

UFRRJ

**INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGRONOMIA – CIÊNCIA DO SOLO**

DISSERTAÇÃO

**Atributos Edáficos na Avaliação da Qualidade das
Terras sob Diferentes Sistemas de Uso e Manejo no
Cerrado Goiano**

**Antonino José Jacques Gambôa Fernandez de
Oliveira Netto**

2024



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

**ATRIBUTOS EDÁFICO NA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS
TERRAS SOB DIFERENTES SISTEMAS DE USO E MANEJO NO
CERRADO GOIANO**

**ANTONINO JOSÉ JACQUES GAMBÔA FERNANDEZ DE
OLIVEIRA NETTO**

*Sob a Orientação do Professor
Marcos Gervasio Pereira*

*E Coorientação do Professor
Emerson Trogello*

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre**, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, área de Concentração em Manejo do Solo e Qualidade Ambiental.

Seropédica, RJ
Março de 2024

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
Com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

N472a Netto, Antonino José Jacques Gambôa Fernandez de Oliveira, 1998-
Acúmulo e persistência de carbono e nitrogênio no solo em experimentos com
diferentes sistemas de manejo / Antonino José Jacques Gambôa Fernandez de
Oliveira Netto. – Seropédica, 2024.
54 f.: il.

Orientador: Marcos Gervasio Pereira.
Mestrado (Dissertação). – – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro,
Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Ciência do Solo, 2024.

1. Carbono orgânico. 2. Formas de uso da terra. 3. Conservação do solo. 4.
Fertilidade do solo. 5. Frações orgânicas. I. Pereira, Marcos Gervasio, 1965-,
orient. II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Agronomia - Ciência do
Solo. III. Título.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001; do Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade (IABS), Projeto Rural Sustentável Cerrado (PRS Cerrado) e da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ).

É permitida a cópia parcial ou total desta Dissertação, desde que seja citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA (CIÊNCIAS DO SOLO)



**HOMOLOGAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 12 / 2024 - CPGACS
(12.28.01.00.00.00.27)**

Nº do Protocolo: 23083.011644/2024-31

Seropédica-RJ, 05 de março de 2024.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA - CIÊNCIA DO SOLO**

ANTONINO JOSÉ JACQUES GAMBÔA FERNANDEZ DE OLIVEIRA NETTO

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre**, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo, Área de Concentração em Manejo do Solo e Qualidade e Ambiental.

TESE APROVADA EM 05/02/2024.

Marcos Gervasio Pereira

(Orientador)

Nivaldo Schultz

David Vilas Boas de Campos

(Assinado digitalmente em 05/03/2024 16:50)
MARCOS GERVASIO PEREIRA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptS (12.28.01.00.00.00.33)
Matrícula: 1060711

(Assinado digitalmente em 12/03/2024 10:54)
NIVALDO SCHULTZ
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptS (12.28.01.00.00.00.33)
Matrícula: 2136627

(Assinado digitalmente em 06/03/2024 07:52)
DAVID VILAS BOAS DE CAMPOS
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 030.175.957-06

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/public/documentos/index.jsp>
informando seu número: **12**, ano: **2024**, tipo: **HOMOLOGAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**, data de emissão: **05/03/2024** e o código de verificação: **e6d5902f5f**

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais Adelino e Ana Márcia,
Ao meu irmão Adelino,
À minha companheira Maria Clara Pfeiffer e
Aos meus amigos.*

Dedico.

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial à minha mãe Ana Márcia Jacques Gambôa que sempre me incentivou a seguir meu coração, assim como meu irmão Adelino José Jacques Gambôa Fernandez de Oliveira Netto, estes que sempre me apoiaram em diversos momentos e mesmo de longe ajudaram a alcançar meus objetivos. Também dedico este agradecimento ao meu saudoso pai, Adelino José Fernandez de Oliveira Netto, cujo espírito permanece vivo em mim, sempre me dando forças para enfrentar as etapas da vida.

Expresso minha gratidão ao meu orientador Marcos Gervasio Pereira por sua valiosa contribuição no desenvolvimento deste trabalho e no meu crescimento tanto profissional quanto pessoal. Agradeço o afeto, paciência, disponibilidade constante para ajudar, confiança, respeito e até mesmo pelas críticas construtivas que, sem dúvida, me fizeram crescer, amadurecer e crer em mim quando nem eu mesmo acreditava. Sem sombra de dúvidas, você é uma das minhas maiores inspirações profissionais.

Ao Lucas Fagundes pelo auxílio nas análises laboratoriais.

À minha companheira Maria Clara Pfeiffer, agradeço por compreender as distâncias que a vida acadêmica nos impôs. Seu apoio constante e companhia nos momentos de estudos e dificuldades tornaram esta jornada menos árdua.

Um agradecimento especial aos meus queridos amigos de laboratório Hugo Fagundes, Otavio Augusto, Tiago Paula e Luiz Alberto. A amizade de vocês, cumplicidade, confiança e orientações foram inestimáveis. Aprendi e continuo aprendendo muito com cada um de vocês. Também não posso deixar de mencionar meu amigo João Guedes Borré, que compartilhou comigo estes dois anos de pós-graduação.

A todos professores e palestrantes que cruzaram meu caminho neste período, minha profunda gratidão por terem contribuído significativamente para meu desenvolvimento profissional.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, expresso minha gratidão por ter sido não apenas uma instituição de ensino, mas um lar que me permitiu conhecer pessoas notáveis e profissionais excepcionais, enriquecendo minha jornada acadêmica e pessoal.

Não posso deixar de mencionar os órgãos de fomento FAPERJ, IABS e PRS Cerrado pelos recursos concedidos que viabilizaram meu mestrado. Sou profundamente grato por todo apoio financeiro e institucional recebido.

Em especial, gostaria de agradecer à toda equipe do PRS Cerrado, instituto que financiou o projeto. A liderança do professor Emerson Trogello foram fundamentais para o ponta pé inicial e desenvolvimento deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo (PPGA-CS/UFRRJ), agradeço o suporte fundamental. Aos professores, orientadores, colegas e funcionários do programa, meu reconhecimento pelo ambiente que contribuiu para meu crescimento.

Aos colegas do Laboratório de Gênese e Classificação do Solo, assim como a todos os colaboradores do Departamento de Solos e do Instituto de Agronomia, minha gratidão pela troca de conhecimentos e pela atmosfera colaborativa.

Por fim, agradeço enormemente a todos que, de uma forma ou de outra, contribuíram para minha formação, seja por meio de palavras de apoio, críticas construtivas ou experiências compartilhadas. São essas atitudes e vivências que moldaram o jovem do passado em um homem realizado e repleto de sonhos no presente.

Obrigado a todos e todas!

BIOGRAFIA

Antonino José Jacques Gambôa Fernandez de Oliveira Netto, filho de Ana Márcia e Adelino, nasceu na Perinatal de Laranjeiras – RJ no dia 09 de março de 1998. Embora tenha crescido no cenário urbano ao lado de seus pais e irmão mais velho, sempre manteve uma estreita conexão com o ambiente rural desde cedo, o que incitou um profundo apreço pelo contato com o meio ambiente. Essa afinidade inicial o impulsionou a buscar um entendimento mais profundo na área, visando contribuir para a preservação da qualidade ambiental. Motivado a aprimorar seus conhecimentos e adquirir uma base sólida, ingressou no curso de Agronomia na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ, campus Seropédica, no segundo semestre de 2016. Ao longo de sua graduação teve a oportunidade de adquirir valiosas ligações científicas, destacando-se o período em que estagiou na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA Solos, durante o período de um ano, entre 2020 e 2021. Posteriormente, ele integrou a equipe do Laboratório de Gênese e Classificação de Solos (LGCS), onde permanece até hoje. Durante esse período desenvolveu grande identidade com trabalhos realizados, proporcionando um avanço substancial em seu desenvolvimento tanto pessoal quanto profissional. Esse período permitiu aprofundar-se especialmente nas áreas relacionadas ao manejo e conservação do solo, matéria orgânica e atributos físicos do solo. No mês de março de 2022, ele deu mais um passo significativo em sua trajetória acadêmica ao ingressar no Mestrado do Programa de Pós-graduação em Agronomia – Ciência do Solo (PPGA-CS/UFRRJ). E, mais recentemente, em março de 2023, sua dedicação e méritos foram reconhecidos com a concessão da Bolsa Nota 10 pela FAPERJ, um feito que enche de orgulho todos aqueles que o conhecem.

RESUMO

NETTO, Antonino José Jacques Gambôa Fernandez de Oliveira. **Atributos edáficos na avaliação da qualidade das terras sob diferentes sistemas de uso e manejo no cerrado goiano.** 2023. 54f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2023.

Diferentes formas de uso da terra podem promover diversas modificações na fertilidade e na dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS), principalmente em condições ambientais e edáficas que favorecem e intensificam as transformações do material orgânico. O objetivo desse estudo foi avaliar o impacto dos diferentes sistemas de uso e manejo das terras nas interações entre os atributos químicos do solo e as frações da MOS em áreas agricultáveis em uma região do Cerrado goiano. O estudo foi desenvolvido em três áreas do bioma, conduzidas sob sistemas de produção diversificados: i) Área BV - monocultivo de soja (MS01); integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF01); pastagem (PA01); e vegetação de Cerrado (VC01); ii) Área ML – monocultivo com sucessão de soja/milho (SSM02); agrofloresta (AF02); pastagem (PA02); e vegetação de Cerrado (VC02); e iii) Área IF – sucessão de soja/milho (SSM03); integração pecuária-floresta (IPF03); pastagem (PA03); e vegetação de Cerrado (VC03). Foram coletadas amostras de terra nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm. As amostras foram secas ao ar, destorreadas e passadas por peneira de 2,00 mm de malha obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA), material utilizado para realização das análises. Em sequência, foram realizadas as análises de caracterização da fertilidade do solo e das diferentes frações da MOS. Os diferentes sistemas de manejo tiveram impacto significativo nos níveis de fertilidade do solo e a variação dos atributos químicos está relacionado principalmente ao manejo da adubação. As frações da MOS foram afetadas de maneira semelhante pelos sistemas de uso do solo, em que a MOL foi a fração mais eficiente em demonstrar a influência dos sistemas de produção diversificada.

Palavras-chave: Carbono orgânico. Formas de uso da terra. Conservação do solo. Fertilidade do solo. Frações orgânicas.

ABSTRACT

NETTO, Antonino José Jacques Gambôa Fernandez de Oliveira. **Edaphic attributes in the evaluation of soil quality under different use and management systems in the Cerrado of Goiás.** 2023. 54p. Dissertation (Master in Agronomy, Soil Science). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2023.

Different forms of land use can promote various changes in the fertility and dynamics of soil organic matter (SOM), especially in environmental and soil conditions that favor and intensify the transformation of organic material. The aim of this study was to assess the impact of different land use and management systems on the interactions between soil chemical attributes and MOS fractions in agricultural areas in the Cerrado region of Goiás. The study was carried out in three areas of the biome, conducted under diversified production systems: 1) Area BV - soybean monocropping (MS01); crop-livestock-forest integration (ILPF01); pasture (PA01); and Cerrado vegetation (VC01); 2) Area ML - monocropping with soybean/maize succession (SSM02); agroforestry (AF02); pasture (PA02); and Cerrado vegetation (VC02); and 3) Area IF - soybean/maize succession (SSM03); livestock-forest integration (IPF03); pasture (PA03); and Cerrado vegetation (VC03). Soil samples were collected from the 0-5, 5-10, 10-20 and 20-40 cm layers. The samples were air-dried, crumbled and passed through a 2.00 mm mesh sieve to obtain fine air-dried soil (TFSA) the material used to carry out the analyses. Next, analyses were carried out to characterize soil fertility and the different fractions of MOS. The different management systems had a significant impact on soil fertility levels and the variation in chemical attributes is mainly related to fertilizer management. The MOS fractions were affected in a similar way by the characteristics of the land use systems, with MOL being the most efficient fraction in demonstrating the influence of diversified production systems.

Keywords: Organic carbon. Forms of land use. Soil conservation. Soil fertility. Organic fractions.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização das três áreas de estudo. Fonte: Elaborado por Ozório J. M. B.	.....	10
Figura 2. Variação da média da precipitação pluvial e da temperatura durante o ano de 2023. Fonte: Dados climáticos obtidos no site climate-data.org. (2023), e elaborado pelo autor.	.....	11
Figura 3. Análises de componentes principais integrando as frações químicas e as frações da matéria orgânica do solo nos diferentes sistemas de uso e manejo do solo na camada de 0-10 cm na área da Fazenda Boa Vereda, região do bioma Cerrado Goiano. pH: Acidez ativa; Ca: Cálcio trocável; Mg: Magnésio trocável; Al: Alumínio (Acidez trocável); H+Al: Acidez potencial; K: Potássio trocável; S: Soma das bases; T: Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: Saturação por bases; P: Fósforo disponível; COT: Carbono orgânico total; COP: Carbono orgânico particulado; COAM: Carbono orgânico associado aos minerais; MOL: Matéria orgânica leve em água; AF: Ácido fúlvico; AH: Ácido húmico; HUM: Humina; ESTC: Estoque de carbono orgânico total; e IMC: Índice de manejo do carbono.	.....	25
Figura 4. Análises de componentes principais integrando as frações químicas e as frações da matéria orgânica do solo nos diferentes sistemas de uso e manejo do solo na camada de 0-10 cm na área da Fazenda Mata do Lobo, região do bioma Cerrado Goiano. pH: Acidez ativa; Ca: Cálcio trocável; Mg: Magnésio trocável; Al: Alumínio (Acidez trocável); H+Al: Acidez potencial; K: Potássio trocável; S: Soma das bases; T: Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: Saturação por bases; P: Fósforo disponível; COT: Carbono orgânico total; COP: Carbono orgânico particulado; COAM: Carbono orgânico associado aos minerais; MOL: Matéria orgânica leve em água; AF: Ácido fúlvico; AH: Ácido húmico; HUM: Humina; ESTC: Estoque de carbono orgânico total; e IMC: Índice de manejo do carbono.	.....	26
Figura 5. Análises de componentes principais integrando as frações químicas e as frações da matéria orgânica do solo nos diferentes sistemas de uso e manejo do solo na camada de 0-10 cm na área do Instituto Federal Goiano, região do bioma Cerrado Goiano. pH: Acidez ativa; Ca: Cálcio trocável; Mg: Magnésio trocável; Al: Alumínio (Acidez trocável); H+Al: Acidez potencial; K: Potássio trocável; S: Soma das bases; T: Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: Saturação por bases; P: Fósforo disponível; COT: Carbono orgânico total; COP: Carbono orgânico particulado; COAM: Carbono orgânico associado aos minerais; MOL: Matéria orgânica leve em água; AF: Ácido fúlvico; AH: Ácido húmico; HUM: Humina; ESTC: Estoque de carbono orgânico total; e IMC: Índice de manejo do carbono.	.....	27

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Distribuição das ordens de solo no bioma Cerrado	5
Tabela 2. Localização das propriedades de estudo e sistemas de uso e ocupação do solo implementados em cada localidade do Cerrado goiano.	12
Tabela 3. Atributos químicos do solo da área BV nos diferentes sistemas de uso e manejo do solo, região do bioma Cerrado goiano.....	20
Tabela 4. Atributos químicos do solo da área ML nos diferentes sistemas de uso e manejo do solo, região do bioma Cerrado goiano.....	21
Tabela 5. Atributos químicos do solo da área IF nos diferentes sistemas de uso e manejo do solo, região do bioma Cerrado goiano.....	22
Tabela 6. Teores de carbono e suas respectivas frações físicas e químicas (g kg^{-1}) nos diferentes sistemas de uso e manejo do solo, região do bioma Cerrado goiano.	29
Tabela 7. Valores de estoque de carbono (Mg ha^{-1}) nos diferentes sistemas de uso e manejo do solo, região do bioma Cerrado Goiano.	29
Tabela 8. Valores da densidade do solo (Ds) (Mg m^{-3}) nos diferentes sistemas de uso e manejo do solo, região do bioma Cerrado goiano.....	30
Tabela 9. Teores de carbono das substâncias húmicas e suas proporções em relação ao carbono orgânico total (COT) (g kg^{-1} e %) nos diferentes sistemas de uso e manejo do solo, região do bioma Cerrado Goiano.....	30
Tabela 10. Índices de manejo da matéria orgânica do solo nos diferentes sistemas de uso e manejo do solo, região do bioma Cerrado Goiano.	32

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. O Bioma Cerrado	4
2.2. Solos do Cerrado.....	4
2.3. Solos de Fertilidade Construída.....	6
2.4. Sistemas Conservacionistas Utilizados no Cerrado.....	7
2.5. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta	7
2.6. Importância da Matéria Orgânica do Solo (MOS).....	8
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	10
3.1. Localização, Clima e Solo das Áreas de Estudo.....	10
3.2. Histórico dos Sistemas das Respectivas Áreas	12
3.3. Caracterização dos Atributos Químicos	13
3.4. Caracterização das Frações da MOS	14
3.4.1. Carbono orgânico total (COT)	14
3.4.2. Estoque de carbono (ESTC).....	14
3.4.3. Fracionamento físico granulométrico da MOS e índice de manejo do carbono (IMC)	14
3.4.4. Fracionamento químico da MOS	15
3.4.5. Fracionamento físico densimétrico da MOS	15
3.4.6. Matéria orgânica leve em água (MOL).....	16
3.5. Análises de Dados.....	16
4. RESULTADOS	17
4.1. Valores de Acidez Ativa (pH em Água).....	17
4.2. Teores dos Cátions Básicos Trocáveis (Ca^{2+} e Mg^{2+})	17
4.3. Teores de Potássio Trocável (K^+)	17
4.4. Valores de Soma de Bases (SB)	18
4.5. Valores de Acidez Trocável (Al^{3+}) e Acidez Potencial ($\text{H}+\text{Al}$)	18
4.6. Teores de Fósforo Disponível (P).....	18
4.7 Saturação por Bases (V%)	19
4.8. Análise Multivariada dos Dados.....	24
4.9. Carbono Orgânico Total, Densidade do Solo e Estoque de Carbono	27
4.10. Fracionamento Físico Granulométrico da MOS	28
4.11. Fracionamento Físico Densimétrico da MOS e Matéria Orgânica Leve em Água	28
4.12. Fracionamento Químico da MOS	28
4.13. Índices de Manejo da MOS	31

5. DISCUSSÃO	33
5.1. Influência dos Sistemas de Produção nos Valores de Acidez Ativa.....	33
5.2. Influência dos sistemas de produção nos teores dos cátions trocáveis	33
5.3. Influência dos sistemas de produção nos valores de potássio trocável.....	34
5.4. Influência dos Sistemas de Produção nos Valores de Acidez Trocável e Acidez Potencial	34
5.5. Influência dos Sistemas de Produção nos Teores de Fósforo Disponível	34
5.6. Saturação por Bases (V%)	35
5.7. Carbono Orgânico Total, Densidade do Solo e Estoque de Carbono	35
5.8. Fracionamento Físico Granulométrico da MOS	36
5.9. Matéria Orgânica Leve em Água (MOL)	37
5.10. Fracionamento Químico da MOS	37
5.11. Índices de Manejo do Carbono	38
5.12. Dissimilaridade entre os Sistemas de Uso e Manejo do solo e as Áreas de Vegetação Típica do Bioma Cerrado.....	39
6. CONCLUSÕES	41
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
9. ANEXOS	53

1. INTRODUÇÃO

O Cerrado representa o segundo maior bioma do país, superado somente pelo Amazônico, abrangendo uma área de aproximadamente 204,7 milhões de hectares, o que equivale a cerca de 25% da área total do país (IBGE, 2004; BEUTLER et al., 2016). Atualmente, o Cerrado representa uma das maiores áreas cultivadas no mundo (LOSS et al., 2019), principalmente relacionada as culturas de grãos (milho, feijão, soja e girassol) (GAZOLLA et al., 2015). O bioma está localizado na região central do Brasil, onde pode-se destacar o estado de Goiás com aproximadamente 97,0% de sua área inserida no bioma (IBGE, 2004; BEUTLER et al., 2016).

Os solos predominantes do Cerrado são os Latossolos, que normalmente possuem textura argilosa e grande espessura dos horizontes, localizados em áreas de relevo que variam de plano a ondulado (RATTER et al., 2003; IBGE, 2004; PEREIRA DE CASTRO et al., 2016; LOSS et al., 2019). Adicionalmente, grande parte é originalmente caracterizada pela baixa fertilidade natural, resultado do longo período em que foram expostos aos agentes intempéricos, o que provocou uma significativa lixiviação dos cátions básicos (LOPES et al., 2016; LIMA et al., 2019).

Apesar dessa baixa fertilidade natural, que inicialmente representava uma forte limitação para o cultivo, a região foi gradualmente transformada em uma área de intensa produção agrícola-pecuária-florestal por meio de diversas técnicas, como: aplicação adequada de corretivos (calagem e gesso), adubação através do uso de fertilizantes, adoção de sistemas plantio direto (SPD) e, mais recentemente, a implementação de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) (LIMA et al., 2019). Adicionalmente, a ocorrência de duas estações bem definidas, uma seca e outra chuvosa, facilitando o planejamento das atividades de plantio e colheita, associado a presença de solos profundos, de boa qualidade física e localizados em condições topográficas que facilitam as operações de mecanização para o preparo das áreas, possibilitaram o avanço da agricultura mecanizada intensiva, colocando o Cerrado como uma das maiores fronteiras agrícolas do Brasil (SIQUEIRA NETO et al., 2009; MAIA et al., 2013).

Atualmente, grande parte da agricultura brasileira está concentrada na região do Cerrado, elevando o Brasil à líder mundial na produção agrícola, destacando-se principalmente nas culturas de café, cana-de-açúcar, milho, soja e produção de carne bovina (LOSS et al., 2016; USDA, 2018). No estado de Goiás, por exemplo, diversas atividades econômicas são desenvolvidas, com destaque para a agropecuária, o que o coloca como a nona maior economia do Brasil (RIBEIRO et al., 2023).

Entretanto, estas características favoráveis à agricultura, favoreceram o avanço desenfreado das práticas de monocultivo e outras técnicas inadequadas, resultando na redução de produtividade e na degradação do solo. Decorrente destas modificações, também verifica-se a diminuição dos teores de matéria orgânica do solo (MOS), o que consequentemente reduz a fertilidade, além de acelerar os processos erosivos (LOSS et al., 2012).

Até a década de 70, a principal utilização das terras do Cerrado eram as pastagens extensivas (LOSS et al., 2012a; 2013). Posteriormente, através de políticas de expansão agrícola e do desenvolvimento de pesquisas que demonstraram que as características químicas dos solos do Cerrado poderiam ser modificadas, permitiu-se um elevado crescimento da ocupação do homem sobre esse espaço (PRADO et al., 2011). Assim, essas áreas foram convertidas para culturas anuais, por meio do sistema de preparo convencional do solo (SPC), utilizando práticas como aração e gradagem. Com a chegada das técnicas conservacionistas, observa-se uma crescente substituição do SPC pelo SPD. Mais recentemente, tem-se a tendência de combinar o SPD com sistemas integrados de produção, destacando-se o sistema de ILPF.

Nas últimas décadas, os SPD e os sistemas integrados vem sendo amplamente adotados no bioma. Ambos os sistemas conservacionistas têm potencial de aumentar os teores e estoques de carbono e de nutrientes nos solos, especialmente através do uso de forrageiras, que aumentam a produção de palhada, principalmente durante a estação seca. A adoção destes resultam no progressivo acúmulo de MOS em comparação ao plantio convencional, o que se traduz em um aumento de fertilidade (CARVALHO et al., 2010; ANGHINONI et al., 2011; LOSS et al., 2012a, 2016, 2019; SANT-ANA et al., 2017).

A agricultura conservacionista é um sistema de produção que se baseia no mínimo revolvimento do solo, na manutenção da cobertura vegetal permanente sobre o solo por meio de plantas vivas ou seus resíduos, e na diversificação de culturas (BAYER et al., 2023). Esses três pilares contribuem para a sustentabilidade da produção, aprimora a biodiversidade do solo, fortalece os processos biológicos naturais e otimiza o uso eficiente da água e nutrientes (FAO, 2022). Nesse contexto, o sistema de ILPF e suas variações, como o sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) ou o sistema de integração pecuária-floresta (IPF), mantêm uma estreita relação com a agricultura conservacionista.

Estes sistemas proporcionam benefícios, tais como: a) aprimoramento das condições físicas, químicas e biológicas do solo; b) aumento na ciclagem e a eficiência da utilização dos nutrientes pelas plantas, resultantes da rotação ou consócio de gramíneas com leguminosas e espécies florestais; c) elevação da competitividade do empreendimento rural, por meio da oferta regular de forragens, grãos e madeiras; e d) diversificação e estabilização da renda na propriedade rural, viabilizando também a recuperação de áreas degradadas com pastagens (GAZOLLA et al., 2015; BERNARDI et al., 2023). Além disso, ao proporcionar elevadas produtividades para as culturas, melhorar a qualidade da forragem para os animais e promover a prestação de serviços ecossistêmicos, como o sequestro de carbono e o reabastecimento de aquíferos, esses sistemas contribuem significativamente para melhoria da qualidade do solo (SALTON et al., 2011; VILELA et al., 2016; BEUTLER et al., 2016; LOSS et al., 2016; BERNARDI et al., 2023).

Diferentes sistemas de uso e manejo da terra exercem influência na qualidade do solo (SILVA et al., 2016; RIBEIRO et al., 2023). A conversão de áreas nativas do bioma em áreas agrícolas pode resultar em alterações nos estoques de carbono (C) do solo. Por exemplo, o monocultivo e uso de outras práticas inadequadas têm provocado redução da produtividade e degradação do solo, com consequente diminuição dos teores de MOS e, por conseguinte, redução da fertilidade (RIBEIRO et al., 2023). Em contrapartida, em áreas de pastagens rotacionadas bem manejadas, os estoques de C podem ser aumentados ao longo do tempo (RIBEIRO et al. 2022). O solo é o maior compartimento terrestre de armazenamento de C, contendo quase quatro vezes mais C do que a vegetação e cerca de 3,3 vezes mais do que a atmosfera (MACHADO et al., 2005; RIBEIRO et al., 2023). Portanto, os sistemas de manejo e uso do solo que promovem a manutenção ou até mesmo o aumento do C do solo são cruciais para preservar a qualidade do solo.

Essa qualidade do solo é mensurada através do uso de indicadores, que são atributos que medem ou refletem o estado ambiental ou a condição de sustentabilidade do ecossistema. A MOS destaca-se como um indicador-chave na determinação da qualidade e saúde do solo (BERNARDI et al., 2023; FAO-ITPS, 2020). A MOS desempenha um papel crucial na regulação do conteúdo de água e ar do solo, influenciando sua temperatura e participando ativamente nas reações de trocas iônicas que condicionam o nível de fertilidade do solo (BLUM et al., 2018). A análise dos efeitos dos diferentes sistemas de manejo torna-se mais evidente ao considerar aspectos relacionados à qualidade da MOS. A fragmentação da MOS em diferentes frações, como granulométrica, densimétrica, química, entre outras, possibilita interferências sobre os efeitos do manejo, o grau de transformação, a ciclagem e a labilidade do material orgânico do solo (CERLI et al., 2012).

As diferentes frações do carbono orgânico do solo exibem características químicas, físicas e morfológicas únicas, e a sua distribuição pode servir como um indicativo da qualidade da MOS (CANELLAS et al., 2003). Portanto, é possível explorar essas frações como objeto de estudo para avaliar as alterações no uso da terra resultantes do manejo adotado e, posteriormente, fazer recomendações mais precisas.

Dessa forma, o objetivo do estudo foi avaliar o impacto dos diferentes sistemas de uso e manejo da terra nas interações entre os atributos químicos do solo e entre as frações da MOS em áreas agricultáveis na região do Cerrado goiano.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. O Bioma Cerrado

O bioma Cerrado, do espanhol “fechado”, também conhecido como savana brasileira, está localizado na região central do Brasil, entre as latitudes 04° 03' e 23° 27' Sul e as longitudes 35° 00' e 63° 00' Oeste. Com uma área de aproximadamente 2 milhões de km², correspondente a cerca de 25% do território nacional, representando o segundo maior bioma do país em extensão, superado somente pelo Amazônico (BEUTLER et al., 2016).

Embora seu centro de distribuição seja o Planalto Central, o bioma Cerrado engloba uma ampla extensão de estados brasileiros, abrangendo Goiás, Tocantins e o Distrito Federal, além de parte da Bahia, Maranhão, Ceará, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Piauí, Rondônia e São Paulo. Também é encontrado em áreas isoladas ao norte, nos estados do Amazonas, Amapá, Roraima e Pará, e ao sul, no Paraná, onde surge na forma de manchas dispersas (COUTINHO, 2016). Além do Brasil, o Cerrado também se estende para regiões do Paraguai e Bolívia, enquanto paisagens semelhantes são encontradas na Colômbia, Guiana, Suriname e Venezuela, recebendo outras denominações, como Llanos, por exemplo (RIBEIRO & WALTER, 1998).

O clima predominante no Cerrado, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Aw (tropical chuvoso), caracterizado por duas estações bem definidas: uma seca e outra chuvosa (RIBEIRO et al., 2023). No entanto, em algumas regiões do sul e leste de Minas Gerais, bem como em uma pequena parte do estado de Mato Grosso do Sul, o clima pode ser classificado como temperado quente (Cwa). A temperatura média anual varia de 18 a 27 °C, com influência regional significativa. As temperaturas mais baixas são registradas no sul de Minas Gerais, enquanto as mais altas são encontradas nos estados do Piauí e Maranhão (SILVA et al., 2008).

O período das chuvas se estende de outubro a abril, durante a primavera e o verão, com maior concentração de precipitação nos meses de novembro, dezembro e janeiro, embora haja períodos curtos de seca, conhecidas como veranicos. Já o período seco estende-se de maio a setembro, com déficit hídrico acentuado e quase ausência de chuva nos meses de julho e agosto (umidade relativa do ar em torno de 30%). A precipitação média anual varia conforme a localização geográfica, com índices entre 400 e 600 mm em regiões do estado do Piauí e volumes acima de 2.000 mm em regiões mais a oeste (COUTINHO, 2016).

Quanto à vegetação, o Cerrado apresenta uma variedade de fisionomias, que englobam formações florestais; savânicas e campestres (RIBEIRO & WALTER, 1998). As formações florestais incluem tipos de vegetação em que predominam espécies arbóreas, com formação de dossel. Estas englobam quatro tipos fitofisionômicos: Mata Ciliar e a Mata de Galeria, associadas a cursos de água; Mata Seca e Cerradão que ocorrem nos espaços entre as bacias hidrográficas, em terrenos bem drenados, sem associação com cursos de água. As formações savânicas referem-se a áreas com árvores e arbusto dispersos sobre um estrato de gramíneas, sem formação contínua de dossel. Suas principais fisionomias são Cerrado sentido restrito, Parque de Cerrado, Palmeiral e Vereda. Já as formações campestres são áreas dominadas com espécies herbáceas, com poucas árvores na paisagem. Os principais tipos fisionômicos são Campo Sujo, Campo Limpo e Campo Rupestre (IBGE, 2012).

2.2. Solos do Cerrado

Grande parte dos solos do Cerrado são caracterizados por um elevado grau de intemperismo e acidez. Devido ao longo período em que foram expostos aos agentes

intempéricos, houve uma significativa lixiviação das bases trocáveis, resultando em uma redução considerável de sua fertilidade natural ao longo do tempo (PENA, 2010).

Na distribuição das ordens de solos no bioma Cerrado, observa-se uma predominância de Latossolos, seguidos de Neossolos, Argissolos, Plintossolos e Cambissolos (SANTOS et al., 2011). Os Latossolos e Argissolos em associação representam cerca de 52% da área total do bioma e são os principais solos utilizados para realização das atividades agrícolas, pecuárias e silviculturais.

Tabela 1. Distribuição das ordens de solo no bioma Cerrado.

Ordem (Símbolo)	Área (ha)	%
Cambissolos (C)	19.071.533,06	9,35
Plintossolos (F)	20.820.929,31	10,21
Gleissolos (G)	3.329.267,52	1,63
Latossolos (L)	82.827.744,21	40,61
Chernossolos (M)	1.193.587,51	0,59
Nitossolos (N)	1.319.136,13	0,65
Organossolos (O)	29.732,22	0,01
Argissolos (P)	24.310.435,88	11,92
Neossolos (R)	47.284.078,70	23,19
Afloramento Rochoso	64.772,99	0,03
Corpos de Água	927.089,03	0,45
Dunas	141.676,62	0,07
Total	203.937.858,29	100%

Fonte: elaborado a partir de dados processados por Ricardo de Oliveira Dart (Embrapa Solos), a partir do Mapa de Solos do Brasil (SANTOS et al., 2011).

A ordem dos Latossolos é identificada pela presença de um horizonte diagnóstico subsuperficial B latossólico sob qualquer tipo de horizonte A, até 200 cm a partir da superfície do solo, ou até 300 cm caso o horizonte A tenha mais de 150 cm espessura (SANTOS et al., 2018). Esses solos são formados por um processo pedogenético específico conhecido como Latossolização (Ferralitização e Dessilicção), que envolve intensa remoção de sílica, lixiviação de bases e transformações de minerais primários em minerais secundários (KÄMPF & CURI, 2012). Essa ordem de solo é resultado de um intenso processo de intemperismo do solo e/ou do material de origem.

De maneira geral, os Latossolos são solos profundos, com baixa saturação por bases (distróficos) e altos teores de alumínio trocável. Em relação à sua mineralogia, a fração argila é composta principalmente por caulinita, óxidos de ferro (hematita e goethita) e alumínio (gibbsita), minerais que podem apresentar cargas positivas em condições de elevada acidez (baixos valores de pH), padrão comumente observado nos solos do bioma Cerrado. A fração areia é composta basicamente de quartzo, com menor presença de minerais resistentes ao intemperismo (SANTOS et al., 2018).

No Cerrado, os Latossolos ocorrem predominantemente em áreas de relevo plano, nos topo das chapadas, e apresentam boas condições de drenagem, ocupando cerca de 40% das áreas (Tabela 1).

A nível de subordem, são encontrados no bioma Cerrado os Latossolos Vermelhos, que se formam a partir de rochas básicas e apresentam texturas que variam de argilosa a muito argilosa, com maior presença de hematita na fração argila. Também ocorrem os Latossolos Amarelos e Vermelho-Amarelos, que possuem uma expressão geográfica mais ampla. Esses solos são formados principalmente a partir de rochas sedimentares, com maior variação textural e uma maior presença de goethita na fração argila (SOUZA et al., 2004).

Quanto ao seu uso agrícola, os Latossolos apresentam elevado potencial para sistemas intensivos de produção, incluindo monocultivo, cultivos convencionais e sistemas integrados, como o Sistema Plantio Direto (SPD) e a Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF). O relevo com baixa declividade e a boa drenagem favorecem a mecanização e minimizam a susceptibilidade à erosão. A maior profundidade dos perfis de solo permite um maior armazenamento de água e uma maior profundidade efetiva do sistema radicular, o que reduz o estresse hídrico das culturas, especialmente durante períodos de veranicos, que são comuns no Cerrado (SOUSA et al., 2004).

A principal limitação desses solos está relacionada aos atributos químicos. Eles possuem baixa capacidade de retenção de cátions e grande parte baixa saturação por bases, além de altos teores de alumínio e fixação de fósforo. No entanto, a identificação dessas limitações tem impulsionado pesquisas no Brasil para o desenvolvimento de tecnologias adequadas ao Cerrado. O manejo adequado da matéria orgânica (MO), juntamente com técnicas de correção e adubação, tem promovido o aumento da fertilidade dos solos na camada arável, o que tem sido refletido em um aumento crescente na produtividade das culturas de grãos no bioma Cerrado (OLIVEIRA et al., 2017).

Em função das práticas de manejo adotadas, os solos têm mostrado mudanças significativas, especialmente no aumento dos teores de macronutrientes (cálcio, magnésio, potássio e fósforo) e carbono orgânico. Esse aumento, principalmente do carbono orgânico, é observado fundamentalmente em áreas onde são adotados o sistema de plantio direto (SPD) ou sistemas integrados de produção. Assim, é comum observar um aumento nos níveis de fertilidade na camada arável em relação aos horizontes subsuperficiais, como resultado das práticas de calagem e adubação (OLIVEIRA et al., 2017).

2.3. Solos de Fertilidade Construída

O conceito de formação de solos de fertilidade construída está relacionado, principalmente, à melhoria das condições químicas de solos inicialmente ácidos e pobres nutricionalmente, como a ordem dos Latossolos. Esse processo ocorre por meio de práticas como calagem, gessagem e adubações corretivas, que podem ser realizadas de uma só vez durante a abertura da área ou gradualmente ao longo dos primeiros cultivos. O objetivo é atingir níveis satisfatórios dos atributos químicos do solo, ao mesmo tempo em que se busca associar práticas que promovam a manutenção ou o aumento dos teores de matéria orgânica do solo (MOS) (LOPES et al., 2012; LOPES et al., 2016).

Dentre os objetivos desses procedimentos, pode-se destacar: i) controle de problemas relacionados à acidez do solo na camada superficial e em subsuperfície; ii) fornecimento de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) que, além de nutrientes, são importantes para compor quantidades satisfatórias de bases trocáveis no solo; iii) elevação dos teores de fósforo (P), potássio (K) e micronutrientes a valores acima dos níveis críticos para o desenvolvimento das culturas; e iv) conservação do teor da MOS para preservação da capacidade de troca catiônica, retenção de água no solo, manutenção da atividade microbiana e contribuição no suprimento de N, entre outras funções essenciais para a saúde do solo. O atendimento dessas condições deve constituir um pré-requisito quando se busca o desempenho técnico e economicamente viável das culturas a serem exploradas (RESENDE et al., 2016).

Em um sentido mais amplo, comprehende-se que solos de fertilidade construída são ambientes preparados para um alto potencial produtivo, caracterizados por um elevado grau de tamponamento e resiliência (RESENDE et al., 2016). Segundo Kappes & Zancanaro (2014), esses solos são inicialmente limitados para o desenvolvimento das culturas, porém, através de um manejo adequado ao longo do tempo, adquirem condições químicas, físicas e biológicas propícias para que as culturas expressem seu máximo potencial produtivo.

Sob essa perspectiva, além das correções químicas para garantir disponibilidade de nutrientes acima dos níveis críticos, a fase de construção envolve, necessariamente, cuidados para a preservação ou melhoria de atributos físicos e biológicos desejáveis no perfil onde ocorrem as interações solo-planta. Torna-se crucial adotar uma abordagem integrada de manejo do sistema como um todo, incorporando práticas de conservação do solo e da palhada, adubação equilibrada, adoção do plantio direto, diversificação de culturas, uso de plantas de cobertura e a manutenção da qualidade física do solo para promover a retenção de água, entre outros aspectos (RESENDE et al., 2016).

Conforme Bortolon et al. (2016), práticas de manejos que permitam altas incorporações de material orgânico ao solo são fundamentais para garantir a sustentabilidade dos sistemas de produção. Em geral, nas áreas de fertilidade construída e com elevadas produtividades, observam-se as seguintes características: (i) altos teores de MOS; (ii) maior capacidade de retenção de água disponível no solo; (iii) solos e práticas de manejo que não comprometem o estabelecimento inicial das culturas; (iv) solos que, mantém bom conteúdo de água em profundidade mesmo durante períodos de estiagem; e (v) solos que apresentam teores nutricionais adequados, conforme as exigências das culturas cultivadas no sistema produtivo.

2.4. Sistemas Conservacionistas Utilizados no Cerrado

A agricultura conservacionista se baseia em três pilares: o não revolvimento ou mínima mobilização do solo, a manutenção da cobertura permanente do solo por meio de plantas vivas ou seus resíduos e a diversificação de culturas. Embora o mínimo revolvimento do solo seja o principal fundamento, e esse princípio esteja plenamente incorporado no sistema plantio direto (SPD), a agricultura conservacionista não se limita apenas a essa prática. O alto aporte de resíduos vegetais na superfície do solo e a diversificação de culturas são aspectos igualmente importantes e determinantes no potencial de acumulação de carbono em solos sob SPD (BAYER & DIECKOW et al., 2023).

O efeito do SPD no aumento dos estoques de C orgânico do solo em relação ao plantio convencional se deve à redução das taxas de decomposição da MOS, o que ocorre em grande parte devido à proteção física da MO dentro de agregados do solo e ao efeito positivo desta maior permanência ampliando a estabilização da MO por associação com os minerais e a interação organo-mineral (CONCEIÇÃO et al., 2013).

Os sistemas conservacionistas do século XXI devem atender a duas premissas básicas: maximizar a produção agrícola de elevada qualidade e conservar os recursos do sistema (BALBINO et al., 2012). Nesse sentido, no domínio do bioma Cerrado, destacam-se o SPD e o sistema de integração lavoura-pecuária (ILP), como sistemas capazes de atender a essas premissas, resultando em melhores condições ambientais, uma vez que a diversidade observada nesses sistemas, os caminhos dos fluxos de nutrientes e outros processos comuns na natureza promovem uma agricultura mais conservacionista (CARVALHO et al., 2010a, b, c; ANGHINONI et al., 2011; LOSS et al., 2011; 2012a, b, c; 2013; MAIA et al., 2013; TIVET et al., 2013).

2.5. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta

O sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) é definido como uma “estratégia de produção que integra atividades de cultivo consorciado, em sucessão ou rotacionado, buscando-se efeitos sinérgicos entre os componentes dos agroecossistema, adequação ambiental, valorização do indivíduo, maior viabilidade econômica e aumento da sustentabilidade dos sistemas de produção de alimentos” (BALBINO et al., 2012).

Diferentemente do observado nos sistemas de monoculturas, nos sistemas ILPF, o(a) produtor(a) consegue otimizar o uso da terra, diversificar sua renda e aumentar a produtividade, além de reduzir a pressão por abertura de novas áreas com vegetação nativa e mitigar as emissões de gases de efeito estufa. Os sistemas ILPF constituem também uma estratégia de recuperação de pastagens degradadas (BEHLING et al., 2013).

Os sistemas integrados incluem os componentes em diferentes combinações: Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF); Integração Lavoura-Floresta (ILF); Integração Pecuária-Floresta (IPF) e Integração Lavoura-Pecuária (ILP) (BALBINO et al., 2011). A escolha da modalidade mais adequada deve ser feita com base na análise das características da região, condições do clima e objetivos do(a) produtor(a).

O setor agropecuário e seu desenvolvimento sustentável estão diretamente relacionados à evolução dos sistemas integrados de produção. A diversificação dos sistemas produtivos traz benefícios mútuos para os componentes agrícolas, animais e florestais, assim como para os insumos e resíduos associados a esses sistemas (BALBINO et al., 2012). De acordo com Wilkins (2008), os sistemas integrados de produção são mais sustentáveis em comparação aos sistemas especializados de produção em grãos e fibras.

A utilização dos modelos integrados de produção traz diversos benefícios relacionados ao uso sustentável dos recursos naturais. Essa abordagem contribui para melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, quebrar ciclos de doenças, recuperar áreas degradadas, conservar água e solo, promover o sequestro de carbono, manter e restaurar a cobertura florestal, e aumentar a biodiversidade (LAROCA et al., 2018; BORGES et al., 2019; DAMIAN et al., 2021; VALANI et al., 2022; SILVA et al., 2022).

A associação de componentes arbóreos com pastagens e lavouras ganha importância, especialmente em áreas de pastagens degradadas, onde os resíduos florestais naturais estão fragmentados e isolados (PROFÍRIO DA SILVA, 2006). A integração de árvores em pastagens e/ou lavouras é uma alternativa à produção intensiva em monoculturas e representa uma opção agroecológica que incorpora o conceito de sustentabilidade.

Os sistemas de ILPF devem ser planejados levando em consideração os aspectos socioeconômicos e ambientais específicos de cada unidade de produção. O objetivo é maximizar o uso da terra, considerando as capacidades agrícolas, a diversificação de culturas e os ganhos de produtividade. No Cerrado, existem diversos sistemas de integração adaptados de acordo com o perfil e os objetivos de cada fazenda. As diferenças nos sistemas podem ser atribuídas às peculiaridades regionais e das propriedades, como condições climáticas, edáficas, infraestrutura, experiência do produtor e tecnologia disponível (ALVES et al., 2019).

2.6. Importância da Matéria Orgânica do Solo (MOS)

A matéria orgânica do solo (MOS) desempenha um papel fundamental na sustentabilidade e produtividade dos agroecossistemas. A MOS é composta por uma complexa mistura de materiais orgânicos, em diferentes estágios de decomposição, incluindo resíduos vegetais e animais. Sua composição e estabilidade variam, influenciando sua capacidade de fornecer nutrientes, melhorar a estrutura do solo e desempenhar outras funções importantes (CUNHA et al., 2015).

Um dos principais papéis da MOS é fornecer nutrientes às plantas. A decomposição dos resíduos orgânicos além de liberar nutrientes, promove a melhoria da estrutura física do solo, atuando como agente cimentante na gênese de agregados, permitindo uma grande infiltração de água e aeração do solo (CONCEIÇÃO et al., 2005).

A fim de assegurar a sustentabilidade dos agroecossistemas, é crucial realizar análises periódicas da qualidade do solo. Compreender a dinâmica da MOS em sistemas de produção é de suma importância, pois suas propriedades são indicadores relevantes da qualidade do solo e

refletem as perturbações antropogênicas causadas, principalmente, pelos sistemas de manejo agrícola (SILVA NETO et al., 2010).

A MOS desempenha um papel significativo, direta e indiretamente, nas propriedades do solo, exercendo um forte impacto na aptidão agrícola do mesmo. Sua manutenção no solo é fundamental para a agricultura, uma vez que o aumento dos níveis de carbono orgânico pode resultar em maior produtividade e melhor eficiência do uso de nutrientes (CUNHA et al., 2015).

Dentre os indicadores que podem expressar de forma eficiente a qualidade do solo, a MOS é um parâmetro sensível às modificações no ambiente de cultivo (CONCEIÇÃO et al., 2005). A matéria orgânica leve (MOL) é uma fração ativa da MOS, composta por resíduos orgânicos em diferentes estágios de decomposição, que pode permanecer no solo a curto e médio prazo (JANZEN et al., 1992). A MOL representa o potencial de ciclagem de nutrientes do solo devido representar uma fração de rápida dinâmica no solo, e está diretamente relacionada ao aporte de raízes das plantas e à comunidade microbiológica (COMPTON & BOONE, 2002; LOSS et al., 2012).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização, Clima e Solo das Áreas de Estudo

O estudo foi realizado no Estado de Goiás, região Centro-Oeste do Brasil, em três diferentes áreas do bioma Cerrado. As três áreas do estudo compreendem as seguintes propriedades: i) Fazenda Boa Vereda, localizada em Inaciolândia - GO ($18^{\circ}31'54"S$, $49^{\circ}42'72"W$) (área BV); ii) Fazenda Mata do Lobo, localizada em Rio Verde - GO ($18^{\circ}08'17"S$, $50^{\circ}42'24"W$) (área ML); e iii) Instituto Federal Goiano, campus Morrinhos - GO ($17^{\circ}48'48"S$, $49^{\circ}12'19"W$) (área IF). Todas as áreas encontrando-se sob a mesma condição de relevo, clima e classe de solo. Nas áreas são realizadas atividades agrícolas conduzidas sob sistemas de produção diversificados.

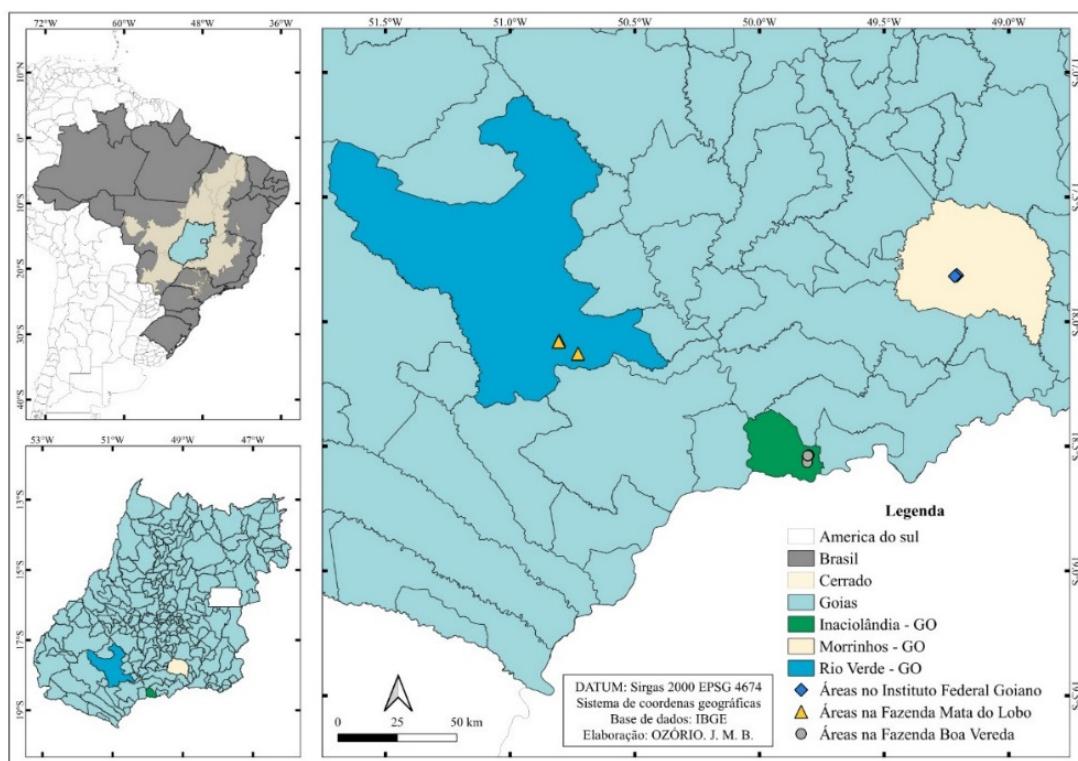


Figura 1. Mapa de localização das três áreas de estudo. Fonte: Elaborado por Ozório J. M. B.

O clima da região do estudo foi classificado como Aw, segundo Köppen, tropical chuvoso, com duas estações bem definidas: inverno seco (maio a setembro) e verão chuvoso (outubro a abril). A média anual da precipitação é de $1.700 \text{ mm ano}^{-1}$ e média anual da temperatura é de $24,2^{\circ}\text{C}$ (RIBEIRO et al., 2023). Nas áreas de estudo predomina a classe dos Latossolos Vermelho-Amarelo Distróficos, com textura argilosa (teores de argila acima de 500 g kg^{-1}) (SANTOS et al., 2018), com equivalência ao Oxisols no USA Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014) e Ferralsols no sistema de classificação da FAO (IUSS Working Group WRB, 2015).

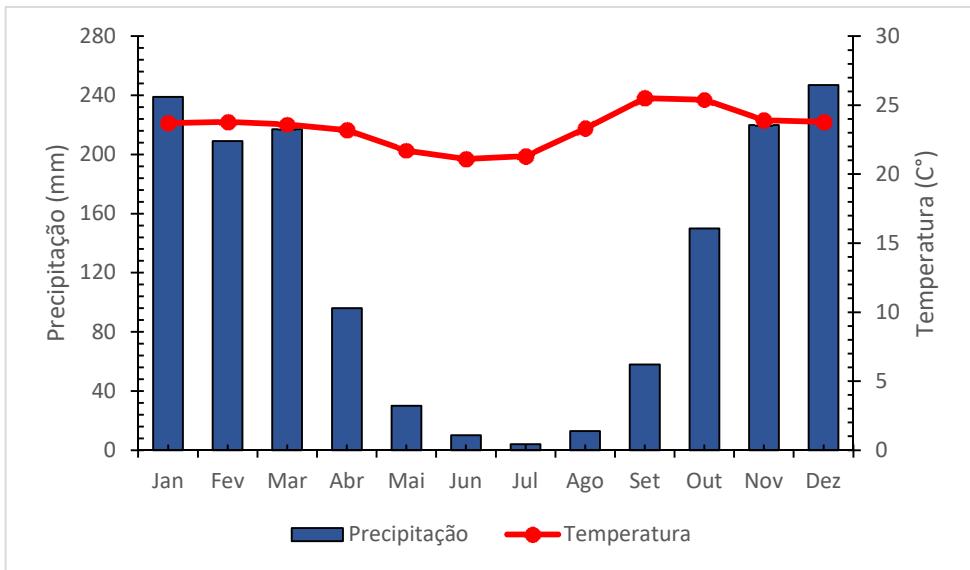


Figura 2. Variação da média da precipitação pluvial e da temperatura durante o ano de 2023.
Fonte: Dados climáticos obtidos no site climate-data.org. (2023), e elaborado pelo autor.

Na área BV foram utilizados os seguintes tipos de manejo ou cobertura vegetal: a) monocultivo de soja (MS01) implantado em 2020; b) integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF01) com sete anos de implantação, sendo no primeiro ano cultivada com soja nos entre renques, e posteriormente pastagem e eucalipto na área; c) pastagem (PA01) com alto grau de degradação/compactação; e d) vegetação de Cerrado (VC01) típico da região. Na área ML foram verificadas as seguintes formas de utilização: a) monocultivo com sucessão de soja/milho (SSM02) há sete anos, com manejo sustentável em termos de nutrição e controle de pragas e doenças; b) agrofloresta (AF02) composta por 12 componentes vegetais, com destaque ao café como fator econômico da propriedade; c) pastagem (PA02), com adubação realizada em 2020; e d) vegetação de Cerrado (VC02) típico da região. Na área IF foram verificadas as seguintes formas de uso e cobertura: a) sucessão de soja/milho (SSM03) ao longo de seis anos, anteriormente ocupada por pastagem natural de braquiária; b) árvores de eucalipto transplantadas em janeiro de 2018, com espaçamento de 10 x 4 m, onde nos entre renques foi semeada a cultura do milho em dezembro de 2018, seguido pelo consórcio de girassol com forrageira piatã em março de 2019, desde então, a área é uma integração pecuária-floresta (IPF03); pastagem (PA03) com calagem realizada em 2019 e predominância de brachiarão típico da região (*Brachiaria brizantha*); e d) vegetação de Cerrado (VC03) típico de região não antropizada.

Essas áreas estão localizadas em propriedades que pertencem ao pesquisador da Embrapa Dr. Abílio Pacheco, a engenheira agrônoma Maria Vitória e a Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão do IF Goiano, respectivamente. Essas áreas recebem incentivos para implantar projetos de busca por uma agricultura de baixa emissão de carbono, pautada em sistemas integrados de produção e menos dependentes de fatores externos.

Tabela 2. Localização das propriedades de estudo e sistemas de uso e ocupação do solo implementados em cada localidade do Cerrado goiano.

Localidades	Localização (Cidade)	Coordenadas	Uso e ocupação da terra
Localidade BV: Fazenda Boa Vereda	Inaciolândia	18°31'54"S 49°42'72"O	MS01 ILPF01 PA01 VNC01
Localidade ML: Fazenda Mata do Lobo	Rio Verde	18°08'17"S 50°42'24"O	SSM02 AF02 PA02 VNC02
Localidade IF: Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão do Instituto Federal Goiano	Morrinhos	17°48'48"S 49°12'19"O	SSM03 IPF03 PA03 VNC03

Legenda: MS01: Monocultivo de Soja área BV; ILPF01: Integração Lavoura-Pecuária-Floresta da área BV; PA01: Pastagem da área BV; VC01: Vegetação de Cerrado típico da área BV; SSM02: Sucessão Soja e Milho da área ML; AF02: Agrofloresta da área ML; PA02: Pastagem da área ML; VC02: Vegetação de Cerrado típico da área ML; SSM03: Sucessão Soja e Milho da área IF; IPF03: Integração Pecuária-Floresta da área IF; PA03: Pastagem da área IF; e VC03: Vegetação de Cerrado típico da área IF.

3.2. Histórico dos Sistemas das Respectivas Áreas

Na área BV, a) MS01: após anos de pasto degradado, se deu início ao cultivo de soja seguindo o método tradicional, que envolve o revolvimento do solo antes da semeadura. Durante esse processo, foram incorporadas 2 toneladas de calcário para melhorar as condições do solo. Além disso, na fase de semeadura da soja, foi aplicada uma adubação base de 350 kg do composto 08-28-16; b) ILPF01: pastagem sem nenhum investimento em adubação por muitos anos. Para revitalizá-la, optou-se por iniciar o cultivo de soja, primeiramente dessecando o pasto e corrigindo o solo com 2 toneladas de calcário. Durante a cultura da soja, foi aplicada uma adubação base de 350 kg do composto 08-28-16. Após a colheita da soja, introduziu-se o cultivo de eucalipto. Na safra seguinte, a soja foi cultivada nas entrelinhas do eucalipto, seguida pelo plantio da forrageira piatã. Essa rotação de culturas entre eucalipto e forrageira continua há 4 anos, beneficiando a área; c) PA01: pasto antigo sem histórico de adubação ou investimento; e d) VC01: fragmento sem nenhuma intervenção humana por vários anos, classificada como um cerrado típico.

Na área ML, os dados dos históricos dos sistemas não foram disponibilizados ou fornecidos.

Na área IF, a) SSM03: nos últimos 5 anos, tem sido praticada a rotação de culturas de soja (semeada pela primeira vez em outubro/novembro) e milho (semeado em fevereiro/março). Em ambos os cultivos, adotou-se o sistema de cultivo mínimo, minimizando o revolvimento do solo. Além disso, foi realizado adubações de correção e manutenção em ambos os cultivos. Durante o plantio da soja, foi adicionado um total de 300 kg de 00-20-20 por hectare, enquanto na cultura do milho, utilizado aproximadamente 400 kg de 04-14-08 por hectare como adubação de base. Além disso, na cultura do milho, aplicou-se 150 kg de ureia em cobertura. b) IPF03: para implantar o componente arbóreo, em janeiro de 2018, realizou-se o coveamento, acompanhado da adubação de cova, com 150 g do formulado 11-52-00 e 50 g do formulado 00-00-60 por planta. O transplantio ocorreu em 23 de janeiro de 2018, durante a estação chuvosa, para proporcionar um ambiente favorável ao estabelecimento das mudas.

Quarenta e cinco dias após o transplantio, aplicou-se adubação com ácido bórico, na proporção de 10 g por planta. As ações de manejo no sistema incluíram o desrama das plantas de eucalipto até a altura de 0,5 m entre 18 e 26 de outubro de 2018, com o objetivo de remover os ramos "ladrões" e facilitar a aplicação do dessecante na área. Em 12 de novembro de 2018, realizou-se a dessecação total da área, exceto pelos renques de eucaliptos, com o herbicida Glifosato (3 L p.c ha^{-1}), visando o plantio de milho. O milho, componente "L" do sistema ILPF, foi plantado com a cultivar 30F35VYHR da Pioneer, em espaçamento de 0,5 m entre linhas, totalizando 76000 sementes ha^{-1} . O *Panicum maximum* cv. BRS Zuri foi plantado a lanço, consorciado ao milho, com $9,37\text{ kg ha}^{-1}$. A colheita do milho com o *Panicum maximum* para silagem ocorreu nos dias 14 e 15 de março, com uma automotriz com plataforma de 6 metros, em uma área total plantada de 5,6 ha, com produtividade de 41,42 toneladas/ha.

Uma nova desrama nos eucaliptos foi realizada entre 11 e 20 de março de 2019, elevando-se até a altura de 1,80 m. Em 01 e 02 de abril de 2019, ocorreu uma adubação de cobertura do componente "F" com ácido bórico, aplicando-se 20 g por árvore. No componente "L", foi plantado girassol ($50.000\text{ plantas ha}^{-1}$) consorciado com o capim BRS Piatã (8 kg ha^{-1}), com colheita para silagem em 01 de julho de 2019. Após a silagem do girassol, o componente forrageiro permaneceu na área do sistema. Devido a limitações logísticas para a entrada de gado no final de 2019, optou-se por inserir o componente animal em fevereiro de 2020 e realizar uma roçagem da área em março de 2020, para uniformizar e propiciar o rebrote adequado, preparando-a para a entrada dos animais. Em relação às adubações de cobertura do componente "F", em 21 de janeiro de 2020, aplicou-se 200 g do formulado 20-00-20, e em 28 de abril de 2020, aplicou-se 20 g de ácido bórico, ambas a lanço, cobrindo as árvores de eucalipto; c) PA03: pastagem de *Brachiaria Brizantha* que não recebeu nenhum tipo de manejo de adubação por mais de 5 anos, desde o início das atividades no componente IPF adjacente à área.; e d) VC03: componente de mata adjacente à área de IPF, onde há monocultivo e pastagem, é um fragmento de cerrado classificado como Cerrado Ralo, caracterizado por uma baixa densidade de árvores.

Nas 12 diferentes formas de uso das terras foi utilizado o mesmo tipo de delineamento experimental, inteiramente casualizado. Nestes foram demarcadas quatro glebas de 300 m^2 , cada uma representando uma pseudorepetição. Nas quais foram realizadas as coletas das amostras deformadas e indeformadas em novembro de 2022, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm de profundidade. Totalizando 192 unidades amostrais (12 formas de uso da terra x 4 pseudorepetições x 4 camadas do solo). Após a coleta, as amostras deformadas foram secas ao ar, destorroadas e passadas por peneiras de 2,00 mm de malha, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA), material utilizado para realização das análises de fertilidade do solo e matéria orgânica do solo (MOS). As amostras indeformadas foram coletadas com auxílio de anel volumétrico, para a determinação da densidade do solo (D_s , Mg m^{-3}), sendo determinada segundo Teixeira et al. (2017).

3.3. Caracterização dos Atributos Químicos

Após a coleta do solo, as amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas por peneira de 2,0 mm de malha, obtendo-se assim a fração terra fina seca ao ar (TFSA), material utilizado para a realização das análises de fertilidade e frações da matéria orgânica do solo. Os métodos analíticos descritos por Teixeira et al. (2017) foram adotados para a caracterização química dos solos.

Os parâmetros analisados incluíram, para todas as camadas coletadas, a determinação do pH em água, teores de cátions trocáveis (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ e K^+), alumínio trocável (Al^{+3}), acidez potencial ($\text{H}+\text{Al}$), e fósforo disponível (P). Além disso, foram calculados a soma de bases (Valor S), capacidade de troca catiônica (Valor T) e saturação por bases (Valor V%).

O pH em água foi determinado utilizando a proporção solo: solução de 1:2,5, deixando o solo em contato com água destilada por 1 hora e, em seguida, realizando a leitura dos valores em um pHmetro de bancada. A quantificação do Ca^{+2} , Mg^{+2} , Al^{+3} trocáveis foi feita por extração com solução de KCl 1 mol L⁻¹, seguida de análise titulometria. A acidez potencial ($\text{H}+\text{Al}$) foi determinada por extração em solução de acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹, seguida de análise de titulometria. O P, Na^+ e K^+ foram extraídos em solução duplo-ácido (HCl 0,05 mol L⁻¹ + H_2SO_4 0,0125 mol L⁻¹) pelo método Mehlich-1 e analisados por colorimetria (P) e fotometria de chama (K^+ e Na^+), respectivamente, conforme descrito por Teixeira et al. (2017).

3.4. Caracterização das Frações da MOS

3.4.1. Carbono orgânico total (COT)

Os teores de carbono orgânico total (COT) foram determinados somente nas duas primeiras camadas do solo (0-5 e 5-10 cm) pelo método oxidação da matéria orgânica com dicromato de potássio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) a uma concentração de 0,2 mol L⁻¹ em meio sulfúrico, seguido de titulação com sulfato ferroso amoniacial a 0,1 mol L⁻¹, conforme descrito por Yeomans e Bremner (1988).

3.4.2. Estoque de carbono (ESTC)

A partir dos dados dos teores de COT e da densidade do solo (Ds), este último fornecido pelo parceiro e colaborador do projeto, professor Eduardo Severiano do IF Goiano, campus Rio Verde, foram calculados os estoques de carbono (ESTC) pelo método de massa equivalente (ELLERT & BETTANY, 1995; SISTI et al., 2004). Para este estudo, as massas de solo das camadas correspondentes ao bioma Cerrado foram consideradas como referência para os cálculos de estoque pelo método de massa equivalente, representando a condição original do solo. Os ESTC em cada camada do solo foram calculados pela Equação 1:

$$\text{ESTC} = (\text{COT} * \text{Ds} * e) / 10 \quad (1)$$

Em que:

ESTC = estoque de C orgânico em determinada profundidade (Mg ha⁻¹);

COT = teor de C orgânico total na profundidade amostrada (g kg⁻¹);

Ds = densidade do solo da profundidade (Mg m⁻³);

e = espessura da camada considerada (cm).

3.4.3. Fracionamento físico granulométrico da MOS e índice de manejo do carbono (IMC)

O fracionamento físico granulométrico da MOS foi determinado nas duas primeiras camadas (0-5 e 5-10 cm), realizado segundo Cambardella e Elliott (1992). Foram utilizados 20g de TFSA adicionando-se 60 mL de solução de hexametafosfato de sódio (5gL⁻¹). As amostras foram homogeneizadas por 16 horas em agitador horizontal.

Após esta etapa, foi realizado o peneiramento úmido, utilizando-se peneira com malha de 53 µm. O material retido na peneira consiste no carbono orgânico particulado (COP), associado à fração areia, enquanto aquele que atravessou a malha de 53 µm (frações silte e argila) é denominado de carbono orgânico associada aos minerais (COAM). O material que ficou retido na peneira foi transferido para placa de petri e seco em estufa 50°C por 24 horas. Após seco, o material foi moído em gral de porcelana e foi analisado o seu teor de carbono orgânico (COT) de acordo com o método de Yeomans & Bremner (1988).

O teor de carbono da fração COAM foi obtido a partir da diferença entre COT do solo e aquele da COP.

Posteriormente foram calculados os índices para avaliação da qualidade da fração orgânica do solo, tais como o índice de estoque de carbono (IEC), labilidade da MOS (Lab), índice de labilidade (ILab) e índice de manejo de carbono (IMC).

Para obtenção do índice de manejo do carbono (IMC), necessita-se do índice de estoque do carbono (IEC), sendo este calculado a partir da relação entre os estoques de carbono na área cultivada, em relação ao estoque de carbono da área de referência (Cerrado). A labilidade (Lab) da MOS foi determinada pela relação entre os estoques de matéria orgânica particulada (C-MOP) e os estoques de matéria orgânica associada aos minerais (C-MOM), e o índice de labilidade (ILab), calculado pela relação entre Lab da área cultivada e Lab da área referência.

O cálculo do IMC e de seus respectivos componentes foram realizados conforme as Equações (2 a 5) que seguem, como proposto por Blair et al. (1995):

$$\text{IEC} = \text{COT trat.} / \text{COT ref.} \quad (2)$$

$$\text{Lab} = \text{C-MOP} / \text{C-MOM} \quad (3)$$

$$\text{ILab} = \text{Lab trat.} / \text{Lab ref.} \quad (4)$$

$$\text{IMC} = \text{IEC} \times \text{ILab} \times 100 \quad (5)$$

Em que:

IEC = índice de estoque de C;

COT trat. = estoque de COT (Mg ha^{-1}) no sistema de manejo em análise;

COT ref. = estoque de COT (Mg ha^{-1}) no sistema referência;

Lab = labilidade da MOS;

C-MOP = carbono da fração particulada da MOS;

C-MOM = carbono da fração associada aos minerais da MOS;

ILab = índice de labilidade do sistema de manejo em análise;

Lab trat. = labilidade da MOS no sistema de manejo em análise;

Lab ref. = labilidade da MOS no sistema de referência; e

IMC = índice de manejo de carbono.

Ao utilizar as equações propostas por Blair et al. (1995), foi possível obter os valores do IMC e seus componentes, permitindo uma avaliação abrangente da qualidade da fração orgânica do solo.

3.4.4. Fracionamento químico da MOS

O fracionamento químico da matéria orgânica foi realizado nas duas primeiras camadas do solo (0-5 e 5-10 cm de profundidade), consiste na separação das substâncias húmicas em três frações: frações ácidos fúlvico (FAF), frações ácidos húmicos (FAH) e humina (HUM). Foi utilizada a técnica de solubilidade diferencial estabelecida pela Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas (Swift, 1996) e adaptada por Benites et al. (2003) e Teixeira et al. (2017).

3.4.5. Fracionamento físico densimétrico da MOS

O carbono orgânico da fração leve livre (FLL) foi quantificado somente na primeira profundidade do solo (0-5 cm), seguindo as recomendações descritas em (Sohi et al., 2001; Teixeira et al., 2017; Chen et al., 2020). Adicionou-se 5 g de TFSA e 35 mL da solução de iodeto de sódio (NaI), com densidade de 1,8 ($\pm 0,1 \text{ g cm}^{-3}$) em frascos de centrifuga de 50 mL,

agitados lentamente por 30 segundos, em seguida, centrifugados a 8.000 g, por 30 minutos. Após a centrifugação, a FLL presente na superfície da solução de NaI foi aspirada e filtrada em sistema de vácuo (Sistema Asséptico Sterifil, 47 mm – Millipore) com filtro de fibra de vidro de 47 mm de diâmetro e 2 µm de retenção (Whatman tipo GF/A). Em seguida foi levada à estufa de circulação forçada de ar para secar a 65°C durante 72 horas. Os filtros foram previamente pesados de acordo com o estudo de Pinheiro et al., 2004.

A fração coletada foi lavada com água destilada, visando remover o excesso de NaI presente na amostra e no filtro. Em seguida, a fração orgânica, juntamente com o filtro, foi levada à estufa de circulação forçada de ar para secar a 65 °C, durante 72 horas, pesada e macerada em almofariz. O carbono presente na fração orgânica foi posteriormente analisado de acordo com o método descrito por Yeomans & Bremner (1988).

3.4.6. Matéria orgânica leve em água (MOL)

A determinação da MOL foi realizada nas duas primeiras camadas do solo (0-5 e 5-10 cm) através das recomendações descritas por Anderson & Ingram (1989). Inicialmente, 50 g de amostra de solo TFSA foram adicionados a um Becker de 250 mL. Em seguida, foram adicionados 100 mL de solução NaOH 0,1 mol L⁻¹, e o recipiente foi deixado em repouso durante uma noite. Após esse período, a amostra foi homogeneizada utilizando um bastão de vidro e passou por peneira de 0,25 mm.

O material retido na peneira foi transferido para o becker e o volume foi completado com água. Esse processo foi repetido para o material flutuante até que todo material com agitação em água fosse removido. O material que ficou retido na peneira é denominado de MOL e foi transferido para recipientes de alumínio, levado a estufa a 60°C até atingir peso constante.

O carbono presente na fração orgânica foi posteriormente analisado de acordo com o método descrito por Sohi et al. (2001).

3.5. Análises de Dados

A normalidade dos resíduos e a homogeneidade das variâncias foram avaliadas pelos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett. Variáveis que não apresentaram distribuição normal ou homogeneidade foram transformadas de acordo com o teste de Box-Cox e, posteriormente, reavaliadas. Quando os pressupostos de normalidade e homogeneidade foram atendidos (tanto para variáveis transformadas quanto não transformadas) os dados foram submetidos à análise de variância, utilizando o teste F (ANOVA), e as médias foram comparadas utilizando o teste de Tukey.

Para algumas variáveis, mesmo após a transformação, não foi possível atender aos pressupostos da análise de variância. Nestes casos, optou-se pela análise não paramétrica de Kruskal-Wallis, seguida pelo teste de diferença mínima significativa de Fisher (LSD) com correção de Bonferroni.

Além disso, foi conduzida uma APC com base na matriz de correlação de Pearson, utilizando os atributos avaliados. Todos os testes estatísticos foram realizados ao nível de significância de 5% utilizando o software R (R CORE TEAM, 2020).

4. RESULTADOS

4.1. Valores de Acidez Ativa (pH em Água)

Em todas as áreas foram verificadas diferenças nos valores de pH. Nos sistemas de ILPF01 e PA01 da área BV foram registrados valores de pH similares aos quantificados em VC01 (sistema de referência) na camada 0-5 cm. Nesses mesmos sistemas, foram determinados valores de pH superiores aos observados na área VC01 nas demais camadas (Tabela 3). Os valores de pH entre os sistemas da área ML somente diferiram na última camada (20-40 cm), com destaque para os sistemas de SSM02, AF02 e PA02, com valores de pH superiores aos verificados no sistema de uso VC02 (Tabela 4). Já, em relação à área IF, em todos os sistemas analisados (SSM03, IPF03 e PA03) foram observados valores superiores aos quantificados no sistema de uso VC03, em todas as camadas (Tabela 5).

Os valores de pH em água foram mais elevados (valor máximo de 7,10) na camada de 0-5 cm em todos os sistemas de uso e manejo da terra nas três áreas de estudo, com exceção do sistema MS01 da área BV (camada de 10-40 cm), VC02 da área ML (camada de 10-40 cm) e dos sistemas IPF03 e VC03 da área IF (camada de 10-20 cm), em que foram observados maiores valores em profundidade em comparação a camada superficial. Por outro lado, os menores valores de pH (mais ácidos) foram quantificados nos sistemas não antropizados (VC02 e VC03) para as áreas ML e IF, respectivamente, enquanto na área BV esse padrão foi observado no sistema de MS01.

4.2. Teores dos Cátions Básicos Trocáveis (Ca^{2+} e Mg^{2+})

Em relação aos teores de Ca^{2+} trocável, observou-se diferença estatística entre os sistemas em todas as áreas e camadas. Na área BV, foi verificado que o sistema de PA01 se destacou por apresentar teores similares aos quantificados em VC01 na camada 0-5 cm, e teores que foram superiores aos quantificados em VC01 nas demais camadas (Tabela 3). Além deste sistema, no MS01 da área BV foram quantificados maiores teores de Ca^{2+} aos analisados em VC01 nas camadas mais subsuperficiais (10-20 e 20-40 cm). Esse padrão também foi observado para o sistema de ILPF01, apenas na camada 10-20 cm (Tabela 3). Em relação às áreas ML e IF, todos os sistemas de manejo adotados nestas áreas proporcionaram o mesmo padrão para os teores de Ca^{2+} , sendo estes superiores aos quantificados nos sistemas de VC02 e VC03 (Tabelas 4 e 5).

Quanto aos teores de Mg^{2+} , estes também diferiram entre os sistemas, porém não em todas as camadas analisadas. Na área BV, os teores diferiram somente na camada 0-5 cm, sendo verificado nos sistemas PA01 e ILPF01 valores similares aos quantificados no sistema VC01 (Tabela 3). Na área ML, os valores de Mg^{2+} diferiram entre os sistemas em todas as camadas, padrão observado para todos os sistemas de manejo (AF02, SSM02 e PA02), sendo que estes valores superaram os determinados em VC02 (Tabela 4). Já na área IF, as diferenças ocorreram somente nas duas últimas camadas, destacando-se os sistemas de IPF03 e PA03 com valores similares aos quantificados no sistema VC03, sendo os maiores valores observados no sistema IPF03 (Tabela 5).

4.3. Teores de Potássio Trocável (K^+)

Para os teores de K^+ , foram verificadas diferenças para este nutriente entre os sistemas em todas as áreas, com exceção da área BV, na qual não diferiu na camada 10-20 cm. Nas camadas onde houve diferença entre os sistemas, os maiores valores de K^+ foram quantificados no sistema de PA01 nas demais camadas, e em MS01 somente nas duas camadas superficiais, com valores similares aos observados em VC01 (Tabela 3). Na área ML, os maiores valores

desse nutriente foram observados nos sistemas de AF02 em todas as camadas, no sistema de SSM02 nas camadas de 0-5, 5-10 e 20-40 cm, e no sistema de PA02 nas duas últimas camadas, atingindo valores similares aos observados no sistema de uso VC02 (Tabela 4). Já na área IF, os maiores valores foram verificados no sistema SSM03 (0-40 cm) (Tabela 5).

4.4. Valores de Soma de Bases (SB)

Os valores de soma de bases (SB) apresentaram um padrão distinto para cada sistemas de uso. Na área BV, os valores diferiram somente na camada superficial (0-5 cm), na qual foi observado no sistema de PA01 os maiores valores, sendo estes similares aos quantificados em VC01 (Tabela 3). Tanto para área ML quanto para área IF, os valores da SB diferiram entre os sistemas de manejo adotados. Além disso, o mesmo padrão foi observado em ambas as áreas, sendo que os sistemas de SSM (SSM02 e SSM03), PA (PA02 e PA03) e os sistemas integrados de produção (AF02 e IPF03) apresentaram maiores valores quando comparados aos sistemas de uso referências (VC02 e VC03) em todas as camadas avaliadas, sendo exceção a esse padrão os sistemas PA02 e PA03 cujo maiores valores foram verificados somente na camada 5-10 cm (Tabelas 4 e 5).

Em todas as áreas os cátions predominantes, compondo o valor S, foram Ca^{2+} e Mg^{2+} que, na maioria das vezes, assim como a SB, diminuíram em profundidade. Esse padrão, de diminuição em profundidade, também foi verificado para K^+ e Na^+ . Os valores médios obtidos para SB são decorrentes das práticas de adubação e calagem realizadas nestas áreas (Carvalho et al., 2015).

4.5. Valores de Acidez Trocável (Al^{3+}) e Acidez Potencial ($\text{H}+\text{Al}$)

Os maiores valores de Al^{3+} , que apresentaram diferenças significativas, foram observados na área BV na camada 5-10 cm no sistema de MS01, sendo superiores aos observados no sistema de uso de referência (VC01), e no sistema ILPF01, foram observados valores similares aos quantificados no sistema de referência (Tabela 3). Na área ML, os maiores valores de Al^{3+} ocorreram no sistema de uso VC02, com exceção da última camada que não apresentou diferença entre os sistemas (Tabela 4). Na área IF, os maiores valores ocorreram somente nas duas primeiras camadas avaliadas, em VC03 (camada de 0-5 cm) e em IPF03 em maior profundidade (camada 5-10 cm) (Tabela 5).

Apesar dos valores de acidez potencial serem influenciados pelos teores de carbono orgânico, uma vez materiais orgânicos contribuem com boa parte dessa acidez provavelmente devido a interferência de moléculas orgânicas de radicais carboxílicos e fenólicos oriundos da MOS, de certa forma, estes acompanharam aos valores de Al^{3+} , sendo que na área BV só foi observada diferença nas camadas 5-10 e 20-40 cm, sendo os maiores valores quantificados nos sistemas de MS01 e ILPF01, atingindo valores similares aos observados em VC01 (camada de 0-5 cm); e ILPF01 na camada de 20-40 cm (Tabela 3). Na área ML, os valores não diferiram somente na última camada, sendo os maiores valores observados em VC02 (camada de 0-5 cm), e nos sistemas PA02 (camada de 5-20 cm) e SSM02 (camada de 10-20 cm) (Tabela 4). Já na área IF, só houve diferença na camada superficial (0-5cm), com os maiores valores nos sistemas de SSM03 e IPF03, similares aos quantificados no sistema de uso VC03 (Tabela 5).

4.6. Teores de Fósforo Disponível (P)

Quanto aos teores de fósforo (P), o padrão observado para todas as áreas foram maiores teores na camada superficial e diminuição em profundidade. Na área BV houve diferença na última camada avaliada (camada de 20-40 cm), com os maiores valores em VC01 (Tabela 3). Na área ML, a diferença entre os sistemas foi verificada nas duas primeiras camadas, em que

os maiores valores ocorreram nos sistemas de AF02, em ambas as camadas, e com destaque aos sistemas SSM02 e PA02 (camada de 5-10 cm) com valores similares (Tabela 4). E na área IF, todas as camadas apresentaram diferença entre os sistemas, com exceção da camada de 10-20 cm. Nessa área, verificou-se que os maiores valores foram observados nos sistemas IPF03 e SSM03, em todas as profundidades (Tabela 5).

4.7 Saturação por Bases (V%)

Em relação ao V%, os maiores valores que diferiram significativamente observados na área BV foram verificados no sistema de PA01, sendo estes valores superiores ao observado no sistema de referência (VC01), em todas as camadas. Vale destacar também, que para o sistema ILPF01 apresentou valores similares aos observados em VC01 (Tabela 3). Na área ML, destaca-se o sistema SSM02 com os maiores teores de V%, principalmente nas duas primeiras camadas (0-5 e 5-10 cm) (Tabela 4). Já na área IF, em todas as camadas, todos os sistemas manejados diferiram do sistema de uso VC03, sendo os maiores valores quantificados nas áreas manejadas (Tabela 5).

Tabela 3. Atributos químicos do solo da área BV nos diferentes sistemas de uso e manejo do solo, região do bioma Cerrado goiano.

Uso do Solo	0–5 cm									
	pH H ₂ O	Ca ²⁺	Mg ⁺²	Al ⁺³	H+Al cmol _c kg ⁻¹	K ⁺	S	T	V %	
									P mg dm ⁻³	
MS01	4,76 b	2,48 b	2,48 b	0,24 a	6,98 a	0,05 a	5,02 b	11,99 c	41 b	31 a
ILPF01	5,78 a	2,05 b	3,88 ab	0,00 a	6,00 a	0,01 b	5,94 b	11,94 c	50 ab	18 a
PA01	6,02 a	3,28 ab	5,23 a	0,00 a	5,53 a	0,05 a	8,55 a	14,08 b	61 a	12 a
VC01	6,12 a	5,13 a	4,40 a	0,21 a	6,48 a	0,04 a	9,57 a	16,04 a	60 a	25 a
CV%	3,55	32,25	19,07	141,42	13,02	88,14	16,68	6,71	13,61	51
5-10 cm										
Uso do Solo	pH H ₂ O	Ca ²⁺	Mg ⁺²	Al ⁺³	H+Al cmol _c kg ⁻¹	K ⁺	S	T	V %	
									P mg dm ⁻³	
MS01	4,65 c	1,35 b	2,28 a	0,38 a	7,01 a	0,02 a	3,65 a	10,66 a	34 b	19 a
ILPF01	5,66 ab	1,90 b	2,15 a	0,06 ab	6,13 ab	0,01 b	4,06 a	10,18 a	40 a	9 a
PA01	5,94 a	3,08 a	2,53 a	0,00 b	5,1 b	0,01 a	5,62 a	10,72 a	52 a	21 a
VC01	5,53 b	1,90 b	2,28 a	0,16 ab	7,5 a	0,03 a	4,68 a	11,93 a	39 ab	16 a
CV%	2,83	23,90	29,68	99,3	12,96	61,81	21,13	9,68	15,91	88
10-20 cm										
Uso do Solo	pH H ₂ O	Ca ²⁺	Mg ⁺²	Al ⁺³	H+Al cmol _c kg ⁻¹	K ⁺	S	T	V %	
									P mg dm ⁻³	
MS01	5,09 c	2,18 ab	1,40 a	0,07 a	5,30 a	0,01 a	3,59 a	8,89 a	41 ab	6 a
ILPF01	5,70 ab	1,88 ab	1,65 a	0,01 a	5,60 a	0,01 a	3,53 a	9,13 a	38 ab	7 a
PA01	5,94 a	3,13 a	1,48 a	0,00 a	4,80 a	0,01 a	4,61 a	9,41 a	49 a	5 a
VC01	5,53 b	1,28 b	1,83 a	0,09 a	6,08 a	0,01 a	3,11 a	9,19 a	33 b	13 a
CV%	3,03	32,08	37,99	134,01	13,85	41,45	23,49	13,83	15,48	53
MS01	5,49 b	1,75 ab	1,23 a	0,00 a	4,03 b	0,01 b	2,98 a	7,00 a	43 a	5 b
ILPF01	5,70 ab	1,35 b	1,50 a	0,04 a	4,55 ab	0,01 b	2,85 a	7,40 a	38 a	5 b
PA01	5,96 a	2,53 a	1,10 a	0,00 a	4,23 b	0,01 ab	3,63 a	7,86 a	45 a	5 b
VC01	5,43 b	1,1 b	1,30 a	0,11 a	5,55 a	0,17 a	2,42 a	7,97 a	30 a	7 a
CV%	3,08	32,70	38,29	151,54	13,63	74,15	30,41	15,90	20,02	15

Área BV (01): fazenda Boa Vereda; MS01: Monocultivo de Soja da área BV; ILPF01: Integração Lavoura-Pecuária-Floresta da área BV; PA01: Pastagem da área BV; VC01: Vegetação de Cerrado típico da área BV; e CV: Coeficiente de variação.

Tabela 4. Atributos químicos do solo da área ML nos diferentes sistemas de uso e manejo do solo, região do bioma Cerrado goiano.

Uso do Solo	0–5 cm									
	pH H ₂ O	Ca ²⁺	Mg ⁺²	Al ⁺³	H+Al cmol _c kg ⁻¹	K ⁺	S	T	V %	
									P mg dm ⁻³	
SSM02	7,10 a	8,83 a	3,63 ab	0,00 b	0,85 c	0,04 ab	12,55 a	13,40 a	94 a	15 b
AF02	6,77 a	5,90 a	5,5 a	0,00 b	1,38 bc	0,05 a	11,47 a	12,84 a	89 ab	80 a
PA02	6,60 a	5,85 a	3,48 ab	0,00 b	2,38 b	0,02 b	9,35 a	11,73 a	79 b	13 b
VC02	4,66 b	0,9 b	1,03 b	0,85 a	7,80 a	0,01 c	1,94 b	9,74 a	23c	8 b
CV%	5,45	35,42	39,28	127,44	53,94	37,47	20,16	17,11	13,8	49
5–10 cm										
Uso do Solo	pH H ₂ O	Ca ²⁺	Mg ⁺²	Al ⁺³	H+Al cmol _c kg ⁻¹	K ⁺	S	T	V %	
									P mg dm ⁻³	
	SSM02	6,71 a	5,85 a	2,38 a	0,01 b	2,90 b	0,01 a	8,25 a	11,15 a	74 a	12 ab
AF02	6,33 ab	3,73 ab	2,75 a	0,00 b	2,40 b	0,02 a	6,50 ab	8,90 ab	73 a	17 a
PA02	6,04 b	2,48 b	2,23 a	0,04 b	4,63 ab	0,01 a	4,71 b	9,34 ab	51 b	11 ab
VC02	4,24 c	0,2 c	0,53 b	1,10 a	7,03 a	0,01 b	0,73 c	7,76 b	9 c	8 b
CV%	4,23	33,68	27,09	131,06	32,92	37,06	22,85	16,08	16,82	31
10–20 cm										
Uso do Solo	pH H ₂ O	Ca ²⁺	Mg ⁺²	Al ⁺³	H+Al cmol _c kg ⁻¹	K ⁺	S	T	V %	
									P mg dm ⁻³	
	SSM02	5,97 a	4,25 a	1,83 ab	0,08 b	3,85 ab	0,01 bc	6,09 a	9,94 a	59 a	8 a
AF02	5,92 a	2,35 ab	2,53 a	0,05 b	3,00 b	0,02 a	4,90 a	7,90 ab	61 a	10 a
PA02	5,72 a	1,93 ab	1,10 bc	0,11 b	4,33 ab	0,01 ab	3,04 a	7,36 ab	41 a	8 a
VC02	4,78 b	0,33 b	0,35 c	0,59 a	5,10 a	0,01 c	0,68 b	5,78 b	12 b	8 a
CV%	7,67	53,12	40,63	64,33	16,29	52,63	45,66	20,17	26,16	21
20–40 cm										
Uso do Solo	pH H ₂ O	Ca ²⁺	Mg ⁺²	Al ⁺³	H+Al cmol _c kg ⁻¹	K ⁺	S	T	V %	
									P mg dm ⁻³	
	SSM02	5,55 a	2,75 a	1,20 ab	0,13 a	4,20 a	0,01 a	3,96 a	8,16 a	47 a	8 a
AF02	5,29 a	1,15 ab	1,80 a	0,35 a	3,93 a	0,02 a	2,97 a	6,90 a	45 a	9 a

Continua...

Continuação da Tabela 4.

	20-40 cm									
	pH H ₂ O	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Al ⁺³	H+Al cmol _c kg ⁻¹	K ⁺	S	T	V %	P mg dm ⁻³
PA02	5,52 a	1,73 ab	0,63 ab	0,13 a	4,15 a	0,01 a	2,36 a	6,51 a	36 a	7 a
VC02	4,78 a	0,1 b	0,20 b	0,43 a	4,50 a	0,01 b	0,31 b	4,81 a	6 b	8 a
CV%	9,82	69,13	60,28	96,09	33,91	86,60	52,12	27,01	38,48	17

Área ML (02): fazenda Mata do Lobo; SSM02: Sucessão Soja e Milho da área ML; AF02: Agrofloresta da área ML; PA02: Pastagem da área ML; VC02: Vegetação de Cerrado típico da área ML; e CV: Coeficiente de variação.

Tabela 5. Atributos químicos do solo da área IF nos diferentes sistemas de uso e manejo do solo, região do bioma Cerrado goiano.

Uso do Solo	0-5 cm									
	pH H ₂ O	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Al ⁺³	H+Al cmol _c kg ⁻¹	K ⁺	S	T	V %	P mg dm ⁻³
SSM03	5,99 a	2,48 a	2,75 a	0,00 b	3,45 ab	0,03 a	5,25 a	8,70 ab	61 a	17 ab
IPF03	6,07 a	3,00 a	4,00 a	0,00 b	3,28 ab	0,01 b	7,01 a	10,29 a	68 a	19 a
PA03	6,37 a	2,70 a	4,78 a	0,00 b	2,33 b	0,01 b	7,49 a	9,81 a	76 a	10 ab
VC03	4,24 b	0,18 b	2,55 a	0,24 a	3,90 a	0,01 c	2,73 b	6,63 b	39 b	8 b
CV%	6,13	34,47	33,15	173,18	20,69	38,97	21,26	16,23	13,44	37
	5-10 cm									
	pH H ₂ O	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Al ⁺³	H+Al cmol _c kg ⁻¹	K ⁺	S	T	V %	P mg dm ⁻³
SSM03	5,97 a	2,75 a	1,03 a	0,00 b	3,48 a	0,02 a	3,80 ab	7,27 ab	52 a	15 ab
IPF03	6,05 a	3,15 a	2,03 a	0,01 ab	3,75 a	0,01 b	5,18 a	8,93 a	58 a	19 a
PA03	6,12 a	2,38 a	1,23 a	0,00 b	3,58 a	0,01 b	3,61 b	7,18 ab	51 a	7 c
VC03	4,62 b	0,05 b	1,68 a	0,06 a	3,85 a	0,01 c	1,73 c	5,58 b	29,60 b	8 bc
CV%	4,27	19,8	49,44	144,02	19,59	64,07	20,2	16,75	13,88	25
	10-20 cm									
	pH H ₂ O	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Al ⁺³	H+Al cmol _c dm ⁻³	K ⁺	S	T	V %	P mg dm ⁻³
SSM03	5,97 a	2,58 a	0,50 b	0,00a	3,08 a	0,01 a	3,09 a	6,17 a	49 a	13 a

Continua...

Continuação da Tabela 5.

	10-20 cm									
	pH H ₂ O	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Al ⁺³	H+Al cmol _c dm ⁻³	K ⁺	S	T	V %	P mg dm ⁻³
IPF03	6,19 a	2,45 a	1,38 a	0,00 a	3,40 a	0,01 b	3,83 a	7,23 a	52 a	13 a
PA03	6,05 a	1,55 ab	1,03 ab	0,00 a	3,38 a	0,01 b	2,58 a	5,96 a	44 a	9 a
VC03	4,65 b	0,025 b	0,98 ab	0,02 a	3,03 a	0,01 b	1,01 b	4,03 b	25 b	8 a
CV%	5,07	47,77	32,95	400	18,97	56,98	26,31	14,15	17,88	32
	20-40 cm									
	pH H ₂ O	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Al ⁺³	H+Al cmol _c dm ⁻³	K ⁺	S	T	V %	P mg dm ⁻³
SSM03	5,92 a	2,03 a	0,65 b	0,00 a	2,35 a	0,01 a	2,68 a	5,03 ab	52 a	12 ab
IPF03	5,87 a	1,05 ab	1,90 a	0,01 a	2,73 a	0,01 b	2,95 a	5,68 a	51 a	15 a
PA03	5,93 a	0,93 ab	0,83 ab	0,00 a	3,08 a	0,01 b	1,76 a	4,83 ab	36 a	8 b
VC03	4,72 b	0,00 b	0,73 ab	0,00 a	2,88 a	0,01 b	0,73 b	3,61 b	20 b	7 b
CV%	7,92	66,36	57,06	400	20,19	48,66	41,66	17,80	25,67	23,42

Área IF (03): Instituto Federal Goiano; SSM03: Sucessão Soja e Milho da área IF; IPF03: Integração Pecuária-Floresta da área IF; PA03: Pastagem da área IF; VC03: Vegetação de Cerrado típico da área IF; e CV: Coeficiente de variação.

4.8. Análise Multivariada dos Dados

Na análise de componentes principais (PCA) da área BV, considerou-se apenas as duas primeiras componentes principais (PC1 e PC2), as quais explicaram 38,1% e 13,9% da variabilidade total dos dados, respectivamente (Figuras 3). Através da análise da Figura 3, verifica-se a formação de quatro grupos distintos: (1) grupo formado pelo sistema de PA01 posicionado no quadrante inferior direito; (2) grupo constituído pelo sistema de VC01, localizado no quadrante superior direito; (3) grupo formado pelo sistema de ILPF01, posicionado no quadrante inferior esquerdo; e (4) grupo constituído pelo sistema de MS01, localizado no quadrante superior esquerdo.

O eixo principal da Figura 3 (PC1) que explica a maior dissimilaridade entre os sistemas de uso e manejo do solo, separou os sistemas ILPF01 e PA01 dos sistemas MS01 e VC01 com aproximadamente 38,1% da variabilidade total dos resultados. O eixo secundário da Figura 3 (PC2) que apresenta menor relevância, separou os sistemas MS01 e ILPF01 dos sistemas PA01 e VC01, com aproximadamente 13,9% da variância total dos dados. As variáveis discriminantes para formação da PC1 (elevada correlação, $-0,70 \geq r \geq 0,70$) foram pH (0,73), Ca (0,89), Mg (0,73), valor S (0,96), valor T (0,97), V% (0,87), COT (0,85), Coam (0,74) e ESTC (0,80) (Tabela S1).

Analizando os resultados da PCA da área ML (Figura 4), verifica-se a formação de três grupos, a saber: (1) grupo formado pelo sistema de AF02, posicionado no quadrante inferior direito; (2) grupo que consiste o sistema SSM02, localizado no quadrante superior direito; e (3) grupo que constitui o sistema de VC02, posicionados no quadrante superior esquerdo. O sistema de PA02 encontra-se posicionado quase que no centro da ACP, não apresentando padrão definido.

O sistema de AF02 encontra-se separado dos sistemas SSM02 e VC02 ao longo da PC1 (aproximadamente 44,6%) (Figura 4), tendo como principais variáveis pH (0,88), Ca (0,90), Mg (0,80), Al (-0,70), H+Al (-0,81), K (0,78), valor S (0,98), valor T (0,79), V% (0,91) e COT (0,70) (Tabela S2). Os atributos MOL (0,70), HUM (0,77), AH (0,70) e AF (0,72) foram as variáveis que auxiliaram na formação da PC2 (aproximadamente 24,4%) (Tabela S2); eixo que separou os sistemas SSM02 e AF02 do sistema VC02 (Figura 4).

Já, analisando os resultados da PCA da área IF (Figura 5), foi verificado a formação de dois grupos com separação menos nítida quando comparada a separação dos grupos nas Figuras 3 e 4, a saber: (1) grupo formado pelo sistema de PA03, posicionado no quadrante inferior direito e (2) grupo que consiste o sistema de VC03, localizado no quadrante superior esquerdo. Observou-se também que os sistemas SSM03 e IPF03 encontram-se agrupados no centro da ACP e/ou em cima de um eixo de formação, sem padrão definido de separação (Figura 5).

O sistema de PA03 encontram-se separados dos sistemas de VC03 ao longo da PC1 (aproximadamente 38,5%) (Figura 5), tendo como principais variáveis pH (0,76), Ca (0,80), valor S (0,93), valor T (0,85), V% (0,90), COT (0,70), MOL (0,70) e ESTC (0,70) (Tabela S1). O atributo COAM (0,77) foi a variável que auxiliou na formação da PC2 (aproximadamente 13,2%), juntamente com as variáveis de COT (0,70) e ESTC (0,70) (Tabela S3); eixo que separou o sistema de PA03 do sistema de VC03 (Figura 5).

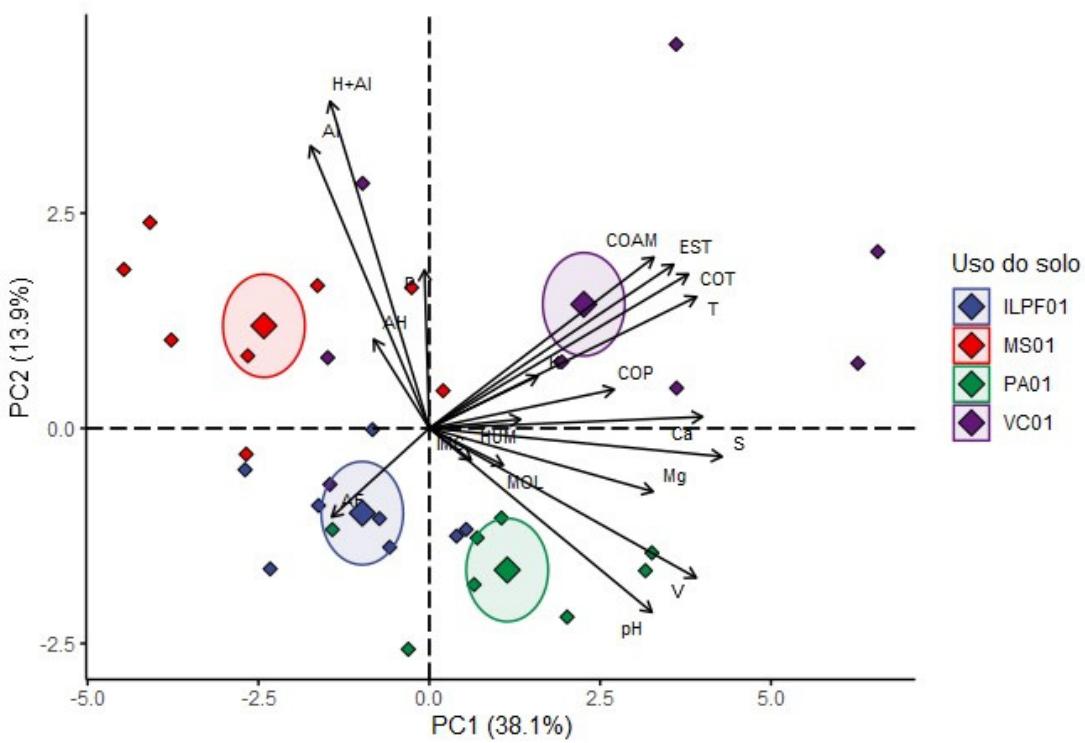


Figura 3. Análises de componentes principais integrando as frações químicas e as frações da matéria orgânica do solo nos diferentes sistemas de uso e manejo do solo na camada de 0-10 cm na área da Fazenda Boa Vereda, região do bioma Cerrado Goiano. pH: Acidez ativa; Ca: Cálcio trocável; Mg: Magnésio trocável; Al: Alumínio (Acidez trocável); H+Al: Acidez potencial; K: Potássio trocável; S: Soma das bases; T: Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: Saturação por bases; P: Fósforo disponível; COT: Carbono orgânico total; COP: Carbono orgânico particulado; COAM: Carbono orgânico associado aos minerais; MOL: Matéria orgânica leve em água; AF: Ácido fulvico; AH: Ácido húmico; HUM: Humina; ESTC: Estoque de carbono orgânico total; e IMC: Índice de manejo do carbono.

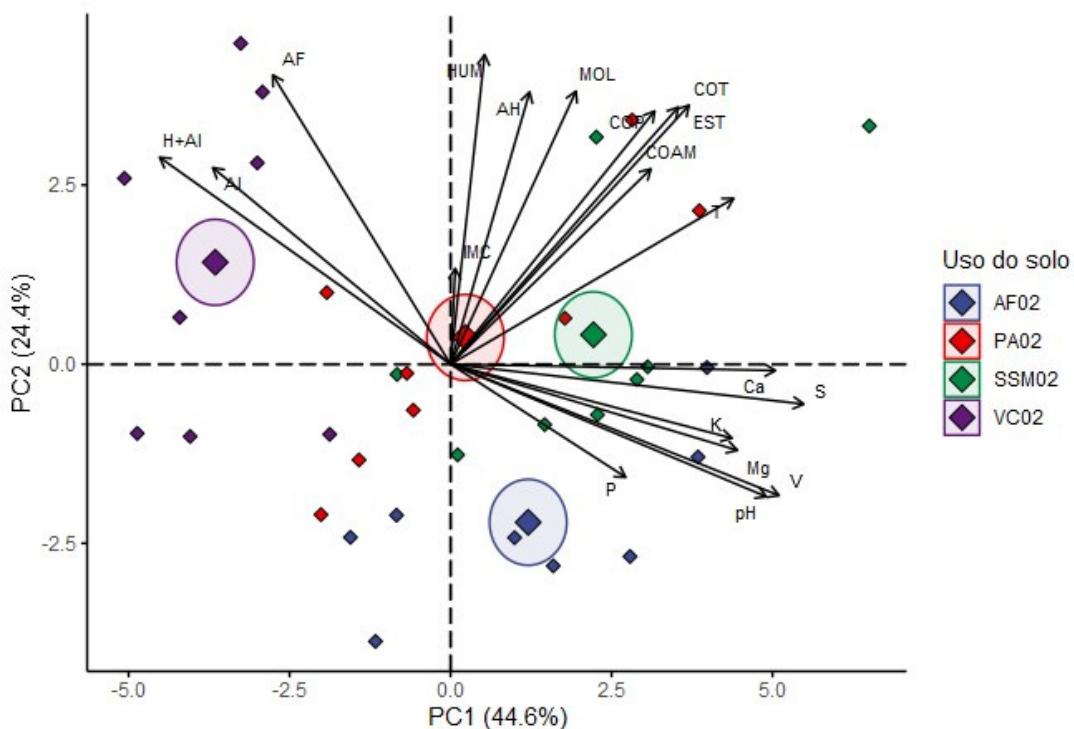


Figura 4. Análises de componentes principais integrando as frações químicas e as frações da matéria orgânica do solo nos diferentes sistemas de uso e manejo do solo na camada de 0-10 cm na área da Fazenda Mata do Lobo, região do bioma Cerrado Goiano. pH: Acidez ativa; Ca: Cálcio trocável; Mg: Magnésio trocável; Al: Alumínio (Acidez trocável); H+Al: Acidez potencial; K: Potássio trocável; S: Soma das bases; T: Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: Saturação por bases; P: Fósforo disponível; COT: Carbono orgânico total; COP: Carbono orgânico particulado; COAM: Carbono orgânico associado aos minerais; MOL: Matéria orgânica leve em água; AF: Ácido fúlvico; AH: Ácido húmico; HUM: Humina; ESTC: Estoque de carbono orgânico total; e IMC: Índice de manejo do carbono.

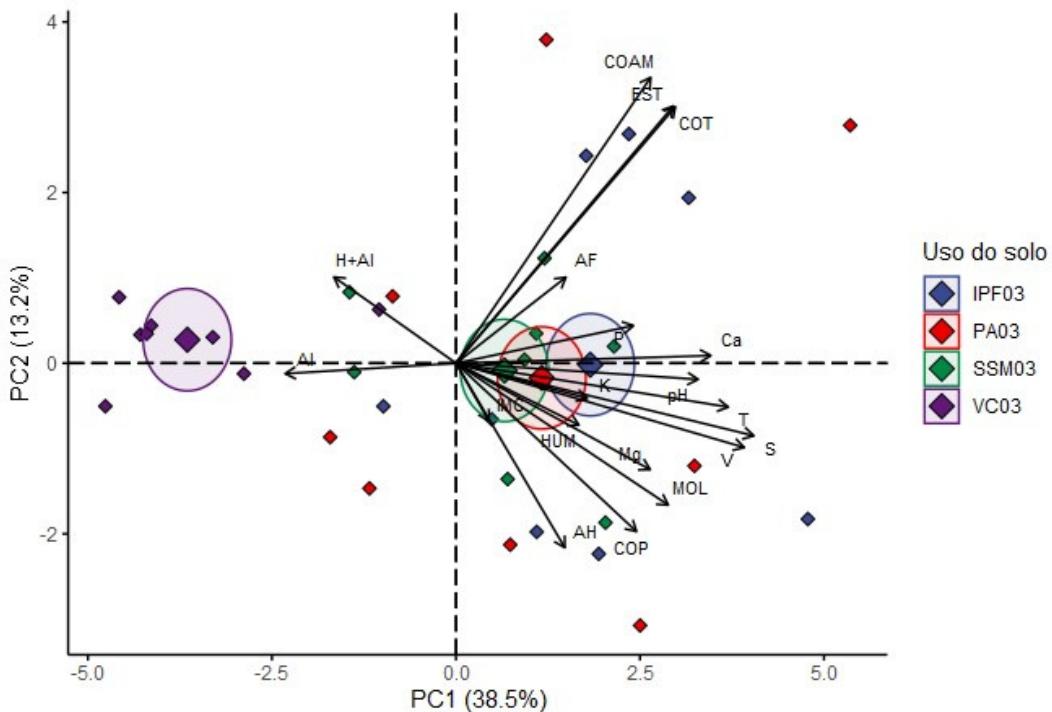


Figura 5. Análises de componentes principais integrando as frações químicas e as frações da matéria orgânica do solo nos diferentes sistemas de uso e manejo do solo na camada de 0-10 cm na área do Instituto Federal Goiano, região do bioma Cerrado Goiano. pH: Acidez ativa; Ca: Cálcio trocável; Mg: Magnésio trocável; Al: Alumínio (Acidez trocável); H+Al: Acidez potencial; K: Potássio trocável; S: Soma das bases; T: Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: Saturação por bases; P: Fósforo disponível; COT: Carbono orgânico total; COP: Carbono orgânico particulado; COAM: Carbono orgânico associado aos minerais; MOL: Matéria orgânica leve em água; AF: Ácido fulvico; AH: Ácido húmico; HUM: Humina; ESTC: Estoque de carbono orgânico total; e IMC: Índice de manejo do carbono.

4.9. Carbono Orgânico Total, Densidade do Solo e Estoque de Carbono

Os teores de carbono orgânico total (COT) apresentaram pouca variação estatística entre os sistemas de uso e manejo das áreas de estudo. Na área BV, os teores de COT variaram de 21,99 a 40,87 g kg⁻¹ na camada de 0-5 cm e de 14,57 a 24,35 g kg⁻¹ na camada de 5-10 cm. Na área ML, os teores variaram de 22,83 a 33,60 g kg⁻¹ na camada de 0-5 cm e 14,62 a 23,44 g kg⁻¹ na camada de 5-10 cm. Para a área IF, os teores variaram de 14,63 a 33,20 g kg⁻¹ e 8,80 a 21,88 g kg⁻¹, nas camadas 0-5 e 5-10 cm, respectivamente (Tabela 6). Apenas na área BV foram verificadas diferenças dos teores de COT, em que os sistemas de ILPF01 e PA01 apresentaram teores de carbono similares aos quantificados em VC01 na camada de 5-10 cm (Tabela 6). Entre os sistemas das áreas ML e IF, destaque para SSM02, SSM03, IPF03 e PA03 que aumentaram os teores de COT em 21 e 60% (SSM02), 68 e 114% (SSM03), 127 e 118% (IPF03), e 84 e 149% (PA03) quando comparados aos seus respectivos sistemas de vegetação nativa, nas camadas 0-5 e 5-10 cm.

Os resultados de estoque de carbono (ESTC) (Tabela 7) são corroborados pelos resultados dos teores de COT (Tabela 6). Somente no sistema de VC01 na área BV verificou-se valores mais elevados de ESTC na camada de 0-5 cm (~ 22 Mg ha⁻¹) (Tabela 7). Pode-se destacar que, apesar de não haver diferença estatística, determinados sistemas das áreas ML e IF proporcionaram aumento nos valores de ESTC em relação à vegetação típica do bioma: o

aumento foi de 22 e 59% em SSM02; 70 e 115% em SS03; 130 e 119% em IPF03; e 85 e 150% em PA03 nas duas camadas avaliada.

Os maiores valores da densidade do solo (Ds), nas áreas BV e ML, foram encontrados em todos os sistemas manejados pelo homem (MS01, ILPF01 e PA01; SSM02, AF02 e PA02), e os menores, nos sistemas de vegetação nativa de Cerrado (VC01 e VC02, respectivamente), independente da profundidade avaliada (Tabela 8). Podendo destacar os sistemas AF02 com os maiores valores em subsuperfície entre os sistemas da área ML. Na área IF, os valores de Ds não diferiram entre seus sistemas, em ambas as profundidades.

4.10. Fracionamento Físico Granulométrico da MOS

Os resultados dos teores de COT, carbono orgânico particulado (COp) e associado aos minerais (Coam) apresentaram o mesmo padrão. Quanto aos teores de COp, estes variaram de 5,03 a 10,53 g kg⁻¹ (0-5 cm) e 3,14 a 6,94 g kg⁻¹ (5-10 cm) na área BV; de 6,80 a 11,17 g kg⁻¹ (0-5 cm) e 1,08 a 6,56 g kg⁻¹ (5-10 cm) na área ML; e 2,21 a 4,92 g kg⁻¹ (0-5 cm) e 0,34 a 2,51 g kg⁻¹ (5-10 cm) na área IF. Quanto aos valores Coam, estes variaram de 14,28 a 30,34 g kg⁻¹ (0-5 cm) e 10,40 a 17,41 g kg⁻¹ (5-10 cm) na área BV; 16,03 a 22,43 g kg⁻¹ (0-5 cm) e 11,63 a 16,89 g kg⁻¹ (5-10 cm) na área ML e 12,42 a 28,29 g kg⁻¹ (0-5 cm) e 8,47 a 20,31 g kg⁻¹ (5-10 cm) na área IF. Sendo observada diferença significativa somente nas áreas BV e ML, principalmente na camada subsuperficial: com maiores teores de COp nos sistemas de SSM02 e PA02 na camada de 5-10 cm; e Coam nos sistemas de VC01 na camada de 0-10 cm, e ILPF01 e PA01 na camada de 5-10 cm (Tabela 6).

Em todas as áreas os valores de Coam foram superiores aos valores de COp entre os sistemas de uso e manejo do solo nas duas camadas. Os teores de COp foram superiores nos sistemas da área ML e inferiores nos sistemas da área IF (Tabela 6). Entretanto, o aumento dos teores de COp nos sistemas da área IF em comparação à vegetação típica do bioma foi de 86% (SSM03), 123% (IPF03) e 68% (PA03) em superfície; e 638% (SSM03), 571% (IPF03) e 362% (PA03) em subsuperfície. Para Coam, o aumento dos teores da fração entre os mesmos sistemas em relação à vegetação nativa foi de 76 e 85% (SSM03), 128 e 100% (IPF03), e 91 e 140% (PA03) nas duas camadas avaliadas.

4.11. Fracionamento Físico Densimétrico da MOS e Matéria Orgânica Leve em Água

Para os teores de carbono na fração leve livre (FLL) da MOS, estes não diferiram entre os sistemas (Tabela 6). Através da análise dos valores de matéria orgânica leve em água (MOL), avaliados quanto sua massa (g), pode se verificar que esta fração orgânica foi mais eficiente em apontar as diferenças entre os sistemas de uso e manejo do solo das áreas, especialmente na camada superficial. Os maiores teores de MOL foram quantificados nos sistemas de pastagens (PA01, PA02 e PA03) em todas as áreas; seguido dos sistemas de ILPF01 na área BV, SSM02 e VC02 na área ML, e IPF03 na área IF na camada superficial de 0-5 cm. Na camada de 5-10 cm, os teores de MOL não diferiram entre os sistemas (Tabela 6).

4.12. Fracionamento Químico da MOS

Em relação aos resultados dos teores de carbono das substâncias húmicas da MOS (Tabela 8), nestes observou-se padrão semelhante aos resultados de COT, COp, Coam e ESTC (Tabelas 6 e 7). Os teores de carbono da fração humina (HUM) e proporção de HUM no COT (HUM/COT) não variaram estatisticamente entre os sistemas. Quanto aos teores de carbono da fração ácido húmico (FAH), apenas nos sistemas de MS01 e ILPF01 da área BV foram verificados maiores teores de FAH na camada de 0-5 cm. Quanto aos teores de carbono da fração ácido fúlvico (FAF), somente nos sistemas de MS01 e ILPF01 na área BV, e VC02 e

PA02 na área ML foram quantificados os teores mais elevados de FAF na camada de 0-5 cm (Tabela 8). As maiores contribuições de FAH e FAF nos teores de COT (FAH/COT e FAF/COT) foram verificadas nos sistemas de MS01 e ILPF01 na área BV (0-5 cm), e VC02 na área ML (0-5 cm) (Tabela 9).

Tabela 6. Teores de carbono e suas respectivas frações físicas e químicas (g kg^{-1}) nos diferentes sistemas de uso e manejo do solo, região do bioma Cerrado goiano.

Uso do Solo	Área BV								
	Camada de 0-5 cm					Camada de 5-10 cm			
	COT ⁽¹⁾	COP ⁽¹⁾	COAM ⁽²⁾	MOL ⁽¹⁾	FLL ⁽²⁾	COT ⁽¹⁾	COP ⁽¹⁾	COAM ⁽¹⁾	MOL ⁽¹⁾
MS01	21,99 b	5,03 a	16,96 b	4,73 b	0,49 a	14,57 b	4,17 a	10,40 b	10,03 a
ILPF01	22,11 b	7,82 a	14,28 b	7,18 ab	0,36 a	17,81 ab	5,67 a	12,14 ab	6,13 a
PA01	22,83 b	6,40 a	16,42 b	13,48 a	0,32 a	18,65 ab	3,14 a	15,68 ab	9,65 a
VC01	40,87 a	10,53 a	30,34 a	9,20 ab	0,83 a	24,35 a	6,94 a	17,41 a	6,30 a
CV %	20,08	46,04	29,11	44,35	96,1	21,69	64,36	20,62	35,64
Área ML									
Uso do Solo	Camada de 0-5 cm					Camada de 5-10 cm			
	COT ⁽¹⁾	COP ⁽¹⁾	COAM ⁽¹⁾	MOL ⁽¹⁾	FLL ⁽²⁾	COT ⁽¹⁾	COP ⁽¹⁾	COAM ⁽¹⁾	MOL ⁽²⁾
	SSM02	33,60 a	11,17 a	22,43 a	20,85 ab	0,67 a	23,44 a	6,56 a	16,89 a	19,45 a
AF02	22,83 a	6,80 a	16,03 a	15,43 b	0,27 a	15,01 a	1,08 b	14,05 a	7,73 a
PA02	30,10 a	10,11 a	19,99 a	48,65 a	1,23 a	16,13 a	4,51 ab	11,63 a	17,48 a
VC02	27,60 a	8,19 a	19,41 a	21,34 ab	1,64 a	14,62 a	2,18 b	12,45 a	14,38 a
CV %	29,78	48,64	36,37	58,58	80,84	31,06	51,90	34,86	71,78
Área IF									
Uso do Solo	Camada de 0-5 cm					Camada de 5-10 cm			
	COT ⁽¹⁾	COP ⁽¹⁾	COAM ⁽¹⁾	MOL ⁽²⁾	FLL ⁽¹⁾	COT ⁽¹⁾	COP ⁽¹⁾	COAM ⁽²⁾	MOL ⁽¹⁾
	SSM03	24,61 a	4,10 a	21,86 a	14,60 bc	0,46 a	18,82 a	2,51 a	15,63 a	7,73 a
IPF03	33,20 a	4,92 a	28,28 a	18,00 ab	0,50 a	19,22 a	2,28 a	16,93 a	11,35 a
PA03	26,87 a	3,71 a	23,75 a	36,73 a	0,65 a	21,88 a	1,57 a	20,31 a	15,20 a
VC03	14,63 a	2,21 a	12,42 a	5,88 c	0,16 a	8,80 a	0,34 a	8,47 a	4,48 a
CV %	53,08	55,57	70,54	53,49	67,43	78,19	78,89	90,46	53,18

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem os sistemas de uso e manejo do solo.

⁽¹⁾ANOVA + Teste de Tukey sem transformação de dados a 5% de significância e ⁽²⁾ANOVA + Teste de Tukey com transformação de dados a 5% de probabilidade. Área BV (01): fazenda Boa Vereda; Área ML (02): fazenda Mata do Lobo; Área IF (03): Instituto Federal Goiano; MS01: Monocultivo de Soja da área BV; ILPF01: Integração Lavoura-Pecuária-Floresta da área BV; PA01: Pastagem da área BV; VC01: Vegetação de Cerrado típico da área BV; SSM02: Sucessão Soja e Milho da área ML; AF02: Agrofloresta da área ML; PA02: Pastagem da área ML; VC02: Vegetação de Cerrado típico da área ML; SSM03: Sucessão Soja e Milho da área IF; IPF03: Integração Pecuária-Floresta da área IF; PA03: Pastagem da área IF; VC03: Vegetação de Cerrado típico da área IF; COT: Carbono orgânico total; COP: Carbono orgânico particulado; COAM: Carbono orgânico associado aos minerais; MOL: Matéria orgânica leve em água; FLL: Fração leve-livre; e CV: Coeficiente de variação.

Tabela 7. Valores de estoque de carbono (Mg ha^{-1}) nos diferentes sistemas de uso e manejo do solo, região do bioma Cerrado Goiano.

Uso do Solo	Área BV		Uso do Solo	Área ML		Uso do Solo	Área IF			
	Estoque C ⁽¹⁾			Estoque C ⁽¹⁾			Estoque C ⁽¹⁾			
	0-5 cm	5-10 cm		0-5 cm	5-10 cm		0-5 cm	5-10 cm		
MS01	12,19 b	8,85 a	SSM02	16,40 a	13,71 a	SSM03	15,80 a	12,08 a		

Continua...

Continuação da Tabela 7.

Uso do Solo	Área BV		Uso do Solo	Área ML		Uso do Solo	Área IF	
	Estoque C ⁽¹⁾	0-5 cm		Estoque C ⁽¹⁾	0-5 cm		Estoque C ⁽¹⁾	0-5 cm
ILPF01	12,27 b	10,71 a	AF02	11,22 a	8,74 a	IPF03	21,45 a	12,29 a
PA01	12,71 b	11,27 a	PA02	14,74 a	9,45 a	PA03	17,22 a	14,09 a
VC01	22,50 a	14,62 a	VC02	13,48 a	8,64 a	VC03	9,31 a	5,62 a
CV %	14,02	23,84	CV %	30,88	27,32	CV %	53,79	78,85

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem os sistemas de uso e manejo do solo. ⁽¹⁾ANOVA + Teste de Tukey sem transformação de dados a 5% de significância e ⁽²⁾ANOVA + Teste de Tukey com transformação de dados a 5% de probabilidade. Área BV (01): fazenda Boa Vereda; Área ML (02): fazenda Mata do Lobo; Área IF (03): Instituto Federal Goiano; MS01: Monocultivo de Soja da área BV; ILPF01: Integração Lavoura-Pecuária-Floresta da área BV; PA01: Pastagem da área BV; VC01: Vegetação de Cerrado típico da área BV; SSM02: Sucessão Soja e Milho da área ML; AF02: Agrofloresta da área ML; PA02: Pastagem da área ML; VC02: Vegetação de Cerrado típico da área ML; SSM03: Sucessão Soja e Milho da área IF; IPF03: Integração Pecuária-Floresta da área IF; PA03: Pastagem da área IF; VC03: Vegetação de Cerrado típico da área IF; e CV: Coeficiente de variação.

Tabela 8. Valores da densidade do solo (Ds) (Mg m^{-3}) nos diferentes sistemas de uso e manejo do solo, região do bioma Cerrado goiano.

Uso do Solo	Área BV		Uso do Solo	Área ML		Uso do Solo	Área IF	
	Ds ⁽¹⁾	0-5 cm		Ds ⁽¹⁾	0-5 cm		Ds ⁽¹⁾	0-5 cm
MS01	1,28 a	1,34 a	SSM02	1,22 a	1,36 b	SSM03	1,25 a	1,23 a
ILPF01	1,30 a	1,23 a	AF02	1,31 a	1,51 a	IPF03	1,34 a	1,33 a
PA01	1,30 a	1,31 a	PA02	1,24 a	1,39 ab	PA03	1,33 a	1,34 a
VC01	1,12 b	1,21 a	VC02	0,98 b	1,18 c	VC03	1,28 a	1,28 a
CV%	6,11	8,25	CV%	7,15	4,78	CV%	6,31	6,85

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem os sistemas de uso e manejo do solo. ⁽¹⁾ANOVA + Teste de Tukey sem transformação de dados a 5% de significância e ⁽²⁾ANOVA + Teste de Tukey com transformação de dados a 5% de probabilidade. Área BV (01): fazenda Boa Vereda; Área ML (02): fazenda Mata do Lobo; Área IF (03): Instituto Federal Goiano; DS: Densidade do Solo; MS01: Monocultivo de Soja da área BV; ILPF01: Integração Lavoura-Pecuária-Floresta da área BV; PA01: Pastagem da área BV; VC01: Vegetação de Cerrado típico da área BV; SSM02: Sucessão Soja e Milho da área ML; AF02: Agrofloresta da área ML; PA02: Pastagem da área ML; VC02: Vegetação de Cerrado típico da área ML; SSM03: Sucessão Soja e Milho da área IF; IPF03: Integração Pecuária-Floresta da área IF; PA03: Pastagem da área IF; VC03: Vegetação de Cerrado típico da área IF; e CV: Coeficiente de variação.

Tabela 9. Teores de carbono das substâncias húmicas e suas proporções em relação ao carbono orgânico total (COT) (g kg^{-1} e %) nos diferentes sistemas de uso e manejo do solo, região do bioma Cerrado Goiano.

Uso do solo	Área BV					
	0-5 cm					
	HUM ⁽¹⁾	FAH ⁽³⁾	FAF ⁽²⁾	HUM/COT% ⁽¹⁾	FAH/COT% ⁽¹⁾	FAF/COT% ⁽²⁾
MS01	1,56 a	4,24 a	7,66 a	6,88 a	19,64 a	35,67 a
ILPF01	1,30 a	4,81 a	8,27 a	5,65 a	22,08 a	37,49 a
PA01	2,00 a	2,39 a	6,25 ab	5,32 a	6,49 b	14,61 b
VC01	2,14 a	3,21 a	2,45 b	9,50 a	14,40 ab	10,85 b
CV %	49,96	40,73	41,71	52,11	31,75	38,47
5-10 cm						
	HUM ⁽¹⁾	FAH ⁽¹⁾	FAF ⁽¹⁾	HUM/COT% ⁽¹⁾	FAH/COT% ⁽²⁾	FAF/COT% ⁽²⁾
MS01	1,34 a	4,04 a	6,96 a	10,36 a	27,74 a	44,89 a

Continua...

Continuação da Tabela 9.

Uso do solo	Área BV					
	0–5 cm			HUM ⁽¹⁾	FAH/COT% ⁽¹⁾	FAF/COT% ⁽²⁾
	HUM ⁽¹⁾	FAH ⁽³⁾	FAF ⁽²⁾			
ILPF01	1,78 a	3,41 ab	6,08 a	9,85 a	19,48 b	33,30 a
PA01	2,62 a	1,88 b	3,76 a	11,43 a	9,02 c	15,11 a
VC01	2,29 a	2,11 b	2,23 a	13,18 a	11,44 bc	12,31 a
CV %	32,38	31,39	58,74	50,72	28,09	54,67
Área ML						
	0–5 cm			HUM ⁽¹⁾	FAH/COT% ⁽¹⁾	FAF/COT% ⁽¹⁾
	HUM ⁽³⁾	FAH ⁽¹⁾	FAF ⁽²⁾			
	SSM02	2,86 a	2,95 a	2,26 bc	8,91 a	8,61 a
AF02	1,56 a	3,98 a	1,61 c	7,84 a	19,27 a	7,82 b
PA02	2,66 a	3,54 a	3,48 ab	9,37 a	12,60 a	12,95 ab
VC02	2,38 a	3,82 a	5,17 a	8,72 a	13,92 a	18,55 a
CV %	28,14	32,66	29,42	36,59	40,52	36,63
5–10 cm						
	HUM ⁽¹⁾	FAH ⁽¹⁾	FAF ⁽¹⁾	HUM/COT% ⁽¹⁾	FAH/COT% ⁽¹⁾	FAF/COT% ⁽¹⁾
	SSM02	2,51 a	3,20 a	2,74 a	10,49 a	14,00 a
	AF02	1,25 a	1,59 a	2,23 a	9,07 a	12,11 a
PA02	2,20 a	2,66 a	3,15 a	14,7 a	16,97 a	19,01 a
VC02	2,33 a	2,56 a	3,53 a	17,06 a	17,39 a	24,01 a
CV %	35,80	53,68	40,08	42,38	55,40	39,30
Área IF						
	0–5 cm			HUM ⁽¹⁾	FAH/COT% ⁽¹⁾	FAF/COT% ⁽¹⁾
	HUM ⁽¹⁾	FAH ⁽¹⁾	FAF ⁽¹⁾			
	SSM03	2,55 a	2,86 a	3,20 a	10,41 a	11,86 a
IPF03	2,55 a	2,76 a	3,53 a	9,54 a	11,61 a	12,88 a
PA03	2,02 a	2,30 a	3,22 a	9,94 a	14,07 a	14,59 a
VC03	2,09 a	2,14 a	2,79 a	15,69 a	17,13 a	19,93 a
CV %	29,32	42,59	49,38	49,03	69,67	45,71
Camada de 5–10 cm						
	HUM ⁽¹⁾	FAH ⁽¹⁾	FAF ⁽¹⁾	HUM/COT% ⁽¹⁾	FAH/COT% ⁽³⁾	FAF/COT% ⁽¹⁾
	SSM03	2,24 a	2,15 a	2,90 a	12,95 a	12,51 a
	IPF03	2,02 a	2,75 a	3,00 a	13,95 a	19,6 a
PA03	1,96 a	2,26 a	3,19 a	17,09 a	23,35 a	27,73 a
VC03	2,02 a	1,48 a	3,14 a	24,75 a	16,78 a	37,74 a
CV %	20,36	32,46	17,20	54,27	69,33	54,54

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem os sistemas de uso e manejo do solo.

⁽¹⁾ANOVA + Teste de Tukey sem transformação de dados a 5% de significância e ⁽²⁾ANOVA + Teste de Tukey com transformação de dados a 5% de probabilidade. Área BV (01): fazenda Boa Vereda; Área ML (02): fazenda Mata do Lobo; Área IF (03): Instituto Federal Goiano; MS01: Monocultivo de Soja da área BV; ILPF01: Integração Lavoura-Pecuária-Floresta da área BV; PA01: Pastagem da área BV; VC01: Vegetação de Cerrado típico da área BV; SSM02: Sucessão Soja e Milho da área ML; AF02: Agrofloresta da área ML; PA02: Pastagem da área ML; VC02: Vegetação de Cerrado típico da área ML; SSM03: Sucessão Soja e Milho da área IF; IPF03: Integração Pecuária-Floresta da área IF; PA03: Pastagem da área IF; VC03: Vegetação de Cerrado típico da área IF; HUM: Carbono da fração humina; FAH: Carbono da fração ácido húmico; FAF: Carbono da fração ácido fúlvico; e CV: Coeficiente de variação.

4.13. Índices de Manejo da MOS

Quanto aos índices de manejo de carbono foram avaliados a Labilidade (Lab), o índice de Labilidade (ILab), Índices de Estoque do Carbono (IEC) e o Índice de Manejo do Carbono (IMC) para as diferentes áreas (Tabela 9).

De modo geral, não foram observadas diferenças em todos os parâmetros analisados (Tabela 9). Na área BV, verificou-se que o sistema de ILPF01 apresentou os valores mais altos para o IMC (16 e 130) em ambas as camadas. Na área ML, os maiores valores IMC foram

verificados nos sistemas SSM02 e PA02, sendo os valores superiores à vegetação típica do bioma na camada subsuperficial (259 e 189, respectivamente). Destaque para os sistemas localizados na área IF nos quais foram observados valores elevados de IMC, principalmente na camada subsuperficial: 346 e 1091 em SSM03; 26 e 1464 em IPF03; e 199 e 1103 em PA03, nas camadas de 0–5 e 5–10 cm (Tabela 10).

Tabela 10. Índices de manejo da matéria orgânica do solo nos diferentes sistemas de uso e manejo do solo, região do bioma Cerrado Goiano.

Uso do Solo	Área BV							
	0–5 cm				5–10 cm			
	Lab ⁽¹⁾	ILab ⁽²⁾	IEC ⁽¹⁾	IMC ⁽¹⁾	Lab ⁽²⁾	ILab ⁽¹⁾	IEC ⁽¹⁾	IMC ⁽¹⁾
MS01	0,32 a	0,86 a	0,55 a	47,02 a	0,50 a	1,12 a	0,63 a	67,86 a
ILPF01	0,61 a	2,38 a	0,56 a	116,66 a	0,47 a	1,61 a	0,79 a	130,24 a
PA01	0,45 a	1,51 a	0,58 a	84,79 a	0,20 a	0,57 a	0,81 a	46,84 a
CV %	56,64	81,57	20,84	69,65	89,04	61,21	38,8	62,67
VC01	0,39	1,00	1,00	100	0,40	1,00	1,00	100
Área ML								
	0–5 cm				5–10 cm			
	Lab ⁽¹⁾	ILab ⁽¹⁾	IEC ⁽¹⁾	IMC ⁽¹⁾	Lab ⁽¹⁾	ILab ⁽¹⁾	IEC ⁽¹⁾	IMC ⁽¹⁾
	SSM02	0,51 a	0,77 a	1,23 a	93,92 a	0,39 a	1,60 a	1,71 a	259,18 a
AF02	0,44 a	0,72 a	0,83 a	56,31 a	0,14 a	0,58 a	1,09 a	43,75 b
PA02	0,57 a	0,94 a	1,12 a	90,07 a	0,42 a	1,78 a	1,17 a	189,46 ab
CV %	40,70	51,29	35,57	4,72	53,66	60,83	43,31	56,62
VC02	0,67	1,00	1,00	100,00	0,25	1,00	1,00	100,00
Área IF								
	0–5 cm				5–10 cm			
	Lab ⁽¹⁾	ILab ⁽¹⁾	IEC ⁽¹⁾	IMC ⁽¹⁾	Lab ⁽¹⁾	ILab ⁽¹⁾	IEC ⁽¹⁾	IMC ⁽¹⁾
	SSM03	0,30 a	1,66 a	1,87 a	346,24 a	0,22 a	5,50 a	2,24 a
IPF03	0,26 a	2,03 a	2,56 a	326,95 a	0,22 a	9,76 a	2,21 a	1464,75 a
PA03	0,29 a	2,14 a	2,20 a	199,03 a	0,24 a	9,85 a	2,39 a	1103,58 a
CV %	93,02	109,97	71,32	89,64	120,37	135,95	70,39	88,93
VC03	0,20	1,00	1,00	100,00	0,05	1,00	1,00	100,00

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem os sistemas de uso e manejo do solo.

⁽¹⁾ANOVA + Teste de Tukey sem transformação de dados a 5% de significância e ⁽²⁾ANOVA + Teste de Tukey com transformação de dados a 5% de probabilidade. Área BV (01): fazenda Boa Vereda; Área ML (02): fazenda Mata do Lobo; Área IF (03): Instituto Federal Goiano; MS01: Monocultivo de Soja da área BV; ILPF01: Integração Lavoura-Pecuária-Floresta da área BV; PA01: Pastagem da área BV; VC01: Vegetação de Cerrado típico da área BV; SSM02: Sucessão Soja e Milho da área ML; AF02: Agrofloresta da área ML; PA02: Pastagem da área ML; VC02: Vegetação de Cerrado típico da área ML; SSM03: Sucessão Soja e Milho da área IF; IPF03: Integração Pecuária-Floresta da área IF; PA03: Pastagem da área IF; VC03: Vegetação de Cerrado típico da área IF; Lab: Labilidade; ILab: Índice de labilidade; IEC: Índice de estoque de carbono; IMC: Índice de manejo do carbono; e CV: Coeficiente de variação.

5. DISCUSSÃO

5.1. Influência dos Sistemas de Produção nos Valores de Acidez Ativa

Em geral, os valores de pH em água foram semelhantes quando comparados com outros trabalhos desenvolvidos em diversas áreas de cerrado (FONTANA et al., 2006; LOSS et al., 2012 e 2013; ROSSI et al., 2012; GAZOLLA et al., 2015), onde sempre os sistemas de uso de vegetação nativa apresentaram os valores menores, com exceção aos encontrados nos sistemas MS01 (que foi muito baixo para uma área manejada) e em VC01 (que foi muito elevado para uma área de vegetação nativa) da área BV. Esses menores valores no sistema MS01 pode ser justificado por algum equívoco no manejo deste sistema, como pela não realização da prática da calagem, ou pelo fato do calcário utilizado não apresentar qualidade devida, entre outros. Já os maiores valores no sistema VC01 também pode ser explicado por uma série de fatores, como: a natureza do material de origem desse solo, a ciclagem de nutrientes que está ocorrendo devido a fitofisionomia presente nas áreas, ou devido a queima, prática comum no bioma, que essa área sofreu.

Os maiores valores de pH observados nos sistemas de ILPF01 e PA01 da área BV, SSM02, AF02 e PA02 da área ML e SSM03, IPF03 e PA03 da área IF podem estar associados, principalmente, ao manejo do solo, devido à aplicação e incorporação de calcário antes da implantação das culturas (OLIVEIRA et al., 2017). Esse aumento nos valores de pH traz benefícios como a neutralização do Al^{3+} e o aumento da disponibilidade de P (LOSS et al., 2013).

Por outro lado, os menores valores de pH (elevada acidez) verificados nos sistemas de VC02 e VC03, podem ser reflexos da condição natural dos solos da região, caracterizada por altos teores de Al^{3+} . Os baixos valores no pH são características típicas dos solos do Cerrado, em especial dos Latossolos, quando não são submetidos à calagem e encontram-se em condições naturais (LOSS et al., 2012).

5.2. Influência dos sistemas de produção nos teores dos cátions trocáveis

Os elevados teores dos íons Ca^{2+} e Mg^{2+} podem ser atribuídos ao uso de calcário nas áreas, sendo que a variação da relação Ca/Mg pode variar de acordo com o tipo de calcário utilizado (calcítico ou dolomítico) (LOSS et al., 2012). Em contrapartida, os menores teores de Ca^{2+} observados nos sistemas VC02 e VC03 das áreas ML e IF, respectivamente são em decorrência da ausência de manejo da fertilidade do solo, visto que não houve aplicação de corretivos nestes sistemas.

Os elevados teores de Ca^{2+} , além da prática da calagem, também podem ser atribuídos à ciclagem do cálcio através da decomposição dos resíduos vegetais. Os maiores teores de Mg^{2+} nos sistemas manejados em comparação aos sistemas não antropizados podem estar relacionados também a ciclagem e renovação do sistema radicular da braquiária em maiores profundidades (BEUTLER et al., 2016).

Os maiores teores de Ca^{2+} nas camadas superficiais podem ser atribuídos tanto a calagem nas áreas manejada e a decomposição e liberação deste nutriente presente nos resíduos vegetais, bem como devido a ciclagem de nutrientes nas áreas de cerrado (SIQUEIRA NETO et al., 2009; OLIVEIRA et al., 2017). Verifica-se em profundidade uma diminuição dos teores de Ca, e outro possível fator para esse padrão pode ser atribuído a mobilidade deste elemento.

Em profundidade, além da calagem, os teores mais elevados Ca^{2+} e Mg^{2+} podem ser resultantes do transporte por ácidos orgânicos de baixo peso molecular, os quais são formados durante a decomposição de plantas de cobertura, como a braquiária em sistemas integrados de produção e o milheto em sistemas consorciados (LOSS et al., 2012). A maior produção de

matéria seca dessas plantas resulta em uma ciclagem de nutrientes mais intensa e, consequentemente, em maiores contribuições de Ca^{2+} e Mg^{2+} ao solo (TORRES, et al., 2012).

Segundo Pavinato e Rosolem (2008), um dos principais mecanismos que contribuem para a eficácia da correção da acidez do solo por meio da aplicação superficial de calcário é a presença de ácidos hidrossolúveis de baixo peso molecular. Segundo esses autores, esses compostos, originados pela decomposição dos resíduos de plantas de cobertura, podem interagir com a fase sólida do solo e ocupar os sítios de adsorção de nutrientes, competindo diretamente com esses elementos e aumentando sua disponibilidade no solo. A existência desses compostos tem o potencial de intensificar o impacto da calagem, mobilizando a chamada frente alcalina, com a capacidade de complexar Ca^{2+} e Mg^{2+} , elevando o pH e neutralizando o Al^{3+} em profundidade.

5.3. Influência dos sistemas de produção nos valores de potássio trocável

Os maiores teores de K^+ verificados, quando comparados com o sistema VC, são resultado, principalmente, do manejo das adubações realizadas nas áreas agrícolas (LOSS et al., 2012). Além disso, nos sistemas em consórcio, o K pode ser adicionado devido a ciclagem de nutrientes, provenientes da serapilheira, uma vez que plantas mais velhas contribuem de forma mais acentuada para o fornecimento deste nutriente devido a maior queda de folhas e consequente formação de matéria orgânica (BEUTLER et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2017). Adicionalmente o K não está ligado estruturalmente ao tecido vegetal, sendo mais facilmente liberado pelo processo de decomposição.

5.4. Influência dos Sistemas de Produção nos Valores de Acidez Trocável e Acidez Potencial

Os maiores teores de Al^{3+} foram verificados em VC02 e VC03 em comparação aos demais sistemas de uso. Esse padrão se deve principalmente ao fato dos solos serem solos originalmente distróficos e, por estas áreas não terem sido submetidas a nenhum tipo de intervenção antrópica (OLIVEIRA et al., 2017), ou seja, estas características são observadas em condições naturais nos solos da região (LOSS et al., 2012). Por outro lado, os menores valores destes elementos podem ser atribuídos ao manejo da fertilidade do solo, mais especificamente aos efeitos proporcionados pela elevação do pH, na neutralização do Al.

Em contrapartida, no que diz respeito aos valores observados em H+Al, a menor acidez potencial registrada nos sistemas PA01 da área BV, SSM02 da área ML e PA03 da área IF, em superfície (camada 0-10 cm), ocorreu devido à aplicação de calcário. Este insumo, fornece ânions OH e HCO_3^- , que são receptores de H^+ , liberando assim os coloides disponíveis para a ligação de Ca^{2+} e Mg^{2+} , onde anteriormente eram ocupados por H^+ e Al^+ (OLIVEIRA et al., 2017).

5.5. Influência dos Sistemas de Produção nos Teores de Fósforo Disponível

Os maiores teores de P foram observados nos sistemas manejados, com destaque para AF02 (0-10 cm) e SSM02 e PA02 (5-10 cm) da área ML; e IPF03, SSM03 e PA03 da área IF. Os valores estão relacionados principalmente com as aplicações de fertilizantes fosfatados e à manutenção de resíduos culturais na superfície do solo. É importante salientar que todos esses sistemas são SPD, embora com baixa formação de palhada (OLIVEIRA et al., 2017). Adicionalmente, o sistema radicular da braquiária (sistema PA) e a cultura do eucalipto (sistema IPF03) favorecem a ciclagem de P no solo, proporcionado maior disponibilidade de P para as culturas (BEUTLER et al., 2016).

Por outro lado, os baixos teores de P nos solos de cerrado são causados pela fixação/adsorção deste elemento neste tipo de solo. A mineralogia dos solos de cerrado é predominantemente formada por caulinita e óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, resultando em grande quantidade de cargas positivas no solo. A presença destas cargas contribui para a adsorção e, posteriormente, fixação do ânion de P (FONTANA et al., 2006; OLIVEIRA et al., 2017).

Os maiores valores de P na camada superficial nos sistemas integrados de produção da área ML (AF02) e da área IF (IPF03) pode ser atribuída à aplicação parcelada de fósforo na superfície, juntamente com a ausência de revolvimento do solo. Outro aspecto a ser destacado é a baixa mobilidade desse elemento no solo (SIQUEIRA NETO et al., 2009).

5.6. Saturação por Bases (V%)

Quanto aos resultados da saturação por bases (V%), estes foram mais elevados nos sistemas manejados, pois as práticas de calagem e adubação proporcionam valores mais elevados de bases trocáveis, paralelo ao aumento do pH e redução dos valores de H+Al.

Analisando somente as duas primeiras camadas, os valores de V% foram superiores a 50%, indicando uma elevada saturação por bases somente no sistema de PA01 da área BV, e em todos sistemas da área ML e IF, sendo exceção a esse padrão os sistemas de usoVC02 e VC03, respectivamente. Estes resultados destacam a necessidade, principalmente na área BV, da realização de correções e adubações antes da implantação de culturas (OLIVEIRA et al., 2017).

5.7. Carbono Orgânico Total, Densidade do Solo e Estoque de Carbono

Os elevados teores de COT quantificados no sistema de VC01 podem ser atribuídos à considerável entrada de resíduos vegetais na superfície do solo, resultante da presença da vegetação local, e à ausência de intervenção antrópica. Em ambientes ecologicamente estáveis, especialmente em solos com cobertura vegetal nativa pouco impactada pela atividade humana, a taxa de incorporação de carbono orgânico provenientes de resíduos vegetais e sua transformação em MOS equivale, geralmente, às perdas na forma de CO₂ pela mineralização (CASTELLANO et al., 2015), um processo impulsorado pela atividade microbiana na MOS (GAZOLLA et al., 2015). Esses resultados corroboram com os verificados nos estudos de Silva et al. (2011); Loss et al. (2011); Nanzer et al. (2019) e Oliveira et al. (2023) que observaram valores mais elevados de COT em áreas de vegetação nativa em comparação com áreas de SPD e ILP.

Já os baixos teores de COT verificados em VC02 e VC03 podem estar relacionados por se tratarem de uma área de mata em processo de regeneração natural. O componente mata trata-se de fragmentos de cerrado considerados do tipo Cerrado Ralo, com pouca composição arbórea e muitas porções de solos expostos, ou seja, sem cobertura vegetal na sua superfície.

Pode-se inferir que os elevados teores de COT observados nas camadas de 5-10 cm nos sistemas de ILPF01 e PA01, semelhantes aos verificados em VC01, são resultados de introdução de espécies forrageiras nesses sistemas. Em outras palavras, as forrageiras têm a capacidade de acumular mais biomassa vegetal em comparação com as culturas agrícolas, cuja fitomassa frequentemente não é suficiente para manter uma cobertura adequada do solo (LOSS et al., 2011a). Conforme destacado por Franzluebbers & Stuedemann (2008), as pastagens, sejam elas isoladas ou integradas, propiciam um aumento nos teores de carbono devido ao significativo desenvolvimento vegetativo, tanto na parte aérea quanto nas raízes.

Quanto ao aumento percentual dos teores de COT observados nos sistemas de SSM02, SSM03 e IPF03 em comparação com seus respectivos sistemas de vegetação nativa, esse padrão

pode ser atribuído ao cultivo consorciado de milho com braquiária (principalmente nos sistemas de SSM em que são manejados sob SPD, embora com baixa formação de palhada). Essa prática não apenas promove a deposição de resíduos culturais que degradam mais lentamente, mas também contribui para maiores aportes de matéria orgânica por meio do sistema radicular das gramíneas (milho e braquiária), destacando-se a braquiária devido ao seu sistema radicular bem desenvolvido e distribuído ao longo do perfil do solo (SALTON, 2011).

A utilização de diferentes culturas em associação com o SPD pode desempenhar um papel significativo no incremento dos estoques de carbono em Latossolos de textura argilosa (FERREIRA et al., 2022). Essa constatação é respaldada pelos resultados obtidos no presente estudo, os quais indicaram que a adoção dos sistemas com sucessão soja/milho (SSM02 e SSM03), bem como a incorporação de forrageiras no sistema (IPF03), resultaram em aumentos consideráveis nos estoques de carbono no solo.

As maiores reservas de carbono identificadas no sistema de IPF03 estão, provavelmente, associadas à considerável assimilação de C pela cultura do eucalipto. Estudos realizados por Silva et al. (2015) anteriores indicam que cada planta de eucalipto com 5 anos tem a capacidade de fixar aproximadamente 39 kg de C em seus rebentos. Essa notável capacidade de fixação de C pelas plantas de eucalipto pode, portanto, contribuir significativamente para o aumento dos estoques de carbono na camada superficial do solo, especialmente na camada de 0-10 cm (RIBEIRO et al., 2023).

É importante ressaltar que o acúmulo de C pode variar regionalmente devido às condições climáticas (CARVALHO et al., 2010), ao tipo de solo (PEREIRA et al., 2010), ao manejo aplicado e, sobretudo, em função do tempo de adoção de cada sistema (CARVALHO et al., 2009).

Já em relação aos valores de Ds, esse padrão pode ter decorrido do manejo realizado nos sistemas, com uso de máquina agrícolas para o plantio (somente na área de semeadura) e colheita, contribuindo para os maiores valores de Ds nas áreas cultivadas em comparação aos menores valores nos sistemas de vegetação nativa do Cerrado, que não foram submetidas à ação antrópica. Estes resultados corroboram os obtidos por Loss et al. (2012).

Os baixos valores de Ds observados nos sistemas manejados, como SSM02 em subsuperfície, podem ser atribuídos à utilização da braquiária, que possui um sistema radicular bem desenvolvido, contribuindo, assim, para um maior apor de MOS (LOSS et al., 2011). Desta forma, pode-se inferir que provavelmente houve aumento da porosidade do solo e, consequentemente, uma redução dos valores de Ds.

5.8. Fracionamento Físico Granulométrico da MOS

Um fator que pode contribuir para a similaridade nos resultados de COT, COp e Coam pode ser o curto período de implantação das culturas e sistemas de manejo. Com um tempo mais prolongado de manejo das áreas, é esperada uma maior estabilidade e equilíbrio entre os compartimentos da MOS e sua funcionalidade no solo (ROSSI et al., 2012).

Os elevados teores de COp registrados nos sistemas de SSM02 e PA02 na camada 5-10 cm da área ML, assim como nos sistemas da área IF na camada 0-10 cm (SSM03, IPF03 e PA03), em comparação à vegetação típica do bioma, podem estar associados à distribuição do sistema radicular da forrageira braquiária, principalmente em camadas subsuperficiais (MOREIRA & SIQUEIRA, 2002). Essa relação entre a presença da braquiária e a fração COp está relacionada ao material vegetal recém incorporado ao solo. Outra explicação plausível pode ser atribuída à combinação do cultivo de milho com a presença da braquiária, um manejo que promove maior aporte e uma eficaz manutenção de resíduos vegetais tanto na superfície quanto em profundidade. Resultados similares foram observados por Loss et al. (2011) e Rossi et al.

(2012), que identificaram teores mais elevados de COp nas áreas de ILP em comparação com SPD em Latossolo Vermelho no estado de Goiás.

O aumento nos teores dos teores Coam nos sistemas de ILPF01 e PA01, especialmente na camada de 5-10 cm, é resultado do significativo aporte de resíduos vegetais de gramíneas, combinado com a textura argilosa do solo. As gramíneas, devido à sua maior relação C/N e lignina/N, proporcionam uma decomposição mais gradual dos resíduos, contribuindo assim para o acúmulo de carbono associado a partículas de argila e silte, formando complexos organominerais (SILVA & MENDONÇA, 2007). De acordo com Loss et al. (2011), a incorporação da braquiária na ILP pode criar condições mais propícias para formação de microagregados, em conjunto com os óxidos de Fe e Al presentes na fração argila, promovendo aumento das proporções de microagregados associados a maiores teores de Coam protegido.

Os maiores teores de Coam nos sistemas de VC01 da área BV, especialmente na camada 0-10 cm, resultam, em parte, dos valores mais elevados de COT nessa área. Além disso, a ausência de revolvimento do solo contribui para a estabilização da matéria orgânica na fração mineral. Resultados semelhantes foram observados por Loss et al. (2011) e Rossi et al. (2012) ao avaliarem áreas de SPD com e sem ILP em um Latossolo Vermelho no estado de Goiás, onde os autores verificaram teores mais elevados de Coam nas áreas de vegetação nativa em comparação com outros sistemas de uso e ocupação do solo.

O aumento dos teores de Coam nos sistemas da área IF, especialmente na camada de 0-10 cm, pode ser atribuído ao significativo aporte de resíduos vegetais nesses sistemas em comparação com a vegetação nativa. Isso ocorre devido ao fato de que a VC03 da área IF representa um fragmento de mata impactado em que grande parte dos componentes arbóreos foram retirados.

5.9. Matéria Orgânica Leve em Água (MOL)

A MOL pode ser considerada uma fração de rápida dinâmica no solo, tornando sua manutenção crucial para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, dada sua capacidade elevada de ciclagem de nutrientes no curto e médio prazo (PEREIRA et al., 2010). Isso pode justificar a maior eficiência dessa fração em diferenciar os sistemas das áreas estudadas, especialmente nos sistemas de pastagens. Estes sistemas recebem destaque dos demais devido à significativa contribuição dessa fração da MOS por meio da rizodeposição e biomassa de raízes (PEREIRA et al., 2010).

A manutenção da MOL é essencial para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, pois, em curto prazo, ela apresenta elevado potencial para ciclagem de nutrientes (RONI et al., 2012). Os maiores valores de MOL nos sistemas de ILPF01 da área BV, SSM02 e VC02 da área ML, e IPF03 da área IF (na camada 0-5 cm), sugere que esses resultados estão diretamente ligados à quantidade e qualidade dos resíduos vegetais adicionados ao solo. Resíduos vegetais com diferentes relações C/N aumentam a recalcitrância da MOL, contribuindo para o acúmulo de C ao longo do tempo de adoção desses sistemas (RONI et al., 2012).

5.10. Fracionamento Químico da MOS

Diferindo do observado neste estudo, onde a fração HUM (considerada a mais estável) não apresentou diferença estatística, vários trabalhos realizados em solos localizados em condições de clima tropical indicam o predomínio do carbono na fração HUM em comparação com outras frações (ASSIS et al., 2006; BARRETO et al., 2008; LOSS et al., 2009; ROSSI et al., 2012). Esse resultado pode ser explicado pelo curto período de implementação dos sistemas, o que não proporcionou condições para o aumento dos teores de C nessa fração. A formação da

fração HUM, entre outros fatores, requer uma ação prolongada dos organismos do solo, com destaque da atividade microbiana, ao longo do tempo (GAZOLLA et al., 2015).

Quanto aos valores observados nas frações FAH e FAF nos sistemas MS01 e ILPF01 da área BV podem ser atribuídos à maior produção de resíduos vegetais com relação C/N mais elevada. Esses resíduos apresentam uma decomposição mais lenta, favorecendo o aumento dessas frações no solo em um curto período (MENDONÇA et al., 2007). Outra justificativa, incluindo os altos valores da fração FAF no sistema PA02 da área ML, pode ser atribuída ao sistema radicular das gramíneas e à textura do solo. Esses fatores, quando em contato com as partículas minerais, contribuem para a formação das frações FAH e FAF. (ROSSI et al., 2011).

O padrão semelhante observado nos teores de COT, COp, Coam e ESTC com as frações das substâncias húmicas nas áreas pode ser decorrente do manejo adotado e do tempo de implementação dos sistemas. É conhecido que o acúmulo de carbono em SPD ocorre de maneira bastante gradual, levando de 10 a 15 anos para se tornar expressivo (CARVALHO et al., 2009).

A prática de rotação de culturas e a manutenção dos resíduos culturais na superfície do solo promovem uma decomposição mais lenta do material vegetal depositado. Com o passar do tempo, esse tipo de manejo tende a levar à estabilização da MOS, resultando em melhorias dos atributos químicos e físicos do solo (GAZOLLA et al., 2015).

5.11. Índices de Manejo do Carbono

O IMC avalia as alterações nos estoques de carbono, considerando aspectos da labilidade do carbono no solo (NICOLOSO et al., 2005). Valores de IMC inferiores a 100 indicam práticas que podem ser prejudiciais à manutenção da matéria orgânica e à qualidade do solo (ROSSI et al., 2012). Dessa forma, observa-se que os sistemas de ILPF01 da área BV, SSM02 e PA02 da área ML (em subsuperfície) e todos os sistemas da área IF demonstram um efeito positivo do manejo adotado no aumento do conteúdo de carbono no solo. Assim como os sistemas de manejo da área IF (SSM03, IPF03 e PA03) que apresentaram valores mais elevados de IMC, principalmente na camada subsuperficial.

No sistema ILPF01 da área BV, em ambas as camadas, observou-se um efeito positivo no aumento dos teores de carbono no solo, com valores mais elevados de IMC em comparação com os demais sistemas. Esse padrão indica que esse sistema está promovendo um acúmulo mais efetivo de carbono no solo em comparação aos demais sistemas (ROSSI et al., 2012).

Valores elevados de IMC nos sistemas SSM podem ser atribuídos ao uso constante de leguminosas, conforme também relatado por Blair e Crocker (2000), Diekow et al. (2005) e Blair et al. (2006). Esses estudos observaram aumentos nos valores de IMC quando leguminosas foram introduzidas nas rotações de culturas, indicando o potencial positivo dessas práticas para o acúmulo de C no solo.

Ao contrário dos resultados apresentados neste estudo, Salton (2005) observou valores mais elevados de IMC nos sistemas com a presença de pastagem. No trabalho de Salton, os sistemas de pastagem permanente (*Brachiaria decumbens*) apresentaram um IMC de 137, enquanto os sistemas integrados de produção (soja-braquiária) registraram um IMC de 104. Esses valores superaram a área de referência e os sistemas exclusivamente com lavouras anuais. O padrão observado pelo autor pode ser atribuído a diferenças nas práticas de manejo, tipos de solo, condições climáticas e outros fatores específicos de cada estudo.

5.12. Dissimilaridade entre os Sistemas de Uso e Manejo do solo e as Áreas de Vegetação Típica do Bioma Cerrado

Os resultados das análises de componentes principais (ACPs) contribuíram para o entendimento do padrão de separação e agrupamento das formas de uso e manejo das terras, com base nos atributos químicos e teores das frações das MOS da “camada arável” (Figura 3, 4 e 5). Na área BV, os sistemas de produção e o ambiente não antropizado estão posicionados nos quatro diferentes quadrantes da ACP, a saber: MS01 está localizado no quadrante superior esquerdo; ILPF01 encontra-se posicionado no quadrante inferior esquerdo; PA01 está localizado no quadrante inferior direito; e VC01 encontra-se posicionado no quadrante superior direito (Figura 3). Esses resultados indicam que as formas de uso e manejo das terras estão promovendo modificações distintas nos atributos químicos associados a fertilidade do solo, bem como na compartmentalização da MOS.

O eixo principal (PC1: 38,1%), separou os sistemas de MS01 e VC01, dos sistemas de ILPF01 e PA01 (Figura 3). Tendo os atributos valor S (0,96), Ca (0,89), valor T (0,87), valor V (0,87), COT (0,85), EsTC (0,80), pH (0,78), COAM (0,74) e Mg (0,73), como as variáveis que mais contribuíram para a formação do eixo principal (Tabela S1). O eixo secundário (PC2: 13,9%), individualizou os sistemas de MS01 e ILPF01, dos sistemas de PA01 e VC01 (Figura 3). As variáveis que apresentaram elevada correlação ($-0,70 \geq r \geq 0,70$) com a PC2 foram H+Al (0,85) e Al (0,73) (Tabela S1). Esses resultados sugerem que as variáveis relacionadas a acidez do solo (trocável e potencial) são de grande influência na diferenciação dos sistemas. As frações da MOS (exceto COAM) e o IMC não apresentam elevada correlação com os eixos da ACP (Tabela S1).

Os atributos COT, COAM, EsTC e valor T encontram-se mais associados aos sistemas de VC01, sinalizando ambiente mais favorável a estabilização da MOS (p. ex., COT e COAM) e, posterior acúmulo de carbono no solo (ESTC) (Figura 3). O sistema de ILPF01 está mais relacionado com a fração AF (Figura 3), mesma o atributo apresentando baixa valor de correlação com os eixos da ACP (Tabela S1). As variáveis pH, Ca e Mg e os valores S, T e V, são mais compatíveis ao sistema PA01 (Figura 3), refletindo o efeito das atividades envolvidas no sistema sobre a fertilidade do solo.

Em relação a área ML, os sistemas de produção e o ambiente não antropizado foram separados e agrupados em três dos quatro quadrantes da ACP, a saber: no quadrante superior esquerdo, VC02; no quadrante inferior direito, AF02; e no quadrante superior direto, SSM02. O sistema de PA02 encontra-se posicionado quase que no centro da ACP (Figura 4). Somando os valores das componentes principais 1 e 2, a ACP explicou 69% da variabilidade total dos dados. Em que a PC1, com 44,6% de variância, individualizou principalmente os sistemas de SSM02 e VC02, do sistema de AF02 (Figura 4). A PC2, com 24,4% de variância, separou os sistemas de SSM02 e AF02, do sistema de VC02 (Figura 4).

Todos os atributos químicos associados a fertilidade solo, com exceção do P, foram as variáveis que contribuíram fortemente na construção do eixo principal, a saber: valor S (0,98), valor V (0,91), Ca (0,90), pH (0,88), Mg (0,80), valor T (0,79), K (0,78), COT (0,70), Al (-0,70) e H+Al (-0,81) (Tabela S2). Enquanto, as frações HUM (0,77), AF (0,72), AH (0,70) e MOL (0,70), foram as variáveis que mais influenciaram à construção do eixo secundário (Tabela S2). Esses resultados sugerem que as variáveis relacionadas qualidade química do solo são de grande influência na diferenciação dos sistemas.

As variáveis H+Al, Al e AF estão mais relacionadas com os sistemas de VC02 (Figura 4). Os atributos Ca, Mg, K, valor S e valor V posicionados no quadrante inferior direto, indicam maior influência do sistema de AF2 sobre a fertilidade do solo (Figura 4). As variáveis relacionadas a MOS (ou seja, COT, COP, COAM, HUM, AH, MOL e EsTC) estão mais associadas aos sistemas de SSM02 e PA02 (Figura 4).

No que tange a área IF, os sistemas de produção foram agrupados juntos, com sobreposição deles, sendo separados somente do ambiente não antropizado. Ou seja, os sistemas de IPF03, PA03 e SSM03 encontram-se posicionados praticamente sobre o eixo de maior relevância (PC1: 38,5%) no quadrante direito, e separados do sistema de VC03 (no quadrante esquerdo), ao longo do eixo secundário (PC2: 13,2%) (Figura 5). Tais resultados indicam que os sistemas de produção diversificados estão promovendo modificações na qualidade química do solo em comparação a área de referência.

Os atributos que mais favoreceram a formação do eixo principal foram valor S (0,93), valor V (0,90), valor T (0,85), Ca (0,80), pH (0,76), COT (0,70), MOL (0,70), EsTC (0,70). Tais variáveis estão mais relacionadas aos sistemas de produção (Figura 5). Os teores de COT (0,70), EsTC (0,70) e COAM (0,77) auxiliaram na formação do eixo secundário, não apresentando associação direta com as formas de uso e manejo do solo (Figura 5). O sistema de VC03 está mais relacionado com os atributos H+Al e Al (Figura 5), mesmo os atributos apresentando baixos valores de correlação com os eixos da ACP (Tabela S3).

6. CONCLUSÕES

Na área BV, as formas de uso e manejo do solo promovem modificações distintas nos atributos químicos, bem como na compartmentalização da MOS.

As práticas realizadas no sistema de MS01 promoveram maior acidificação do solo.

O sistema VC01 se destaca como o ambiente mais favorável à estabilização da MOS e, o subsequente acúmulo de carbono no solo. Na área ML, as variáveis ligadas aos atributos de fertilidade do solo são as principais responsáveis pela diferenciação entre os sistemas. Já na área IF, os sistemas de produção diversificados promovem alterações na qualidade química do solo em comparação com áreas não antropizadas.

A variação dos atributos químicos do solo está relacionada, principalmente, ao manejo da adubação. Além disso, essa variação também é influenciada pelo aporte de matéria orgânica que cada sistema de uso promove ao solo.

As frações da MOS foram afetadas de maneira semelhante pelas características dos sistemas de uso e manejo, bem como pela textura mais argilosa do solo das áreas.

A MOL foi a fração da MOS mais eficiente em demonstrar a influência dos sistemas de produção agrícolas diversificados em todas as áreas, especialmente os sistemas de pastagens.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Existe a necessidade de uma abordagem mais detalhada e contínua na avaliação da qualidade do solo, especialmente em ambientes tropicais como o bioma Cerrado, onde os sistemas de produção agrícola têm um impacto significativo na composição e estabilidade da MOS.

Os resultados do estudo destacam a importância de trabalhos futuros nas mesmas áreas de produção utilizando os mesmos indicadores, principalmente a fração MOL, para monitorar a qualidade dos solos formados sob condições climáticas tropicais e inferir sobre a sustentabilidade dos agroecossistemas de maneira cronológica.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, C. C. F.; OLIVEIRA, J. D.; ESTEVAM, E. B. B.; XAVIER, M. N.; NICOLELLA, H. D.; FURTADO, R. A.; TAVARES, D. C.; MIRANDA, M. L. D. Antiproliferative activity of essential oils from three plants of the Brazilian Cerrado: *Campomanesia adamantium* (Myrtaceae), *Protium ovatum* (Burseraceae) and *Cardiopetalum calophyllum* (Annonaceae). **Brazilian Journal of Biology**, 80, 290-294, 2019.
- ANDERSON, C. A.; INGRAM, P. Attributional style in depression: A meta-analytic review. **Journal of Personality and Social Psychology**, 57, 1073–1087, 1989.
- ANGHINONI, I.; MORAES, A.; CARVALHO, P. C. F.; SOUZA, E. D.; CONTE, O.; LANG, C. R. Benefícios da integração lavoura-pecuária sobre a fertilidade do solo em sistema plantio direto. In: FONSECA, A.; CAIRES, E. F.; BARTZ, G. **Fertilidade do solo e nutrição de plantas no sistema plantio direto**. Ponta Grossa: Fundação ABC, 272-309, 2011.
- BALBINO, L.; CORDEIRO, L.; MARTÍNEZ, G. Contribuições dos sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) para uma Agricultura de Baixa Emissão de Carbono. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 4(6), 1163-1175, 2011.
- BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; OLIVEIRA, P. D.; KLUTHCOUSKI, J.; GALERANI, P. R.; VILELA, L. Agricultura sustentável por meio da integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF). **Informações Agronômicas**, 138, 1-18, 2012.
- BARRETO, A. C.; FREIRE, M. B. G. S.; NACIF, P. G. S.; ARAÚJO, Q. R.; FREIRE, F. J.; INÁCIO, E. S. B. Fracionamento químico e físico do carbono orgânico total em um solo de mata submetido a diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32, 1471-1478, 2008.
- BAYER, C.; MARTIN NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolos Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 39, 677-683, 2004.
- BAYER, C.; DIECKOW, J. A matéria orgânica em solos tropicais e subtropicais sob agricultura conservacionista. In: BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN-NETO, L.; ANDRADE, C. A. (Eds.). **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropicais e subtropicais – Objetivos de desenvolvimento sustentável**. Cap. 19, Brasília-DF: Embrapa. pp. 551-568. 2023.
- BEHLING, M.; WRUCK, F. J.; ANTONIO, D. B. A.; MENEGUCI, J. L. P.; PEDREIRA, B. C.; CARNEVALLI, R. A.; CORDEIRO, L. A. M.; GIL, J.; NETO, A. L. F.; DOMIT, L. A.; SILVA, J. F. V. **Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF)**. 306-325, 2013.
- BENITES, V. M.; MADARI, B.; MACHADO, P. L. O. A. **Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmidas do solo**: um procedimento simplificado de baixo custo. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003.
- BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN-NETO, L.; ANDRADE, C. A. **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropicais e subtropicais – Objetivos de desenvolvimento sustentável**. Brasília, DF: Embrapa, 788 p., 2023.

BERNARDI, A. D. C.; TADINI, A. M.; BIELUCZYK, W.; PEZZOPANE, J. R. M.; MACHADO, P. L. O. A.; MADARI, B. E.; MARTIN-NETO L. Manejo conservacionista da matéria orgânica: sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. In: BETTIOL, W.; SILVA, C. A.; CERRI, C. E. P.; MARTIN-NETO, L.; ANDRADE, C. A. (Eds.). **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropicais e subtropicais – Objetivos de desenvolvimento sustentável**. Cap. 20, Brasília-DF: Embrapa. pp. 569-600. 2023.

BEUTLER, S. J.; PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; PERIN, A.; SILVA, C. F. D. Edaphic attributes of a crop-livestock integration system in the Cerrado Biome. **Revista Caatinga**. 29, 892-900, 2016.

BEZERRA, R.P.M.; LOSS, A.; PEREIRA, M.G.; PERIN, A. Formas de carbono em latossolo sob sistemas de plantio direto e integração lavoura-pecuária no cerrado, Goiás. **Semina: Ciências Agrárias**, 34(6), 2637-2654, 2013.

BLAIR, G. J.; LEFRONT, R. D. B.; 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**, 46(7), 1459-66, 1995.

BLUM, W. E. H.; SCHAD, P.; NORTCLIFF, S. **Essentials of soil Science**: soil formations, functions, use and classification (World Reference Base, WRB). Stuttgart: Borntraeger Science Publishing. 2018.

BONA, F. D. **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas irrigados por aspersão sob plantio direto e preparo convencional**. 130 p. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2010.

BORTOLON, L.; BORTOLON, E. S. O. Obtenção de altas produtividades em sistemas agrícolas. **Fronteira Agrícola** 12, 1-3, 2016.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal** 56(3), 777-783, 1992.

CANELAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X.; RUMJANEK, V. M.; GURIDI, F.; OLIVARES, F. L.; SANTOS, G. A.; BRAZ-FILHO, R. Distribution of the humified fractions and characteristics of the humic acids of a ultisol under cultivation of eucalyptus and sugar cane. **Terra Latinoamericana**. 20(4), 371-381, 2002.

CANELAS, L. P.; VELLOS, A. C. X.; MARCIANO, C. R.; RAMALHO, J. F. G. P.; RUMJANEK, V. M.; REZENDE, C. E.; SANTOS, G. A. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhço e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27, 935-944, 2003.

CARVALHO, J. L. N.; RAUCCI, G. S.; CERRI, C. E. P.; BERNOUX, M.; FEIGL, B. J.; WRUCK, F.J.; CERRI, C.C. Impact of pasture, agriculture and crop-livestock systems on soil C stocks in Brazil. **Soil and Tillage Research**. 110(1), 175-186, 2010.

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELLO, C. R.; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34, 277-289, 2010.

CARVALHO, R. P.; DANIEL, O.; DAVIDE, A. C.; DE SOUZA F. R. Atributos físicos e químicos de um Neossolo Quartzarênico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Caatinga**, 28 (1), 148-159, 2015.

CARVALHO, M. L.; MACIEL, V. F.; BORDONAL, R. D.O.; CARVALHO, J. L. N.; FERREIRA, T. O.; CERRI, C. E. P.; CHERUBIN, M. R. Stabilization of organic matter in soils: drivers, mechanisms, and analytical tools—a literature review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 47, e0230130, 2023.

CERLI, H.; CELI, L.; KALBITZ, K.; GUGGENBERGER, G.; KAISER, K. Separation of light and heavy organic matter fractions in soil—Testing for proper density cut-off and dispersion level. **Geoderma**, 170, 403-416, 2012.

CONCEIÇÃO, P. C.; AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J.; SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 29, 777-788, 2005.

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

COUTINHO, L. **Biomassas brasileiras**. Oficina de Textos, 2016.

COMPTON, J. E.; BOONE, R. D. Soil nitrogen transformations and the role of light fraction organic matter in forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, 34(7), 933-943, 2002.

CUNHA, T. J.F.; MADARI, B. E.; BENITES, V. D. M.; CANELLAS, L. P.; NOVOTNY, E. H.; MOUTTA, R. D. O.; TROMPOWSKY, P. M.; SANTOS, G. D. A. Fracionamento químico da matéria orgânica e características de ácidos húmicos de solos com horizonte A antrópico da Amazônia (Terra Preta). **Acta Amazonica**, 37, 91-98, 2007.

CUNHA, T. J. F.; MENDES, A. M. S.; GIONGO, V. **Matéria orgânica do solo**. 2015.

D'ANDRÉA, A. F.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; GUILHERME, L. R. G. Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 39, 179-186, 2004.

ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soil under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, 75(4), 529-538, 1995.

FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations – WRBSR 2014 – International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Update 2015. **World Soil Resources Reports** 106, FAO Rome, 2015. 203 pp.

FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations – **Protocol for the assessment of Sustainable Soil Management**. FAO-ITPS – Intergovernmental Technical Panel on Soils. Rome, 2020.

FARIA, A. F. G. D.; SANTOS, A. C. D.; SANTOS, T. M. D.; BATISTELLAS FILHO, F. Influência do manejo do solo nas propriedades químicas e físicas em topossequência na bacia do rio Araguaia, Estado do Tocantins. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34, 517-524, 2010.

FERNANDES, F. A.; FERNANDES, A. H. B. M. **Cálculo dos estoques de carbono do solo sob diferentes condições de manejo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2008.

FIGUEIREDO, C. C. D.; RESCK, D. V. S.; CARNEIRO, M. A. C. Labile and stable fractions of soil organic matter under management systems and native cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 34, 907-916, 2010.

FOLEY, J. A.; DEFRIES, R.; ASNER, G. P.; BARFORD, C.; BONAN, G.; CARPENTER, S. R.; CHAPIN, F. S.; COE, M. T.; DAILY, G. C.; GIBBS, H. K.; HELKOWSKI, J. H.; HOLLOWAY, T.; HOWARD, E. A.; KUCHARIK, C. J.; MONFREDA, C.; PATZ, J. A.; PRENTICE, I. C.; RAMANKUTTY, N.; SNYPER, P. K. Global consequences of land use. **Science**, 309(5734), 570-574, 2005.

FONTANA, A.; PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; CUNHA, T. J. F.; SALTON, J. C. Atributos de fertilidade e frações húmicas de um Latossolo Vermelho no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 41, 847-853, 2006.

GARCIA, F. N.; FERREIRA, L. G.; SANO, E. E. Análise da qualidade das pastagens cultivadas do Cerrado goiano a partir de imagens Modis Índices de Vegetação. **Revista Brasileira Cartografia**, 65, 1075-1086, 2013.

GAZOLLA, P. R.; GUARESCHI, R. F.; PERIN, A.; PEREIRA, M. G.; ROSSI, C. Q. Frações da matéria orgânica do solo sob pastagem, sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária. **Semina: Ciências Agrárias**, 36(2), 693-704, 2015.

GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Deposição de resíduos vegetais, matéria orgânica leve, estoques de carbono e nitrogênio e fósforo remanescente sob diferentes sistemas de manejo no cerrado goiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 36, 909-920, 2012.

GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Oxidizable carbon fractions in Red Latosol under different management systems. **Revista Ciência Agronômica**, 44, 242-250, 2013b.

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Biomas do Brasil**. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/biomas2/viewer.htm>>. Acessa em: 15 nov. 2023.

IUSS WORKING GROUP WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. **World Soil Resources Reports**, nº. 106, Rome: FAO. 2015.

IWATA, B. D. F.; LEITE, L. F.; ARAÚJO, A. S.; NUNES, L. A.; GEHRING, C.; CAMPOS, L. P. Sistemas agroflorestais e seus efeitos sobre os atributos químicos em Argissolos Vermelho-Amarelo do Cerrado piauiense. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 16, 730-738, 2012.

JANZEN, H. H.; CAMPBELL, C. A.; BRANDT, S. A.; LAFOND, G. P.; TOWNLEY-SMITH, L. Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. **Soil Science Society of America Journal**, 56, 1799-1806, 1992.

JUNIOR, C. A. M.; LOSS, A.; DOS SANTOS JUNIOR, E.; FERREIRA, G. W.; COMIN, J. J.; LOVATO, P. E.; BRUNETTO, G. Atributos químicos em agregados biogênicos e fisiogênicos de solo submetido à aplicação com dejetos suínos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, 14, 1-8, 2019.

KÄMPF, N.; CURI, N. Formação e evolução do solo (Pedogênese). In: KER, J. C.; SHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. **Pedologia: fundamentos**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 207-302, 2012.

KAPPES, C.; ZANCANARO, L. Manejo da fertilidade do solo em sistemas de produção no Mato Grosso. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 30; SIMPÓSIO SOBRE LEPDÓPTEROS COMUNS A MILHO, SOJA E ALGODÃO, 1, 2014, Salvador-BA. **Anais... Eficiência nas cadeias produtivas e o abastecimento global: palestras**. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2014. p. 358-381.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. A conservação do Cerrado brasileiro. **Megadiversidade**, 1, 147-155, 2005.

LAL, R. Global potential of soil carbon sequestration to mitigate the greenhouse effect. **Critical reviews in plant sciences**, 22, 151-184, 2003.

LIMA, T. M.; WEINDORF, D. C.; CURI, N.; GUILHERME, L. R.; LANA, R. M.; RIBEIRO, B. T. Elemental analysis of Cerrado agricultural soils via portable X-ray fluorescence spectrometry: Inferences for soil fertility assessment. **Geoderma**. 2019, 353, 264-272.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. G. A career perspective on soil management in the Cerrado region of Brazil. **Advances in agronomy**, 137, 1-72, 2016.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; RAMOS, S. J. The saga of the agricultural development of the Brazilian Cerrado. **International Potash Institute**, 32, 29-56, 2012.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; SCHULTZ, N.; ANJOS, L. H. C.; SILA, E. M. R. Carbono e frações granulométricas da matéria orgânica do solo sob sistemas e produção orgânica. **Ciência Rural**, 39, 1067-1072, 2009.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G. GIÁCOMO, S. G.; PERIN, A. ANJOS, L. H. C. Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 46, 1269-1276, 2011a.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; BEUTLER, S. J.; PERIN, A.; ANJOS, L. H. C. Densidade e fertilidade do solo sob sistemas plantio direto e integração lavoura-pecuária no Cerrado. **Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, 55, 260-268, 2012.

LOSS, A.; COUTINHO, F. S.; PEREIRA, M. G.; SILVA, R. A. C.; TORRES, J. L. R.; RAVELLI NETO, A. Fertilidade e carbono total e oxidável de Latossolo de Cerrado sob pastagem irrigada e de sequeiro. **Ciência Rural**, 43, 426-432, 2013.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A.; COUTINHO, F. S.; ANJOS, L. H. C. Particulate organic matter in soil under different management systems in the Brazilian Cerrado. **Soil Research**, 50, 685-693, 2013.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; TORRES, J. L. R. **Carbono orgânico no solo sob sistemas conservacionistas no Cerrado. Impactos ambientais provenientes da produção agrícola: experiências argentinas e brasileiras**. 1^a ed. São Paulo e Rio de Janeiro: Livre Expressão, 1, pp. 259-282, 2016.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; COSTA, E. M.; BEUTLER, S. J.; DE CÁSSIA PICCOLO, M. Soil fertility, humic fractions and natural abundance of ^{13}C and ^{15}N in soil under different land use in Paraná State, Southern Brazil. **Idesia**, 34(1), 27-38, 2016.

LOSS, A. C.; PEREIRA, M. G.; BEUTLER, S. J.; PERIN, A.; PICCOLO, M. D. C.; ASSUNÇÃO, S.A.; ZONTA, E. The impact of agricultural systems in the soil organic matter content in brazilian cerrado. **International Journal of Research-Granthaalayah**, 7, 220-244, 2019.

MACHADO, P. L. O. A.; GERZABEK, M. Tillage and crop rotation interactions on humic substances of a typic haplorthox from southern Brazil. **Soil Tillage Research**, Amsterdam. 26(3), 227-236, 1993.

MACHADO, P. L. O. A. Fracionamento físico do solo por densidade e granulometria para a quantificação de compartimentos da matéria orgânica do solo: um procedimento para a estimativa pormenorizada do sequestro de carbono pelo solo. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002.

MAIA, S. M. F.; CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; LAL, R.; BERNOUX, M.; GALDOS, M. V.; CERRI, C. C. Contrasting approaches for estimating soil carbon changes in Amazon and Cerrado biomes. **Soil & Tillage Research**, 133, 75-84, 2013.

MORAES, R. M.; RABELO, C. F.; DELITI, W. B. C.; VUONO, Y. S. Serapilheira acumulada em um trecho de mata atlântica de encosta, no Parque Estadual da Ilha do Cardoso (São Paulo). In: SIMPÓSIO DE ECOLOGIA DA COSTA BRASILEIRA 3, São Paulo-SP. **Anais...** 94-99 p., 1993.

MOREIRA, F.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do solo**. Editora UFLA, 626, 2006.

NASCIMENTO, P. C.; LANI, J. L.; MENDONÇA, E. S.; ZOFFOLI, H. J. O.; PEIXOTO, H. T. M. Teores e características da matéria orgânica de solos hidromórficos do Espírito Santo. **Revista Brasileira de ciência do solo**, 34, 339-348, 2010.

NANZER, M. C.; ENSINAS, S. C.; BARBOSA, G. F.; BARRETA, P. G. V.; DE OLIVEIRA, T. P.; DA SILVA, J. R. M.; PAULINO, L. A. Estoque de carbono orgânico total e fracionamento granulométrico da matéria orgânica em sistemas de uso do solo no Cerrado. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, 18(1), 136-145, 2019.

NICOLOSO, R. S. **Dinâmica da matéria orgânica do solo em áreas de integração lavoura-pecuária sob sistema plantio direto**. Dissertação Mestrado Universidade Federal de Santa Maria, 150, 2005.

OLIVEIRA, D. M. D. S.; TAVARES, R. L. M.; LOSS, A.; MADARI, B. E.; CERRI, C. E. P.; ALVES, B. J. R.; PEREIRA, M. G.; CHERUBIN, M. R. Climate-smart agriculture and soil C sequestration in Brazilian Cerrado: a systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 47, e0220055, 2023.

OLIVEIRA, T. P.; ENSINAS, S. C. BARBOSA, G. F.; NANZER, M. C.; BARRETA, P. G. V. Atributos químicos de um Neossolo Quartzarênico de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista de Agricultura Neotropical**, 4 (5), 72-78, 2017.

PAUL, E. A.; CLARK, F. E. **Soil microbiology and biochemistry**. San Diego, Academic Press, 1996.

PENA, R. F. A.; ALVES, F. **Solos do Cerrado**. Brasil Escola. Disponível em <<https://brasilescola.uol.com.br/brasil/solos-cerrado.htm>>. 2010; 10.

PEREIRA, C. A.; SILVA, M. R. S. S.; QUIRINO, B. F.; BUSTAMANTE, C. M. M.; KRÜGER, R. H. Microbial Diversity in Cerrado Biome (Neotropical Savanna) Soils. **Plos One**, 11(2). e0148785, 2016.

PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; BEUTLER, S. J.; TORRES, J. L. R. Carbono, matéria orgânica leve e fósforo remanescente em diferentes sistemas de manejo do solo. **Pesquisa agropecuária brasileira**, 45, 508-514, 2010.

PRADO, R.; FERREIRA, C.; BENITES, V. D. M. Proposta metodológica para mapeamento da demanda potencial de potássio para áreas agrícolas do Sudoeste Goiano, considerando uso, manejo e textura dos solos, 2011.

PORFÍRIO-DA-SILVA, V. **Arborização de pastagens: I - procedimentos para introdução de árvores em pastagens convencionais**. Comunicado Técnico 155. Embrapa, Colombo-PR. 2016.

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 31, 1609-1623, 2007.

RATTER, J. A.; BRIDGEWATER, S.; RIBEIRO, J. F. Analysis of the floristic composition of the brazilian cerrado vegetation III: comparison of the woody vegetation of 376 areas. **Edinburgh journal of botany**, 60(1), 57-109, 2003.

REID, J. B.; GOSS, M. J. Changes in the aggregate stability of a sandy loam effected by growing roots of perennial ryegrass (*Lolium perene*). **Journal of the Science of Food and Agriculture**, 31(3), 325-328, 1980.

RESENDE, A. V.; FONTOURA, S. M. V.; BORGHI, E.; DOS SANTOS, F. C.; KAPPES, C.; MOREIRA, S. G.; JUNIOR, A. O. BORIN, A. L. D. C. Solos de fertilidade construída: características, funcionamento e manejo. **Informações Agronômicas**, 2016.

RIBEIRO, D. O.; GONÇALVES, G. R.; RUBIO, G. O.; CASTOLDI, G.; VENDRUSCOLO, E. P.; SOUZA, Z. H. D. Carbon stocks and lability in land use and management systems in southwestern Goiás, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, 53: e74416, 2023.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. (Eds.) **Cerrado: Ambiente e Flora**. Embrapa-CPAC, Brasília-DF, 1998. 89-166 p.

ROSSET, J. S.; LANA, M. D. C.; PEREIRA, M. G.; SCHIAVO, J. A.; RAMPIM, L.; SARTO, M. V. M. Frações químicas e oxidáveis da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo, em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 51, 1529-1538, 2016.

ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M. G.; GIÁCOMO, S. G.; BETTA, M.; POLIDORO, J. C. Frações orgânicas e índice de manejo de carbono do solo em Latossolo Vermelho sob plantio de soja no cerrado goiano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, 7, 233-241, 2012.

ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M. G.; GIÁCOMO, S. G.; BETTA, M.; POLIDORO, J. C. Frações húmicas da matéria orgânica do solo cultivado com soja sobre palhada de braquiária e sorgo. **Bragantia**, 70, 622-630, 2011.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D.L. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 46, 1349-1356, 2011.

SANO, E.E.; ROSA, R.; BRITO, J.L.S.; FERREIRA, L.G. Mapeamento semidetalhado do uso da terra no Bioma Cerrado. **Pesquisa agropecuária brasileira**, 43, 153-156, 2008.

SANT-ANNA, S.A.; JANTALIA, C. P.; SA, J. M.; VILELA, L.; MARCHAO, R. L.; ALVES, B. J.; BODDEY, R. M. Changes in soil organic carbon during 22 years of pastures, cropping or integrated crop/livestock systems in the Brazilian Cerrado. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, 108, 101-120, 2017.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, DF: Embrapa, 356, 2018.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; LIMA, J. C. (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p. 275-374. 2007.

SILVA NETO, L. F. **Pedogênese e matéria orgânica de solos hidromórficos da Região Metropolitana de Porto Alegre**. 2010. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2010.

SILVA, E. F.; LOURENTE, E. P. R.; MARCHETTI, M. E.; MERCANTE, F. M.; FERREIRA, A. K.T.; FUJII, G. C. Frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica em solos sob integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 46, 1321-1331, 2011.

SILVA CARNEIRO, J. S.; DOS SANTOS, A. C. M.; FIDELIS, R. R.; DA SILVA NETO, S. P.; DOS SANTOS, A. C.; DA SILVA, R. R. Diagnóstico e manejo da variabilidade espacial da fertilidade do solo no Cerrado do Piauí. **Revista de Ciências Agroambientais** 14(2), e-ISSN 1677-6062. 2016.

SIQUEIRA NETO, M.; PICCOLO, M.D.C.; SCOPEL, E.; COSTA JUNIOR, C.D.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M. Carbono total e atributos químicos com diferentes usos do solo no Cerrado. **Acta Scientiarum. Agronomy**, 31, p. 709-717, 2009.

SIQUEIRA NETO, M.; SCOPEL, E.; CORBEELS, M.; CARDOSO, A. N.; DOUZET, J. M.; FELLER, C.; PICCOLO, M. C.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M. Estoques de carbono no solo sob plantio direto em sistemas de cultivo no Cerrado do Brasil: Uma avaliação sincrônica na exploração. **Soil e Tillage Research**, 110(1), 187-195, 2010.

SISTI, C. P. J.; SANTOS, H. P. D.; KOHHANN, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Change in carbono and nitrogen stocks in soil under 13 years of convencional or zero tillage in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, 76(1), 39-58, 2004.

SIX, J.; FELLER, C.; DENEF, K.; OGLE, S. M.; MORAES, J. C.; ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – **Effects of no-tillage - Agronomie**, 22(7-8), 755-775, 2002.

SOHI, S. P.; MAHIEU, N.; ARAH, J. R.; POWLSON, D. S.; MADARI, B.; GAUNT, J. L.; A procedure for isolating soil organic matter fractions suitable for modeling. **Soil Science Society of America Journal**, 65(4), 1121-1128, 2001.

SOUZA, W. J. O. D.; MELO, W. J. Matéria orgânica de um Latossolo submetido a diferentes sistemas de produção de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27, 1113-1122, 2003.

TAVARES, L. F.; SILVA, T. O.; SAMPAIO, C.; PAZETTO, B. C.; CARVALHO, A. Influência de espécies arbóreas nativas do cerrado sobre a acidez ativa e a umidade do solo em uma área em transição para um sistema agroflorestal. **Cadernos de Agroecologia**, 9(3), 2014.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

TORRES, J. L. R.; COSTA, D.D.D.A.; PEREIRA, M.G.; GUARDIEIRO, L. V. F.; LOSS, A.; LOURENZI, C. R.; GONZALEZ, A. P.; CARVALHO, M.; VIEIRA, D. M. D. S. Phosphorus Fractionations and Availability in Areas under Different Management Systems in the Cerrado. **Agronomy**, 13(4), 966, 2023.

USDA United States Department of Agriculture. **Foreign Agricultural Service (Brazil).** Available online at. <https://www.fas.usda.gov/regions/brazil> (verified 02 Oct. 2018). 2018.

USDA United States Department of Agriculture. **Soil Survey Staff - Keys to soil taxonomy.** 12th ed. US Natural Resources Conservation Service; US Government Printing Office: Washington DC, 360 pp. 2014.

VENDRAME, P. R. S.; BRITO, O. R.; GUIMARÃES, M. F.; MARTINS, E. S.; BECQUER, T. Fertility and acidity status of Latossolos (Oxisols) under pasture in the Brazilian Cerrado. **Anais da Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro**, 82, 1085-1094, 2010.

VILELA, L.; MARTHA JUNIOR, G. B.; MACEDO, M. C. M.; MARCHÃO, R. L.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; PUROLNIK, K.; MACIEL, G. A. Sistemas de integração lavoura-pecuária na região do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 46, 1127-1138, 2011.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 19(13), 1467-1476, 1988.

ZINN, Y. L.; RESCK, D. V.; DA SILVA, J. E. Soil organic carbon as affected by afforestation with Eucalyptus and Pinus in the Cerrado region of Brazil. **Forest Ecology and Management**, 166(1-3), 285-294, 2002.

9. ANEXOS

9.1 Matrix de Análises por Respectivas Localidades

Tabela S1. Matrix da análise de componentes principais (PCA). A contribuição relativa corresponde a correlação de Pearson (r) entre cada componente principal (PC, eixo) com as variáveis dos sistemas de produção e ambiente de referência na área da Fazenda Boa Vereda.

Variáveis	PC1	PC2	Variáveis	PC1	PC2
pH	0,73	-0,48	COT	0,85	0,40
Ca	0,89	0,03	COP	0,60	0,10
Mg	0,73	-0,16	COAM	0,74	0,44
Al	-0,39	0,73	MOL	0,24	-0,09
H+Al	-0,32	0,85	HUM	0,30	0,02
K	0,36	0,14	AH	-0,18	0,23
S	0,96	-0,07	AF	-0,32	-0,23
T	0,87	0,34	EsTC	0,80	0,43
V	0,87	-0,39	IMC	0,14	-0,08
P	-0,02	0,41			

Valores em negrito: Elevada correlação ($-0,70 \geq r \geq 0,70$). pH: Acidez ativa; Ca: Cálcio trocável; Mg: Magnésio trocável; Al: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial; K: Potássio trocável; S: Soma de bases; T: Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: Saturação por bases; P: Fósforo disponível; COT: Carbono orgânico total; COP: Carbono orgânico particulado; COAM: Carbono orgânico associado aos minerais; MOL: Matéria orgânica leve em água; AF: Ácido fúlvico; AH: Ácido húmico; HUM: Humina; EsTC: Estoque de carbono orgânico total; e IMC: Índice de manejo do carbono.

Tabela S2. Matrix da análise de componentes principais (PCA). A contribuição relativa corresponde a correlação de Pearson (r) entre cada componente principal (PC, eixo) com as variáveis dos sistemas de produção e ambiente de referência na área da Fazenda Mata do Lobo.

Variáveis	PC1	PC2	Variáveis	PC1	PC2
pH	0,88	-0,33	COT	0,70	0,65
Ca	0,90	-0,02	COP	0,57	0,63
Mg	0,80	-0,22	COAM	0,56	0,49
Al	-0,70	0,49	MOL	0,35	0,70
H+Al	-0,81	0,52	HUM	0,09	0,77
K	0,78	-0,18	AH	0,22	0,70
S	0,98	-0,10	AF	-0,49	0,72
T	0,79	0,41	EsTC	0,63	0,64
V	0,91	-0,33	IMC	0,01	0,23
P	0,49	-0,28			

Valores em negrito: Elevada correlação ($-0,70 \geq r \geq 0,70$). pH: Acidez ativa; Ca: Cálcio trocável; Mg: Magnésio trocável; Al: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial; K: Potássio trocável; S: Soma de bases; T: Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: Saturação por bases; P: Fósforo disponível; COT: Carbono orgânico total; COP: Carbono orgânico particulado; COAM: Carbono orgânico associado aos minerais; MOL: Matéria orgânica leve em água; AF: Ácido fúlvico; AH: Ácido húmico; HUM: Humina; EsTC: Estoque de carbono orgânico total; e IMC: Índice de manejo do carbono.

Tabela S3. Matrix da análise de componentes principais (PCA). A contribuição relativa corresponde a correlação de Pearson (r) entre cada componente principal (PC, eixo) com as variáveis dos sistemas de produção e ambiente de referência na área do Instituto Federal Goiano.

Variáveis	PC1	PC2	Variáveis	PC1	PC2
pH	0,76	-0,04	COT	0,70	0,70
Ca	0,80	0,02	COP	0,56	-0,45
Mg	0,60	-0,29	COAM	0,61	0,77
Al	-0,53	-0,03	MOL	0,70	-0,38
H+Al	-0,38	0,23	HUM	0,38	-0,17
K	0,41	-0,09	AH	0,34	-0,50
S	0,93	-0,19	AF	0,34	0,23
T	0,85	-0,11	EsTC	0,70	0,70
V	0,90	-0,23	IMC	0,10	-0,16
P	0,55	0,10			

Valores em negrito: Elevada correlação ($-0,70 \geq r \geq 0,70$). pH: Acidez ativa; Ca: Cálcio trocável; Mg: Magnésio trocável; Al: Alumínio trocável; H+Al: Acidez potencial; K: Potássio trocável; S: Soma de bases; T: Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: Saturação por bases; P: Fósforo disponível; COT: Carbono orgânico total; COP: Carbono orgânico particulado; COAM: Carbono orgânico associado aos minerais; MOL: Matéria orgânica leve em água; AF: Ácido fúlvico; AH: Ácido húmico; HUM: Humina; EsTC: Estoque de carbono orgânico total; e IMC: Índice de manejo do carbono.