob PD, apresentou valor de REC de 1,1, menor que os demais sistemas de culturas, que apresentaram valor médio de 1,44. No sistema de culturas P/A, que permanece em pousio na entressafra, ocorre menor aporte de resíduos vegetais na superfície do solo, consequentemente, resultando em menor diferença entre o conteúdo de C do solo da camada superficial e das demais camadas. Isso também explica porque não foi observado diferença estatística entre os preparos de solo no sistema de culturas P/A.

Sob PC, não foi observado diferenças entre os sistemas de culturas para a REC, sendo os valores médios observados de 1,09. Resultados semelhantes foram observados por Ferreira et al. (2013), onde também encontraram valor de REC de 1,09 em um Latossolo na região sul do país cultivado sob PC. Em nosso estudo, observamos um conteúdo de COS mais homogêneo no perfil do solo sob PC, independente do sistema de culturas utilizado, o que resultou em valores semelhantes de REC entre os sistemas de culturas cultivados sob PC. O aumento da concentração de COS no solo da camada superficial é relatado como crítico para a qualidade

do solo, pois aumenta a CTC do solo, a disponibilidade de nutrientes, a atividade biológica e melhora a estrutura do solo, com efeitos diretos sobre a infiltração de água e a estabilidade dos agregados (CAUSARANO et al., 2008; SÁ; LAL, 2009; TIVET et al., 2013).

Todos os sistemas de culturas e preparos de solo apresentaram IMC superior à VN, considerada referência (IMC = 100). Este indicador tem como objetivo identificar melhorias na qualidade do solo sob diferentes práticas de manejo em relação a uma área sob VN, considerada estável, uma vez que não sofre impactos antropogênicos. Valores de IMC menores que 100 indicam impacto negativo das práticas de manejo sobre a qualidade do solo, enquanto que valores maiores que 100 indicam impacto positivo (BLAIR; LEFROY; LISLE, 1995). Entretanto, deve-se considerar que este índice é um cálculo matemático e que utiliza como base o EC e a labilidade do C do solo. Os resultados desse trabalho, mostram que as práticas de manejo promovem melhorias na qualidade do solo em relação à VN, independente dos sistemas de culturas e preparos de solo. Entretanto, esse indicador deve ser utilizado com cautela pois, para as condições desse estudo, este índice pareceu não representar adequadamente a real condição.

O solo da VN apresentou maior EC do solo, cerca de 15,0 Mg C ha⁻¹ a mais que o solo sob as práticas de manejo adotadas, indicando maior potencial de qualidade do solo. Entretanto, devido às características da vegetação presente na área, o solo sob VN apresenta menor proporção de C lábil, cerca de 16% do EC total, enquanto que, em média, o EC da fração lábil nos sistemas de culturas representa cerca de 25% do EC total. Como os sistemas de culturas apresentam maior proporção de C lábil, embora apresentem menor EC do solo, maior valor de IMC é atribuído a esses sistemas quando comparado à área sob VN. Quantidades mais altas de C lábil indicam melhoria na ciclagem e disponibilidade de nutrientes, na estabilidade e estrutura dos agregados, na atividade biológica do solo, e conseqüentemente, indicam melhor qualidade do solo (TIAN et al., 2013). Entretanto, o sistema de culturas P/A e o PC do solo se mostraram inferiores em qualidade do solo quando considerado o EC total e o índice REC em relação ao solo sob VN.

Considerando apenas os valores de IMC obtidos para as práticas de manejo, o sistema de culturas sob monocultivo (P/A) apresentou menor valor de IMC, quando comparado aos demais, que não diferiram entre si. Também, o uso do PD resultou em maior IMC que o PC. Dessa forma, os resultados obtidos neste trabalho indicam que os sistemas de culturas mais diversificados apresentam potencial de melhorar a qualidade do solo, especialmente aqueles com maior diversidade de culturas. Além disso, o uso do PD pode resultar em maior qualidade do solo, especialmente se associado a sistemas de culturas mais diversificados.

7.3 PRODUTIVIDADE DA SOJA

Mesmo com diferenças nos atributos da acidez do solo, na disponibilidade de nutrientes e na qualidade do solo, a produtividade da soja após onze anos de cultivo não foi afetada pelo preparo do solo. Isso se deve ao fato de que os níveis de acidez e de disponibilidade de nutrientes no solo estavam adequados, associado à condição de boa umidade do solo, pois, na safra 2018/19, onde foi realizada a avaliação da produtividade da soja, não ocorreu déficit hídrico (Figura 1). Dessa forma, o sistema radicular das plantas tende a se concentrar no solo de camadas mais superficiais acessando os nutrientes que precisa, não sofrendo os efeitos do gradiente da acidez e da disponibilidade de nutrientes no perfil do solo, bem como da qualidade do solo.

Observamos que o uso dos diferentes sistemas de culturas, que incluíam plantas de cobertura, não afetou o rendimento de grãos de soja. Entretanto, a produtividade da soja no sistema sob monocultivo foi significativamente menor que os demais sistemas de culturas na safra 2018/19 (uma redução média de 500 kg ha⁻¹ de soja). Nesse sistema, mesmo apresentando níveis de fertilidade do solo semelhantes aos sistemas de culturas que envolviam maior diversidade de plantas, foi observado menores valores dos índices REC e IMC, menor EC total e da fração COAG, e conseqüentemente, menor qualidade do solo. Isso sugere que apenas a alta fertilidade indicada por parâmetros químicos do solo não é suficiente para garantir altas produtividades ao longo do tempo e que aspectos relacionados à ciclagem de nutrientes e atividade biológica do solo são fundamentais para a qualidade do solo e estabilidade produtiva.

Cabe salientar que a produtividade da soja observada neste ano agrícola foi superior à média nacional e a do estado do MT. A produtividade média de soja nacional e do MT para a safra 2018/19 foi de 3.206 e 3.346 kg ha⁻¹, respectivamente (CONAB, 2020). A produtividade média do experimento foi de 5.187 kg ha⁻¹, cerca de 60% a mais que a média nacional e do estado. Conforme abordado anteriormente, na safra de avaliação da produtividade da soja ocorreu chuvas regulares e condições ambientais favoráveis para o cultivo da soja. Além disso, este resultado se trata da primeira avaliação da produtividade de soja no experimento, pois, anteriormente, o algodão sempre foi a cultura de principal interesse. Dessa forma, há necessidade de dar continuidade a avaliação da produtividade das culturas de grãos nas próximas safras a fim de observar se este comportamento se mantém ou se pode ser afetado por algum evento climático, como uma estiagem, por exemplo.

8 CONCLUSÃO

O plantio direto apresentou um forte gradiente de disponibilidade de nutrientes, com maior concentração no solo das camadas mais superficiais, que reduzem abruptamente com a profundidade do solo, enquanto que o preparo convencional apresentou maior homogeneidade nos atributos da acidez do solo e na disponibilidade de nutrientes até os 20 cm de profundidade, após 11 anos de cultivo dos sistemas de produção. O plantio direto apresentou algumas limitações quanto a acidez do solo e a disponibilidade de nutrientes, especialmente no solo abaixo dos 10 cm de profundidade.

Os sistemas de culturas alteraram a distribuição dos atributos da acidez e disponibilidade de nutrientes do solo, com diferenças estatísticas entre si. Entretanto, os níveis de fertilidade do solo foram semelhantes entre os sistemas de culturas, e os atributos da acidez do solo e da disponibilidade de nutrientes são considerados adequados agronomicamente.

O impacto dos sistemas de produção de algodão sobre o carbono orgânico do solo e suas frações foram mais acentuadas no solo da camada superficial (0-5 cm). O sistema plantio direto apresentou maior acúmulo de carbono associado às frações mais grosseiras (associado a areia grossa e areia fina) quando comparado ao preparo convencional. O mesmo comportamento foi observado entre os sistemas de culturas mais diversificados quando comparado ao sistema sob monocultivo.

Os sistemas de culturas mais diversificados (Mt/A, S/M-Mt/A, Mt/A-S/M+B-B/A e B/A-S/C-M+B) apresentaram pouca ou nenhuma diferença em relação aos indicadores da qualidade do solo (EC, REC e IMC), mas diferiram do sistema sob monocultivo (P/A). Isso sugere que a inclusão de diferentes plantas no sistema produtivo de algodão no Cerrado apresenta grande capacidade de conservar o carbono orgânico do solo e promover melhorias na qualidade do solo. Aliado a isso, o uso do plantio direto associado a sistemas produtivos mais diversificados permite maior acúmulo de carbono e melhoria na qualidade dos solos argilosos do Cerrado.

A produtividade da soja não foi afetada pelo preparo de solo após onze anos de implantação dos sistemas de produção de algodão no Cerrado. Entretanto, a produtividade da soja respondeu aos sistemas de culturas, sendo superior em relação ao sistema sob monocultivo que apresentou níveis de fertilidade semelhantes aos demais sistemas de culturas. Assim, a fertilidade indicada por parâmetros químicos do solo não garante altas produtividades ao longo do tempo e a qualidade do solo foi responsável por determinar a produtividade da soja.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo dos efeitos dos diferentes sistemas de produção do algodão no Cerrado sobre a qualidade do solo é importante, especialmente, no cenário de produção atual, onde busca-se maiores produtividades de maneira mais sustentável, com menor degradação dos solos. Dessa forma, o entendimento de como o manejo adotado nos diferentes sistemas de produção afetam os atributos químicos, a matéria orgânica e a qualidade do solo é de suma importância, visando auxiliar a tomada de decisão de técnicos e produtores.

Através deste estudo foi possível observar que a utilização de apenas uma espécie de planta de cobertura ou a associação de diferentes culturas tem potencial de melhorar os atributos químicos do solo pela alteração na dinâmica da ciclagem de nutrientes e, principalmente, a qualidade do solo. Em contrapartida, o cultivo de culturas de interesse econômico sob sistema de monocultivo traz prejuízos, especialmente, na qualidade do solo, reduzindo significativamente o rendimento das culturas.

O preparo convencional do solo, apesar de proporcionar condições de fertilidade de solo melhores em um maior volume de solo quando comparado ao plantio direto, promove menor qualidade de solo. O plantio direto, apesar de apresentar melhor qualidade do solo, apresentou algumas limitações de fertilidade do solo em camadas mais subsuperficiais, quando comparado ao preparo convencional do solo. Entretanto, a produtividade da soja não foi afetada pelo preparo de solo, provavelmente devido às condições climáticas favoráveis no ano agrícola da avaliação.

A utilização de maior diversidade de espécies nos sistemas de produção de algodão no Cerrado se mostrou uma estratégia eficiente para melhorar a fertilidade e a qualidade do solo e, conseqüentemente, aumentar a produtividade das culturas, especialmente se cultivadas sob plantio direto. Entretanto, são necessários mais estudos visando avaliar o comportamento das culturas em condições de estresse, como por exemplo, chuvas irregulares e deficiência hídrica. Além disso, estudos avaliando o efeito dos sistemas de produção de algodão sobre a fertilidade do solo, a matéria orgânica e a qualidade do solo em solos de textura arenosa do Cerrado ainda são necessários.

REFERÊNCIAS

- AMADO, T. J. C. et al. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 189–197, mar. 2001.
- ARAUJO, F. F. Disponibilização de fósforo, correção do solo, teores foliares e rendimento de milho após a incorporação de fosfatos e lodo de curtume natural e compostado. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 33, n. 2, p. 355–360, 2011.
- ARUNAKUMARA, K. K. I. U.; WALPOLA, B. C.; YOON, M. H. Aluminum toxicity and tolerance mechanism in cereals and legumes - A review. **Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry**, v. 56, n. 1, p. 1–9, 28 fev. 2013.
- ASHWORTH, A. J. et al. Earthworm populations are affected from long-term crop sequences and bio-covers under no-tillage. **Pedobiologia**, v. 60, p. 27–33, 1 jan. 2017.
- BATLLE-BAYER, L.; BATJES, N. H.; BINDRABAN, P. S. Changes in organic carbon stocks upon land use conversion in the Brazilian Cerrado: A review. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 137, n. 1–2, p. 47–58, 2010.
- BAYER, C. et al. Changes in Soil Organic Matter Fractions under Subtropical No-Till Cropping Systems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 5, p. 1473–1478, 1 set. 2001.
- BAYER, C. et al. 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.
- BAYER, C. et al. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil and Tillage Research**, v. 86, n. 2, p. 237–245, 1 abr. 2006.
- BAYER, C.; BERTOL, I. Características químicas de um cambissolo húmico afetadas por sistemas de preparo, com ênfase à matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p. 687–694, set. 1999.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO₂. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 3, p. 599–607, set. 2000.
- BERGER, P. G.; LIMA, T. C.; OLIVEIRA, R. **Algodão no cerrado: logística e operações práticas: do planejamento agrícola à aplicação de reguladores de crescimento**. 38. ed., v. 1, 2019.
- BHATT, R. Zero tillage for mitigating global warming consequences and improving livelihoods in South Asia. **Environmental Sustainability and Climate Change Adaptation Strategies**, p. 126–161, 2016.

- BINNER, I.; DULTZ, S.; SCHENK, M. K. Phosphorus buffering capacity of substrate clays and its significance for plant cultivation. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 178, n. 1, p. 155–164, 1 fev. 2015.
- BLAIR, G. J.; LEFROY, R. D.; LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 46, n. 7, p. 1459–1466, 1995.
- BORTOLUZZI, E. C. et al. Occurrence of iron and aluminum sesquioxides and their implications for the P sorption in subtropical soils. **Applied Clay Science**, v. 104, p. 196–204, 2015.
- BURDON, J. Are the traditional concepts of the structures of humic substances realistic? **Soil Science**, v. 166, n. 11, p. 752–769, nov. 2001.
- BUSARI, M. A. et al. Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 3, n. 2, p. 119–129, 2015.
- BUSTAMANTE, M. M. C. et al. Os impactos potenciais das mudanças climáticas no funcionamento biogeoquímico dos ecossistemas de cerrado. **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, n. 3 SUPPL., p. 655–671, 2012.
- CALEGARI, A. et al. Long-term effect of different soil management systems and winter crops on soil acidity and vertical distribution of nutrients in a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 133, p. 32–39, 1 out. 2013.
- CALONEGO, J. C. et al. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. **European Journal of Agronomy**, v. 85, p. 31–37, 2017.
- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 3, p. 777–783, maio 1992.
- CAMPBELL, C. A. et al. Effect of crop rotation, fertilizer and tillage management on spring wheat grain yield and N and P content in a thin Black Chernozem: A long-term study. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 91, n. 3, p. 467–483, 2011.
- CARVALHO, J. L. N. et al. Changes of chemical properties in an oxisol after clearing of native Cerrado vegetation for agricultural use in Vilhena, Rondonia State, Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 96, n. 1–2, p. 95–102, 1 out. 2007.
- CARVALHO, J. L. N. et al. Conversion of cerrado into agricultural land in the south-western Amazon: carbon stocks and soil fertility. **Scientia Agricola**, v. 66, n. 2, p. 233–241, 2009.
- CAUSARANO, H. J. et al. Soil Organic Carbon Sequestration in Cotton Production Systems of the Southeastern United States. **Journal of Environmental Quality**, v. 35, n. 4, p. 1374–1383, jul. 2006.

CAUSARANO, H. J. et al. Soil Organic Carbon Fractions and Aggregation in the Southern Piedmont and Coastal Plain. **Soil Science Society of America Journal**, v. 72, n. 1, p. 221–230, jan. 2008.

CHAVARRÍA, D. N. et al. Effect of cover crops on microbial community structure and related enzyme activities and macronutrient availability. **European Journal of Soil Biology**, v. 76, p. 74–82, 1 set. 2016.

CHEN, S. et al. Spatial and temporal changes of soil properties and soil fertility evaluation in a large grain-production area of subtropical plain, China. **Geoderma**, v. 357, p. 1–13, 1 jan. 2020.

CHRISTENSEN, B. T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. **European Journal of Soil Science**, v. 52, n. 3, p. 345–353, 1 set. 2001.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2018/19 - Sétimo levantamento**. v. 6, 2019.

CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/>>. Acesso em: 25 jun. 2020.

CONCEIÇÃO, P. C. et al. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 5, p. 777–788, set. 2005.

CONCEIÇÃO, P. C.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Combined role of no-tillage and cropping systems in soil carbon stocks and stabilization. **Soil and Tillage Research**, v. 129, p. 40–47, 2013.

CORBEELS, M. et al. Soil carbon storage potential of direct seeding mulch-based cropping systems in the Cerrados of Brazil. **Global Change Biology**, v. 12, n. 9, p. 1773–1787, 2006.

CORBEELS, M. et al. Evidence of limited carbon sequestration in soils under no-tillage systems in the Cerrado of Brazil. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 1–8, 24 fev. 2016.

COSTA, F. D. S. et al. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 323–332, jan. 2008.

COTRUFO, M. F. et al. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. **Nature Geoscience**, v. 8, n. 10, p. 776–779, 1 out. 2015.

CQFS-RS/SC. Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Frederico Westphalen, 2016.

CRUSCIOL, C. A. C. et al. Improving Soil Fertility and Crop Yield in a Tropical Region with Palisadegrass Cover Crops. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 6, p. 2271–2280, 1 nov. 2015.

- CUI, H. et al. The combined effects of cover crops and symbiotic microbes on phosphatase gene and organic phosphorus hydrolysis in subtropical orchard soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 82, p. 119–126, 1 mar. 2015.
- DIAS, F. P. M. et al. Effects of land-use change on chemical attributes of a Ferralsol in Brazilian Cerrado. **Catena**, v. 177, p. 180–188, 1 jun. 2019.
- DIECKOW, J. et al. Land use, tillage, texture and organic matter stock and composition in tropical and subtropical Brazilian soils. **European Journal of Soil Science**, v. 60, n. 2, p. 240–249, 13 mar. 2009.
- DIEKOW, J. et al. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilisation. **Plant and Soil**, v. 268, n. 1, p. 319–328, jan. 2005.
- ECHART, C. L.; CAVALLI-MOLINA, S. Fitotoxicidade do alumínio: efeitos, mecanismo de tolerância e seu controle genético. **Ciência Rural**, v. 31, n. 3, p. 531–541, jun. 2001.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. 2018.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; BAILEY, B. A. Role of cover crops in improving soil and row crop productivity. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 36, n. 19–20, p. 2733–2757, out. 2005.
- FANG, X. et al. Soil organic carbon distribution in relation to land use and its storage in a small watershed of the Loess Plateau, China. **Catena**, v. 88, n. 1, p. 6–13, 2012.
- FERREIRA, A. C. DE B. et al. Soil carbon accumulation in cotton production systems in the Brazilian cerrado. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 42, 2020.
- FERREIRA, A. DE O. et al. Relação de estratificação como indicador do sequestro de carbono em macroagregados de Latossolo sob plantio direto. **Ciencia Rural**, v. 42, n. 4, p. 645–652, 2012.
- FERREIRA, A. DE O. et al. Soil carbon stratification affected by long-term tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 133, p. 65–74, 2013.
- FERREIRA, A. DE O. et al. Driving factors of soil carbon accumulation in Oxisols in long-term no-till systems of South Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 622–623, p. 735–742, 1 maio 2018.
- FERREIRA, D. F. SISVAR: um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Científica Symposium**, v. 6, n. 2, p. 36–41, 2008.
- FINK, J. R. et al. Phosphorus adsorption and desorption in undisturbed samples from subtropical soils under conventional tillage or no-tillage. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 179, n. 2, p. 198–205, 1 abr. 2016.

FRANCHINI, J. C. et al. Root growth of soybean cultivars under different water availability conditions. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, n. 2, p. 715–724, 2017.

FRANZLUEBBERS, A. J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. **Soil and Tillage Research**, v. 66, n. 2, p. 95–106, 2002.

FRANZLUEBBERS, A. J. Achieving Soil Organic Carbon Sequestration with Conservation Agricultural Systems in the Southeastern United States. **Soil Science Society of America Journal**, v. 74, n. 2, p. 347–357, 2010.

GARCIA, R. A. et al. Potassium cycling in a corn-brachiaria cropping system. **European Journal of Agronomy**, v. 28, n. 4, p. 579–585, 1 maio 2008.

GARCIA, R. A.; LI, Y.; ROSOLEM, C. A. Soil organic matter and physical attributes affected by crop rotation under no-till. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 5, p. 1724–1731, 1 set. 2013.

GERAEI, D. S. et al. Total and labile forms of soil organic carbon as affected by land use change in southwestern Iran. **Geoderma Regional**, v. 7, n. 1, p. 29–37, 2016.

GMACH, M. R. et al. Soil organic matter dynamics and land-use change on Oxisols in the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 14, p. e00178, 2018.

GOEDERT, W. J. Management of the Cerrado soils of Brazil: a review. **Journal of Soil Science**, v. 34, n. 3, p. 405–428, 1 set. 1983.

HAN, L. et al. Some concepts of soil organic carbon characteristics and mineral interaction from a review of literature. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 94, p. 107–121, 2016.

HARIDASAN, M. Nutritional adaptations of native plants of the cerrado biome in acid soils. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 20, n. 3, p. 183–195, 2008.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 79, n. 1, p. 9–16, 1 jun. 2000.

JORIS, H. A. W. et al. Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system. **Plant and Soil**, v. 365, n. 1–2, p. 409–424, abr. 2013.

JORIS, H. A. W. et al. Liming in the conversion from degraded pastureland to a no-till cropping system in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 162, p. 68–77, 1 set. 2016.

KAMINSKI, J. et al. Potassium availability in a hapludalf soil under long term fertilization. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 783–791, jun. 2010.

KELLEY, K. W.; LONG, J. H.; TODD, T. C. Long-term crop rotations affect soybean yield, seed weight, and soil chemical properties. **Field Crops Research**, v. 83, n. 1, p. 41–50, 20 jun. 2003.

- KLEBER, M. et al. Old and stable soil organic matter is not necessarily chemically recalcitrant: implications for modeling concepts and temperature sensitivity. **Global Change Biology**, v. 17, n. 2, p. 1097–1107, 1 fev. 2011.
- KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. Conservation of the Brazilian Cerrado. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p. 707–713, 2005.
- KOZOVITS, A. R. et al. Nutrient resorption and patterns of litter production and decomposition in a Neotropical Savanna. **Functional Ecology**, v. 21, n. 6, p. 1034–1043, 2007.
- KRULL, E. S.; BALDOCK, J. A.; SKJEMSTAD, J. O. Importance of mechanisms and processes of the stabilisation of soil organic matter for modelling carbon turnover. **Functional Plant Biology**, v. 30, n. 2, p. 207–222, 2003.
- KRUSE, J. et al. Innovative methods in soil phosphorus research: A review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 178, n. 1, p. 43–88, 1 fev. 2015.
- LEHMANN, J.; KLEBER, M. The contentious nature of soil organic matter. **Nature**, v. 528, n. 7580, p. 60–68, 3 dez. 2015.
- LI, H. et al. Dynamics of phosphorus fractions in the rhizosphere of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and durum wheat (*Triticum turgidum durum* L.) grown in monocropping and intercropping systems. **Plant and Soil**, v. 312, n. 1–2, p. 139–150, 21 nov. 2008.
- LÜTZOW, M. V. et al. Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions - A review. **European Journal of Soil Science**, v. 57, n. 4, p. 426–445, 2006.
- MALLARINO, A. P.; BORGES, R. Phosphorus and Potassium Distribution in Soil Following Long-Term Deep-Band Fertilization in Different Tillage Systems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 2, p. 702–707, 1 mar. 2006.
- MALTAS, A. et al. Long-term effects of continuous direct seeding mulch-based cropping systems on soil nitrogen supply in the Cerrado region of Brazil. **Plant and Soil**, v. 298, n. 1–2, p. 161–173, 2007.
- MARCELO, A. V.; CORÁ, J. E.; FERNANDES, C. Sequências de culturas em sistema de semeadura direta. I - Produção de matéria seca e acúmulo de nutrientes. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 36, n. 5, p. 1553–1567, out. 2012.
- MARCHÃO, R. L. et al. Carbon and nitrogen stocks in a Brazilian clayey Oxisol: 13-year effects of integrated crop-livestock management systems. **Soil and Tillage Research**, v. 103, n. 2, p. 442–450, 2009.
- MARTINELLI, L. A. et al. Agriculture in Brazil: Impacts, costs, and opportunities for a sustainable future. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 2, n. 5–6, p. 431–438, 1 dez. 2010.

- MARTÍNEZ, I. et al. Two decades of no-till in the Oberacker long-term field experiment: Part I. Crop yield, soil organic carbon and nutrient distribution in the soil profile. **Soil and Tillage Research**, v. 163, p. 141–151, 1 nov. 2016.
- MAZZONCINI, M. et al. Soil carbon and nitrogen changes after 28 years of no-tillage management under Mediterranean conditions. **European Journal of Agronomy**, v. 77, p. 156–165, 2016.
- MOTOMIYA, A. V. A. et al. Spatial variability of soil properties and cotton yield in the Brazilian cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 10, p. 996–1003, 2011.
- MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, v. 27, n. C, p. 31–36, 1 jan. 1962.
- NASCENTE, A. S.; CRUSCIOL, C. A. C. Cover crops and herbicide timing management on soybean yield under no-tillage system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 2, p. 187–192, fev. 2012.
- NASCENTE, A. S.; LI, Y. C.; CRUSCIOL, C. A. C. Cover crops and no-till effects on physical fractions of soil organic matter. **Soil and Tillage Research**, v. 130, p. 52–57, 2013.
- NASCENTE, A. S.; STONE, L. F. Cover Crops as Affecting Soil Chemical and Physical Properties and Development of Upland Rice and Soybean Cultivated in Rotation. **Rice Science**, v. 25, n. 6, p. 340–349, 1 nov. 2018.
- NUNES, M. R. et al. Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 148, p. 119–126, 2015.
- PARTON, W. J.; RASMUSSEN, P. E. Long-term effects of crop management in wheat-fallow: II. CENTURY Model Simulations. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 2, p. 530–536, mar. 1994.
- POEPLAU, C. et al. Isolating organic carbon fractions with varying turnover rates in temperate agricultural soils – A comprehensive method comparison. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 125, p. 10–26, 1 out. 2018.
- PRAGANA, R. B. et al. 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, maio 2012.
- PRASAD, J. V. N. S. et al. Effect of ten years of reduced tillage and recycling of organic matter on crop yields, soil organic carbon and its fractions in Alfisols of semi arid tropics of southern India. **Soil and Tillage Research**, v. 156, p. 131–139, 2016.
- RABBI, S. M. F. et al. Soil organic carbon mineralization rates in aggregates under contrasting land uses. **Geoderma**, v. 216, p. 10–18, 2014.
- RAPHAEL, J. P. A. et al. Soil organic matter in crop rotations under no-till. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 45–53, 2016.

RHEINHEIMER, D. D. S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 36, n. 1, p. 151–160, jan. 2001.

RHEINHEIMER, D. S. et al. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 4, p. 797–805, dez. 2000.

ROSOLEM, C. A.; CALONEGO, J. C. Phosphorus and potassium budget in the soil–plant system in crop rotations under no-till. **Soil and Tillage Research**, v. 126, p. 127–133, 1 jan. 2013.

SÁ, J. C. D. M. et al. Long-term tillage systems impacts on soil C dynamics, soil resilience and agronomic productivity of a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 136, n. 2014, p. 38–50, 2014.

SÁ, J. C. D. M. et al. Carbon depletion by plowing and its restoration by no-till cropping systems in Oxisols of subtropical and tropical agro-ecoregions in Brazil. **Land Degradation & Development**, v. 26, n. 6, p. 531–543, 1 ago. 2015.

SÁ, J. C. DE M. et al. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 5, p. 1486–1499, 2001.

SÁ, J. C. DE M.; LAL, R. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 103, n. 1, p. 46–56, 1 abr. 2009.

SALTON, J. C. et al. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 190, p. 70–79, 1 jun. 2014.

SALVO, L.; HERNÁNDEZ, J.; ERNST, O. Distribution of soil organic carbon in different size fractions, under pasture and crop rotations with conventional tillage and no-till systems. **Soil and Tillage Research**, v. 109, n. 2, p. 116–122, 1 ago. 2010.

SANO, E. E. et al. Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 166, n. 1–4, p. 113–124, jul. 2010.

SEQUEIRA, C. H.; ALLEY, M. M.; JONES, B. P. Evaluation of potentially labile soil organic carbon and nitrogen fractionation procedures. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, n. 2, p. 438–444, 2011.

SILVA, D. J.; ALVAREZ VENEGAS, V. H.; RUIZ, H. A. Sulphur transport toward soybean roots in three soils from Minas Gerais State, Brazil. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 37, n. 8, p. 1161–1167, 2002.

SIQUEIRA NETO, M. et al. Rotação de culturas no sistema plantio direto em Tibagi (PR). I - Sequestro de carbono no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 1013–1022, jul. 2009.

SIQUEIRA NETO, M. et al. Soil carbon stocks under no-tillage mulch-based cropping systems in the Brazilian Cerrado: An on-farm synchronic assessment. **Soil and Tillage Research**, v. 110, n. 1, p. 187–195, 1 set. 2010.

SISTI, C. P. J. et al. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 76, n. 1, p. 39–58, 1 mar. 2004.

SOLLINS, P.; HOMANN, P.; CALDWELL, B. A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. **Geoderma**, v. 74, p. 65–105, 1996.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed., 2004.

SRINIVASARAO, C. et al. Potassium release characteristics, potassium balance, and finger millet (*Eleusine coracana* G.) yield sustainability in a 27- year long experiment on an Alfisol in the semi-arid tropical India. **Plant and Soil**, v. 374, n. 1–2, p. 315–330, 31 ago. 2014.

TARIQ, M. et al. Relationship of tissue potassium content with yield and fiber quality components of Bt cotton as influenced by potassium application methods. **Field Crops Research**, v. 229, p. 37–43, 1 dez. 2018.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros minerais**. 2. ed., 1995.

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed., 2017.

TELES, A. P. B. et al. Do cover crops change the lability of phosphorus in a clayey subtropical soil under different phosphate fertilizers? **Soil Use and Management**, v. 33, n. 1, p. 34–44, 1 mar. 2017.

TIAN, J. et al. Integrated management systems and N fertilization: Effect on soil organic matter in rice-rapeseed rotation. **Plant and Soil**, v. 372, n. 1–2, p. 53–63, 18 nov. 2013.

TIECHER, T. et al. Forms of inorganic phosphorus in soil under different long term soil tillage systems and winter crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 271–282, fev. 2012.

TIECHER, T. et al. Soil fertility and nutrient budget after 23-years of different soil tillage systems and winter cover crops in a subtropical Oxisol. **Geoderma**, 2017.

TIECHER, T.; DOS SANTOS, D. R.; CALEGARI, A. Soil organic phosphorus forms under different soil management systems and winter crops, in a long term experiment. **Soil and Tillage Research**, v. 124, p. 57–67, 2012.

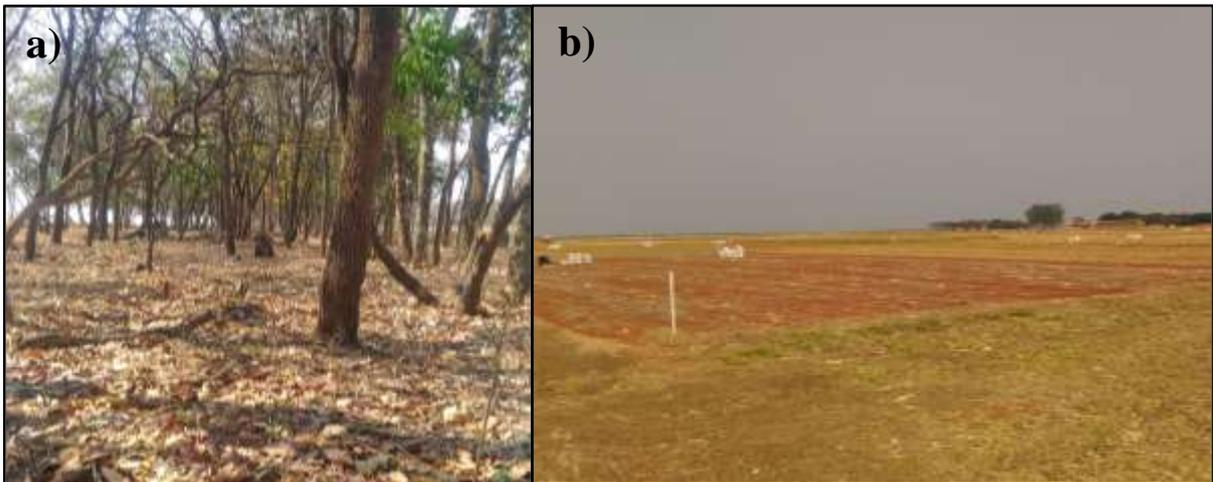
TIRITAN, C. S. et al. Tillage system and lime application in a tropical region: Soil chemical fertility and corn yield in succession to degraded pastures. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 437–447, 1 jan. 2016.

TIVET, F. et al. Soil organic carbon fraction losses upon continuous plow-based tillage and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in sub-tropical and tropical regions of Brazil. **Geoderma**, v. 209–210, n. 2013, p. 214–225, 2013.

- USSIRI, D. A. N.; LAL, R. Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an alfisol in Ohio. **Soil and Tillage Research**, v. 104, n. 1, p. 39–47, 2009.
- VERONESE, M. et al. Plantas de cobertura e calagem na implantação do sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 8, p. 1158–1165, 2012.
- VIEIRA, F. C. B. et al. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems. **Soil and Tillage Research**, v. 96, n. 1–2, p. 195–204, 1 out. 2007.
- VINHAL-FREITAS, I. C. et al. Influence of Phosphorus and Carbon on Soil Microbial Activity in a Savannah Agroecosystem of Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 43, n. 9, p. 1291–1302, 2012.
- VINHAL-FREITAS, I. C. et al. Land use impact on microbial and biochemical indicators in agroecosystems of the Brazilian Cerrado. **Vadose Zone Journal**, v. 12, n. 1, p. vzt2012.0027, 2013.
- VIRTO, I.; BARRÉ, P.; CHENU, C. Microaggregation and organic matter storage at the silt-size scale. **Geoderma**, v. 146, n. 1–2, p. 326–335, 31 jul. 2008.
- WANG, X. et al. Soil aggregation and the stabilization of organic carbon as affected by erosion and deposition. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 72, p. 55–65, 2014.
- WEIHRAUCH, C.; OPP, C. Ecologically relevant phosphorus pools in soils and their dynamics: The story so far. **Geoderma**, v. 325, p. 183–194, 1 set. 2018.
- WEIL, R. R. et al. Estimating active carbon for soil quality assessment : A simplified method for laboratory and field use. **American Journal of Alternative Agriculture**, v. 18, p. 3–17, 2003.
- WRIGHT, A. L. et al. Microbial activity and soil C sequestration for reduced and conventional tillage cotton. **Applied Soil Ecology**, v. 38, n. 2, p. 168–173, 1 fev. 2008.
- WRIGHT, A. L.; HONS, F. M.; MATOCHA, J. E. Tillage impacts on microbial biomass and soil carbon and nitrogen dynamics of corn and cotton rotations. **Applied Soil Ecology**, v. 29, n. 1, p. 85–92, 1 maio 2005.
- ZOTARELLI, L. et al. Impact of tillage and crop rotation on light fraction and intra-aggregate soil organic matter in two Oxisols. **Soil and Tillage Research**, v. 95, n. 1–2, p. 196–206, 2007.
- ZUBER, S. M. et al. Crop rotation and tillage effects on soil physical and chemical properties in Illinois. **Agronomy Journal**, v. 107, n. 3, p. 971–978, 2015.

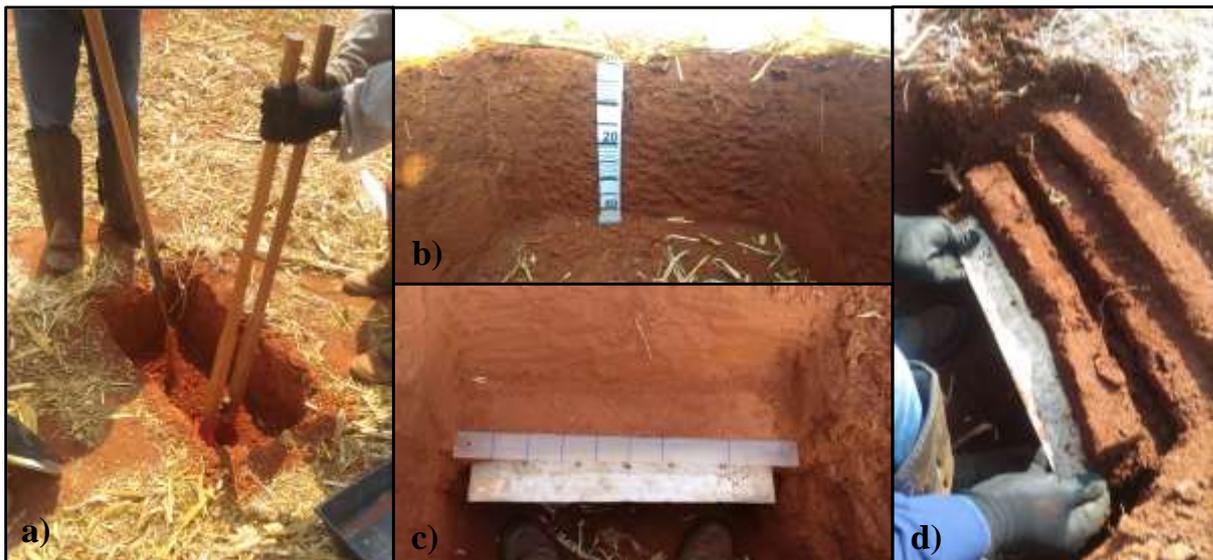
APÊNDICE A – IMAGENS DA ÁREA EXPERIMENTAL E DA COLETA DAS AMOSTRAS DE SOLO

Visão geral da área de vegetação natural (a) e visão parcial de parcela do experimento (b) localizado no município de Itiquira – MT.



Fonte: Arquivo pessoal

Abertura de trincheira (a), detalhe do perfil do solo na profundidade de amostragem (b), coleta de amostras de solo deformado e estratificado em camadas (figuras c e d) de um Latossolo localizado no município de Itiquira - MT.



Fonte: arquivo pessoal

APÊNDICE C – DENSIDADE DO SOLO

Densidade do solo avaliada no solo das camadas 0-5 e 5-20 cm de um Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de culturas (Mt/A = Milheto/Algodão; S/M-Mt/A = Soja/Milho-Milheto/Algodão; Mt/A-S/M+B-B/A = Milheto/Algodão-Soja/Milho+Braquiária-Braquiária/Algodão; B/A-S/C-M+B = Braquiária/Algodão-Soja/Crotalária-Milho+Braquiária) e preparos de solo (preparo convencional e plantio direto), e em área sob vegetação natural do Cerrado localizado em Itiquira - MT.

Camada de solo	0-5 cm	5-20 cm
Sistemas de culturas	----- Preparo convencional -----	
P/A	1,11	1,22
Mt/A	1,06	1,18
S/M-Mt/A	1,12	1,22
Mt/A-S/M+B-B/A	1,07	1,20
B/A-S/C-M+B	1,07	1,18
	----- Plantio direto -----	
P/A	1,13	1,17
Mt/A	1,03	1,23
S/M-Mt/A	1,03	1,22
Mt/A-S/M+B-B/A	1,05	1,19
B/A-S/C-M+B	1,00	1,24
Vegetação natural	1,06	1,15

APÊNDICE D – TABELA DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

Significância dos efeitos dos fatores experimentais e suas interações sobre os atributos químicos do solo após análise de variância (ANOVA).

Variável ¹	Sistemas de culturas (S)	Preparos de solo (P)	Camadas de solo (C)	SxP	SxC	PxC	SxPxC
pH do solo	ns ²	**	ns	***	**	***	**
Alumínio trocável	ns	*	ns	***	ns	***	ns
Saturação por Alumínio	ns	*	ns	***	ns	**	ns
Acidez potencial	*	***	ns	***	***	***	ns
Fósforo disponível	***	**	ns	***	***	***	***
Potássio disponível	***	**	*	***	***	**	**
Cálcio trocável	ns	**	*	***	***	***	***
Mg trocável	***	**	**	***	***	***	***
Saturação por bases	**	***	ns	***	***	***	***
CTC _{pH7,0}	**	**	ns	***	*	**	**
Matéria orgânica do solo	***	**	ns	***	***	***	**
Carbono orgânico total	***	***	***	ns	***	***	***
COAG	***	**	**	ns	***	***	***
COAF	*	ns	***	ns	***	***	***
COAM	***	ns	***	ns	*	***	ns
Estoque de COT	***	ns	—	ns	—	—	—
Estoque de COAG	***	**	—	ns	—	—	—
Estoque de COAF	ns	ns	—	ns	—	—	—
Estoque de COAM	***	ns	—	ns	—	—	—
Razão de estratificação do carbono (REC)	***	**	—	*	—	—	—
Índice de manejo do carbono (IMC)	**	*	—	ns	—	—	—
Produtividade da soja	***	ns	—	ns	—	—	—

¹ CTC pH7 = capacidade de troca de cátions em pH 7; COAG = carbono orgânico associado a areia grossa; COAF = carbono orgânico associado a areia fina; COAM = carbono orgânico associado aos minerais. ² ns, não significativo; * Significativo a $p < 0,05$; ** Significativo a $p < 0,01$; *** Significativo a $p < 0,001$.

ANEXO A – INTERPRETAÇÃO AGRONÔMICA DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

Interpretação agronômica do pH do solo, saturação por bases (V), saturação por alumínio (*m*), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) trocáveis, fósforo (P) e potássio (K) disponíveis para os solos do Cerrado na profundidade de 0-20 cm (adaptado de Souza e Lobato, 2004).

Interpretação agronômica	pH do solo ¹	V	<i>m</i>	Ca trocável	Mg trocável	P disponível ²	K disponível ³
	-	%		cmol _c dm ⁻³		mg dm ⁻³	
Muito baixo	–	–	–	–	–	0–2,0	–
Baixo	≤ 5,1	≤ 20	< 20	< 1,5	< 0,5	2,1–3,0	≤ 25
Médio	5,2–5,5	21–35	–	–	–	3,1–4,0	26–50
Adequado	5,6–6,3	36–60	–	1,5–7,0	0,5–2,0	4,1–6,0	51–80
Alto	6,4–6,6	61–70	20–60	> 7,0	> 2,0	> 6,0	> 80
Muito alto	≥ 6,7	≥ 71	> 60	–	–	–	–

¹pH em água proporção solo:água 1:2,5. ² Fósforo extraído por Mehlich-1; valores de referência para solos com teor de argila maior que 60% e cultivados em sistema de sequeiro. ³ Potássio extraído por Mehlich-1; valores de referência para solos com CTC pH_{7,0} maiores que 7,0 cmol_c dm⁻³.