

UFRRJ
INSTITUTO DE ZOOTECNIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA
ANIMAL

DISSERTAÇÃO

**Estoques e dinâmica de carbono e nitrogênio do solo
em diferentes sistemas de uso da terra**

Camila Eduarda Souza de Sousa

2022



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO INSTITUTO DE
ZOOTECNIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA ANIMAL**

**ESTOQUES E DINÂMICA DE CARBONO E NITROGÊNIO DO SOLO
EM DIFERENTES SISTEMAS DE USO DA TERRA**

CAMILA EDUARDA SOUZA DE SOUSA

Sob a Orientação do Professor

Dr. João Carlos de Carvalho Almeida

e Co-orientação do Professor

Dr. Abmael da Silva Cardoso

Dissertação submetida como requisito
parcial para obtenção do grau de **Mestre(a)**,
no Curso de Pós-Graduação em Ciência
Animal, Área de Concentração em
Forragicultura e Pastagens.

Seropédica, RJ
Fevereiro de 2022

S725e Sousa, Camila Eduarda Souza de, 1993 Estoque e dinâmica de carbono e nitrogênio do solo em diferentes sistemas de uso da terra. / Camila Eduarda Souza de Sousa. - Seropédica, RJ, 2022.
47 f.: il.

Orientador: João Carlos de Carvalho Almeida. Coorientador: Abmael da Silva Cardoso.
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós graduação em Ciência Animal, 2022.

1. Matéria orgânica. 2. carbono orgânico. 3. estoque de carbono.
I. Almeida, João Carlos de Carvalho, 1956-, orient. II. Cardoso, Abmael da Silva, 1988-, coorient. III Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.
Programa de Pós graduação em Ciência Animal.
IV. Título.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA ANIMAL



TERMO N° 191 / 2022 - PPGZ (12.28.01.00.00.00.61)

**Nº do Protocolo: 23083.013208/2022-35
Seropédica-RJ, 02 de março de 2022.**

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE ZOOTECNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA ANIMAL

CAMILA EDUARDA SOUZA DE SOUSA

Dissertação submetida como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre(a)**, no Programa de PósGraduação em Ciência Animal, Área de Concentração em Zootecnia.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 24/02/2022.

Conforme deliberação número 001/2020 da PROPPG, de 30/06/2020, tendo em vista a implementação de trabalho remoto e durante a vigência do período de suspensão das atividades acadêmicas presenciais, em virtude das medidas adotadas para reduzir a propagação da pandemia de Covid-19, nas versões finais das teses e dissertações as assinaturas originais dos membros da banca examinadora poderão ser substituídas por documento(s) com assinaturas eletrônicas. Estas devem ser feitas na própria folha de assinaturas, através do SIPAC, ou do Sistema Eletrônico de Informações (SEI) e neste caso a folha com a assinatura deve constar como anexo ao final da tese / dissertação.

Banca Examinadora:

Abmael da Silva Cardoso, Dr.. UNESP – (Presidente)

Hiran Marcelo Siqueira da Silva , Dr. University of Florida

Ana Claudia Ruggieri, Dr.^a UNESP

(Assinado digitalmente em 09/03/2022 13:57)
ABMAEL DA SILVA CARDOSO
ASSINANTE EXTERNO CPF: 734.554.901-15

(Assinado digitalmente em 03/03/2022 11:18)
HIRAN MARCELO SIQUEIRA DA SILVA
ASSINANTE EXTERNO CPF: 034.760.234-78

(Assinado digitalmente em 03/03/2022 09:53)
ANA CLÁUDIA RUGGIERI
ASSINANTE EXTERNO CPF: 068.503.468-22

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sipac.ufrrj.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **191**, ano:**2022**, tipo: **TERMO**, data de emissão: **02/03/2022** e o código de verificação: **5dc2933eea**

À minha vó Cotinha (in memoriam)

AGRADECIMENTOS

A Deus e ao universo por sempre guiarem meu caminho da melhor forma possível, e me darem discernimento para fazer escolhas certas.

A minha mãe Rosilene Sousa, meu pai Ricardo Sousa, e minha irmã Vanessa Sousa pelo apoio incondicional, por se preocuparem, me ajudarem, e por estarem comigo nessa caminhada. Um carinho especial aos nossos gatos Madruguinha e Gugu por fazerem companhia nas noites de estudo.

A todos meus familiares pela torcida pra que tudo desse certo até aqui.

A Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro por ter me recebido mesmo diante de uma pandemia, e ter me proporcionado o grande conhecimento adquirido.

Ao professor Dr. João Carlos de Carvalho Almeida pela orientação, confiança, ensinamentos acadêmicos e de vida. Agradeço também pelo cavalo selado no qual estou montada até hoje e não pretendo descer. Sempre vou lembrar de cada conselho do grande Delegado.

Ao Dr. Abmael da Silva Cardoso pela coorientação, confiança, amizade, conversas fora da caixinha, e por me proporcionar novas visões sobre a vida. Você é um exemplo!

Ao meu colega de pós graduação Marcelo Silveira pela hospitalidade em Seropédica, pela amizade, e pelo apoio durante o mestrado.

A Prof. Dr^a Ana Cláudia Ruggieri pela disposição do laboratório de forragicultura e pastagens para realização das análises laboratoriais.

Aos meus amigos de Belém, que faço questão de citar. Chris, Diego, Dio, Jamile, João Ricardo, Jully, Léo, Monique, Nayara, Verena, e Vivi, por serem presentes mesmo distantes.

As famílias Machado e Cunha pelo suporte e amizade em Jaboticabal.

A todos que torcem por mim.

A todos que, de algum modo, contribuíram para a realização deste trabalho

Por último, mas não menos importante, a mim mesma, por ter acreditado em mim, nas minhas escolhas, e tido coragem pra seguir minha intuição.

MUITO OBRIGADA.

RESUMO

SOUSA, Camila Eduarda Souza de. **Estoques e dinâmica de carbono e nitrogênio do solo em diferentes sistemas de uso da terra.** 2022. 54p. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal, Forragicultura e Pastagens). Instituto de Zootecnia, Departamento de Nutrição e Pastagens, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2022.

O solo tem potencial para estocar altas quantidades de carbono resultante de processos biogeoquímicos, que acontecem através da decomposição da matéria orgânica. Diversos tipos de sistemas de produção agropecuário contribuem para o aporte de carbono no solo derivado da matéria orgânica, influenciando a produção de compostos orgânicos de diferentes naturezas químicas que promovem o aumento e diversificação da microbiota do solo, acarretando benefícios para o sistema de produção. A avaliação e diagnóstico do manejo do solo em seus diferentes tipos de uso pode ser feita por meio de indicadores de qualidade como microbiota e frações da matéria orgânica, pois estes são sensíveis às mudanças ambientais. Assim, objetivou-se avaliar as alterações nos teores e estoques de carbono orgânico total, carbono lábil, carbono solúvel, carbono da biomassa microbiana e nitrogênio total no solo de diferentes sistemas de uso da terra em Barbacena-MG. O experimento foi realizado em delineamento inteiramente casualizado, com cinco repetições em cada tratamento. Foram selecionadas quatro áreas com os distintos usos do solo, a saber: floresta nativa (FN); consórcio entre gramínea e leguminosa com vinte e cinco anos (CGL), sistema silvipastoril com treze anos (SSP); monocultivo de pastagem com 27 anos (MP). As amostras foram coletadas nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30 cm através de solo deformado e indeformadas para efetuar análises de densidade, textura do solo, carbono e nitrogênio total e frações do carbono. Foram calculados os teores e estoques de C e N, e o índice de manejo do carbono no solo (IMC). Houveram diferenças significativas através do teste estatístico de Kruskall-Wallis e teste de Dunn ($p>0,05$) em todas as variáveis analisadas, exceto nitrogênio total. O uso do solo e composição dos sistemas influenciaram na dinâmica da matéria orgânica e no acúmulo de carbono no solo. O monocultivo de pastagem apresentou teores de carbono orgânico total mais próximo à mata nativa, revelando uma redução de 33% em relação ao tratamento referência, seguido por consórcio gramínea-leguminosa com diferença de 42%, e sistema silvipastoril com 50% de redução. MP e CGL revelaram menor carbono lábil, carbono solúvel e menor carbono da biomassa microbiana comparado ao tratamento SSP, que por sua vez, foi mais próximo à mata nativa. O índice de manejo do carbono apresentou resultado superior a 100 em todas as profundidades avaliadas no sistema silvipastoril, em MP o índice ultrapassou 100 somente na faixa de 5-10cm, e o sistema CGL não atingiu índice 100 em nenhuma profundidade. O estoque de carbono no solo sob consórcio e sistema silvipastoril apresentaram valores próximos, foram estatisticamente semelhantes ($p<0,05$), e inferiores à MP e FN, que apresentaram estoques mais próximos. O solo sob sistema silvipastoril com 13 anos de idade apresentou inferior estoque de C comparado ao sistema em monocultivo de pastagem de 27 anos, consórcio gramínea-leguminosa de 25 anos, e floresta nativa, contudo, as frações da matéria orgânica em SSP indicam o maior potencial deste sistema em estocar carbono em longo prazo.

Palavras-chave: Matéria orgânica, carbono orgânico, estoque de carbono.

ABSTRACT

SOUSA, Camila Eduarda Souza de. **Soil carbon and nitrogen stocks and dynamics in different land use systems.** 2022. 54p. Dissertation (Master in Animal Science, Forage and Pasture). Instituto de Zootecnia, Departamento de Nutrição e Pastagem, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2022.

Soil can store high amounts of carbon resulting from biogeochemical processes, which take place through the decomposition of organic matter. Several types of agricultural production systems contribute to the increase of carbon derived from organic matter in the soil, influencing the production of organic compounds of different chemical natures that promote the increase and diversification of the soil microbiota, bringing benefits to the production system. The assessment and diagnosis of soil management and use can be made through quality indicators such as microbiota and organic matter fractions, as these are sensitive to environmental changes. Therefore, we aimed to evaluate changes in the contents and stock of total organic carbon, labile carbon, soluble carbon, microbial biomass carbon, and total nitrogen in the soil from different land use systems in Barbacena-MG. The experiment was conducted in a completely randomized design, with five replications in each treatment. Four areas with varying soil use were selected, namely: native forest (FN), twenty-five-year-old grass-legume consortium (CGL), thirteen-year-old silvopastoral system (SSP), and 27-year-old pasture monoculture (MP). Samples were collected at depths of 0-5, 5-10, 10-20, and 20-30 cm through deformed and undisturbed soil to perform analyzes of soil bulk density, soil texture, carbon and total nitrogen, and organic matter fractions. The contents and stock of these elements and the soil carbon management index (CMI) were calculated. There were significant differences through the KruskalWallis statistical test and Dunn's test ($p>0.05$) in all analyzed variables, except total nitrogen. Soil use and composition of the systems influenced the dynamics of organic matter and the accumulation of carbon in the soil. The pasture monoculture presented total organic carbon contents closer to the native forest, revealing a reduction of 33% compared to the reference treatment, followed by grass-legume intercropping with a difference of 42%, and the silvopastoral system with a 50% reduction. MP and CGL revealed lower labile carbon, soluble carbon, and lower microbial biomass carbon than the SSP treatment, which is native forest for the st. The carbon management index showed a result above 100 at all depths evaluated in the silvopastoral system; in MP, the index exceeded 100 only in the 5-10cm range, and the CGL system did not reach an index of 100 at any depth. Soil carbon stock under legume-grass and silvopasture system showed similar values; they were statistically identical ($p<0.05$) and lower than MP and CGL, which showed closer stocks. The soil under 13-year-old silvopastoral presented a similar carbon stock to that soil under 27-year-old pasture monoculture, 25-year-old grass-legume consortium, and native forest. However, the organic matter fractions in SSP indicate the highest potential of this system to store carbon in the long term.

Key-words: Organic matter, organic carbon, carbon stock.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1 Matéria Orgânica do Solo nos Sistemas de Uso da Terra	3
2.2 Carbono Orgânico Total	5
2.3 Carbono Lábil	6
2.4 Carbono Solúvel em Água.....	6
2.5 Carbono da Biomassa Microbiana.....	7
2.6 Nitrogênio Total	8
3 MATERIAL E MÉTODOS	10
3.1 Histórico da Área	10
3.2 Tratamentos e Delineamento experimental	10
3.3 Coleta de Solo	11
3.4 Densidade e Análise Física do Solo.....	12
3.5 Análises Laboratoriais.....	13
3.5.1 Determinação do carbono orgânico total	13
3.5.2 Determinação do carbono lábil	14
3.5.3 Determinação do carbono solúvel em água.....	14
3.5.4 Determinação do carbono da biomassa microbiana	15
3.5.5 Determinação do nitrogênio total.....	16
3.6 Estoque de Carbono.....	17
3.7 Índice de Manejo do Carbono	17
3.8 Análise Estatística	18
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
4.1 Densidade do Solo	19
4.2 Carbono Orgânico e Nitrogênio Total	20
4.3 Carbono Lábil	25
4.4 Carbono Solúvel em Água.....	27
4.5 Carbono da Biomassa Microbiana	30
4.6 Estoque de Carbono no Solo	32
4.7 Índice de Manejo do Carbono	36
5 CONCLUSÕES.....	39
6 REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

Estudos acerca de estratégias ambientais e comerciais que visem a mitigação da emissão de gases do efeito estufa (GEE) ganharam destaque nas últimas décadas, e a redução de atividades que contribuem para a emissão desses gases tornou-se um desafio a ser vencido. O desmatamento, queima de combustíveis fósseis e o uso incorreto da terra contribuem intensamente com o aumento na concentração de gás carbônico (CO_2) atmosférico, que passou de 278 ppm para 410,5 ppm entre a época pré-industrial e 2019 (WMO, 2020).

O ritmo de aumento da concentração de gás carbônico pode ser aliviado pela fixação de carbono no solo (MEENA et al., 2018), que ocorre através de processos biogeoquímicos e pela decomposição da matéria orgânica (LAL, 2018). Diversos tipos de sistemas de produção agropecuários contribuem para o aporte de matéria orgânica do solo (MOS), influenciando a produção de compostos orgânicos de diferentes naturezas químicas, que promovem o aumento e diversificação da microbiota do solo, acarretando benefícios para o sistema (OLIVEIRA et al., 2016).

O sequestro de carbono (C) através do cultivo de árvores em simultâneo com forrageiras, denominado sistema silvipastoril, oferece uma opção viável não só para aumentar a fixação de CO_2 atmosférico, mas também para reduzir a emissão advinda dos solos (LORENZ e LAL, 2014). Entretanto, o cenário da pecuária brasileira tem como base majoritária o sistema pastoril em monocultivo, que tradicionalmente representa o principal suporte alimentar para os rebanhos. O sequestro de C pelas pastagens desempenha um papel importante na mitigação parcial dos GEE emitidos pelos sistemas de produção de ruminantes quando a pastagem é bem manejada, no entanto, leva muito mais tempo para construir um estoque carbono do que perdê-lo (SMITH, 2014), o que ressalta a importância de incentivar o melhoramento do pasto em solos tropicais, para proporcionar condições para o sequestro de CO_2 e armazenamento de carbono.

A degradação das pastagens e a deficiência de nutrientes, especialmente nitrogênio, levam à redução da produtividade de forragem, da diversidade biológica, reduzindo a capacidade de suporte animal. Os sistemas de pastagem em monocultivo são tipicamente empobrecidos de nitrogênio, e a presença de leguminosas forrageiras proporciona maior disponibilidade de N por fixação biológica, refletindo na maior efetividade da ciclagem de nutrientes no solo (DUBEUX JR. e SOLLENBERGER, 2021). Além de ser uma forma de prevenir a erosão e degradação do solo em até 30%, o cultivo de gramíneas em conjunto a leguminosas tende a aumentar o número de micro-organismos, proporcionando estabilidade na

relação carbono/nitrogênio, e consequente aumento dos estoques de carbono no solo (HASSEN, 2017).

A avaliação e diagnóstico do manejo do solo em seus diferentes tipos de uso pode ser feita por meio de indicadores como microbiota e frações da matéria orgânica, oriundas do processo de decomposição do material vegetal, que são sensíveis às mudanças ambientais (FRANCHINI et al., 2007). A efetividade do processo de decomposição depende da composição da biomassa depositada no solo, sendo correlacionada diretamente com o sistema de produção. Assim, a utilização de indicadores de qualidade permite a identificação de estratégias de manejo sustentáveis para a manutenção da produtividade em solos cultivados.

Tendo em vista a busca por sistemas de produção pecuária que se aliem à sustentabilidade, somado à escassez de estudos que comparem diferentes formas de uso do solo para produção animal, a hipótese deste trabalho é que a presença de *Eucalyptus urophylla* em um sistema silvipastoril com *Urochloa decumbens* cv. Basilisk proporciona efeitos positivos nos estoques de carbono e nitrogênio do solo, aproximando-os dos estoques de mata nativa, quando comparado com monocultivo de pastagem *Urochloa decumbens* cv. Basilisk, e consórcio de *Urochloa decumbens* com *Arachis pintoi* cv. Amarillo, objetivando avaliar a qualidade do manejo do solo através da quantificação dos teores totais de carbono e nitrogênio, frações lábeis e solúveis do carbono orgânico, quantificação do carbono da biomassa microbiana, e estoque de carbono no solo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Matéria Orgânica do Solo nos Sistemas de Uso da Terra

Apesar dos bons índices de produtividade da pecuária brasileira, o aumento da produção animal durante longos anos foi decorrente da expansão das áreas de pastagem, e não devido ao aumento da produtividade (DIAS FILHO et al., 2011). Dada expansão foi decorrente dos altos índices de degradação em que a grande maioria dos pastos se encontrava, situação essa que foi parcialmente revertida através do fomento de tecnologias de recuperação e manutenção das pastagens (GARCIA et al., 2010; DIAS FILHO et al., 2011).

Atualmente um dos maiores desafios da produção animal é fornecer alimentos de forma compatível com os recursos naturais disponíveis, e concomitante a isso, esforços são realizados visando a redução das emissões de gases de efeito estufa nessa atividade. A utilização de práticas de manejo sustentáveis pode contribuir para um novo estado de equilíbrio, promovendo também efeitos positivos para o solo. Nesse contexto, a adoção de práticas benéficas ao meio ambiente é de grande importância, como é o caso dos sistemas silvipastoris que através do cultivo simultâneo de árvores e gramíneas apresentam potencial significativo para mitigação das emissões de gases do efeito estufa pelo solo (CASTRO NETO et al., 2017).

Estudos relatam que a conversão de áreas nativas para cultivadas, principalmente com plantações de eucalipto, podem influenciar a dinâmica da matéria orgânica do solo (WINK et al., 2015). Isso favorece o aumento dos estoques de carbono mesmo nas camadas subsuperficiais, podendo aumentar também os valores de carbono nas frações húmicas da matéria orgânica em relação às áreas que utilizam apenas gramíneas (LOSS et al., 2014; LUSTOSA FILHO et al., 2017).

Inúmeros benefícios são associados ao componente arbóreo, tanto para sustentabilidade e recuperação do sistema, quanto para aspectos de importância ecológica. A presença de árvores pode proporcionar maior conforto térmico aos animais, promover controle da erosão e aumentar a fertilidade do solo, reduzir os gastos com insumos, melhorar o aproveitamento da água das chuvas, além de promover incremento da rentabilidade e valorização da propriedade rural (MATOSO e SALMAN, 2016).

Apesar da constante adesão aos sistemas silvipastoris, a área de pastagem no Brasil é de ~ 159 milhões de hectares, o que corresponde a 45% das terras agricultáveis, e dentre elas, aproximadamente 12 milhões de hectares encontram-se em algum estágio de degradação (IBGE, 2017). O aporte de resíduos, principalmente advindo da constante renovação do sistema radicular das gramíneas, quando bem manejadas, conferem às gramíneas alta capacidade de

estocar carbono no solo (OLIVEIRA et Al., 2016). Além disso, o aumento dos estoques de C nas áreas de pastagens tem sido atribuído a formação intensiva de húmus e grande quantidade de raízes finas (MORAES et al., 1996), ao sistema radicular denso que reduz as trocas de água e gases diminuindo as taxas de decomposição da matéria orgânica (GUO e GILFFORD., 2002); aos insumos aplicados nas plantações que melhoram as características físicas do solo (TATE et al., 2000); e ao fato de que o solo sob pastagem não é perturbado (arado) como as terras agrícolas (GUO e GIFFORD, 2002).

Um ponto importante no sistema de produção de gramíneas é o aporte de nitrogênio, nutriente essencial para o crescimento das forrageiras, que é interdependente do carbono, pois ambos são derivados da matéria orgânica (CALAZANS et al., 2018; LIU et al., 2018). A principal forma de fornecer nitrogênio à planta forrageira é pela fertilização química, no entanto, a utilização de leguminosas consorciadas com gramíneas pode contribuir com a inserção de N para o sistema via fixação biológica, decorrente da simbiose entre a leguminosa e bactérias do gênero *Rhizobium*. Neste contexto, destaca-se o alto potencial do amendoim forrageiro como estratégia para o suprimento de N ao ecossistema de pastagem, por reduzir ou dispensar a utilização da adubação nitrogenada com fertilizantes sintéticos ou outras fontes (BARBERO, 2009).

A avaliação dos benefícios das boas práticas agrícolas pode ser feita pela quantificação de indicadores-chave, como os estoques de carbono e nitrogênio do solo (OLIVEIRA et al., 2015; KUNDE et al., 2018). No entanto, geralmente há pouca mudança nos estoques totais de carbono orgânico em um curto espaço de tempo. Diante disso, estudos sugerem a utilização de outras frações da matéria orgânica para avaliação do efeito dos sistemas de uso da terra, enfatizando principalmente as frações lábeis e solúveis da matéria orgânica (MO), assim como C da biomassa microbiana (LOSS et al., 2014; BALIN et al., 2017; LOSS et al., 2014;).

Além das frações da MO, o índice de manejo do carbono (IMC) também pode ser utilizado como alternativa para avaliação da qualidade dos ecossistemas. O IMC proposto por Blair et al. (1995) visa avaliar de forma conjunta o efeito dos sistemas de manejos na quantidade e qualidade (labilidade) da MOS, relacionando o estoque de carbono orgânico total e o carbono lável do tratamento em estudo, com os estoques de um sistema de referência. A determinação desse índice permite observar o quanto, de fato, os sistemas de manejos podem ser superiores ou iguais as áreas referencias, sendo que valores inferiores a 100 são indicativos de impacto negativo das práticas de manejo adotada sobre os teores de carbono do solo (BLAIR et al., 1995; CONCEIÇÃO et al., 2014).

2.2 Carbono Orgânico Total

A MOS é composta por plantas, animais e microorganismos em diferentes fases de decomposição, sendo um componente fundamental para manutenção da capacidade produtiva dos solos. O carbono orgânico corresponde a 58% da matéria orgânica (NANZER et al., 2019), interferindo e interagindo com praticamente todos os processos e atributos físicos, químicos e biológicos, influenciando a retenção de água, ciclagem de nutrientes, a atividade de micro e macrorganismos, a formação de agregados, a complexação de metais pesados, etc. (PEREIRA, 2013). O clima e a vegetação afetam significativamente as concentrações de carbono orgânico total (COT) e N no solo, determinando o equilíbrio entre as entradas de C orgânico derivadas da produção da planta e as perdas de C por decomposição microbiana (MOREIRA, 2004).

Gerenciar o carbono orgânico do solo (COS) por meio de práticas de manejo otimizadas é uma estratégia para aprimorar os serviços do ecossistêmicos. A matéria orgânica é a principal fonte de nutrientes para o crescimento das plantas, representando também o principal reservatório de C no sistema biosfera-atmosfera formando estruturas moleculares nas quais os nutrientes da MOS estão ligados, consequentemente, o carbono orgânico do solo é considerado uma propriedade “guarda-chuva” da fertilidade pois a diminuição desses teores resulta na redução de outras propriedades do solo, uma vez que todas estão interrelacionadas (GUILLAUME, 2015).

Dentre os processos positivos e negativos influenciados pela relação mútua entre COS e as propriedades do solo estão a agregação; compactação; fluxos de energia; formação de crostas e rachaduras na superfície; erosão hídrica e eólica; atividade microbiana; biodegradação; entre outros. Enquanto o COS melhora a agregação, o aumento na estabilidade dos agregados do solo pode aumentar a macroporosidade, aumentar a infiltração de água e promover a atividade microbiana. Por sua vez, os agregados estáveis protegem e promovem o armazenamento carbono em longo prazo (FERREIRA et al., 2010).

Diversos estudos comprovaram a que o sequestro de carbono é uma maneira efetiva de mitigar as emissões de CO₂ em solos agrícolas, onde o valor do COS costuma estar associado às mudanças climáticas, mas esta não é a única razão para manejarmos o solo com o objetivo de aumentar o armazenamento de carbono. É importante destacar que o COS desempenha um papel essencial na melhoria dos processos e propriedades físicas, químicas e biológicas nos sistemas de produção. Assim, aumentar a concentração de carbono no solo, independentemente

de seu potencial de mitigação das mudanças climáticas, é necessário para melhorar muitos processos e propriedades produtivas do sistema (BLANCO et al., 2013).

Segundo Ribeiro et al. (2011), o carbono orgânico acumula-se em diferentes frações (lábeis e estáveis) da matéria orgânica, as quais determinam seu efeito e tempo de permanência no sistema. Apesar de ser um indicador de qualidade, os teores totais de carbono orgânico nem sempre refletem as alterações de uso e manejo do solo em curto prazo. Por causa da complexidade de seus componentes, a identificação dos compartimentos ou frações da MOS é de grande importância para o entendimento de sua dinâmica em determinado sistema, essa identificação pode auxiliar na formulação de estratégias que preservem a MOS e viabilizem sistemas produtivos mais sustentáveis (CERETA et al., 2008; MENDONÇA, 2007).

2.3 Carbono Lábil

O carbono lábil é definido como o constituinte de compostos orgânicos com maior facilidade de mineralização pelos microrganismos funcionando como um indicador utilizado para avaliar as diferentes formas de uso do solo (RANGEL et al., 2008). A fração lábil, também chamada de matéria orgânica particulada (MOP), compreende cerca de 10-30% do carbono orgânico total e é constituída por resíduos de plantas recém-adicionados ao solo, em diferentes estágios de decomposição (CAMBARDELLA e ELLIOT, 1992).

Por apresentar alta taxa de decomposição e um curto período de permanência no solo a principal função do carbono lábil é fornecer nutrientes às plantas através da mineralização, além de energia e carbono aos microrganismos do solo, representando um importante fator de regulação da atividade e diversidade microbiana (INACIO, 2009; SILVA et al., 2011). Além de servir para inferir sobre a adição de carbono no sistema, é também considerado uma alternativa interessante para avaliar as ações antrópicas nos agroecossistemas devido à sua alta sensibilidade às mudanças causadas pelo uso e manejo do solo (RANGEL e SILVA, 2017).

Em solos não perturbados, o carbono lábil diminui progressivamente com o aumento da profundidade, enquanto o carbono estável aumenta proporcionalmente nas camadas subsuperficiais, e essa inversão dos compartimentos está associada aos processos de transformação que ocorrem na camada superficial do solo, onde há deposição constante de serapilheira e maior atividade microbiana (SÁ e LAL, 2009).

2.4 Carbono Solúvel em Água

Dentre as formas de carbono lábil, destaca-se o carbono solúvel em água (CSA), uma forma de carbono composta por moléculas hidrofílicas, carboidratos, sacarídeos, ácidos orgânicos, e uma pequena fração de ácidos fúlvicos (OLIVEIRA JÚNIOR et al., 2008), que podem ser facilmente mobilizadas e então absorvidas e metabolizadas por células microbianas (MARSCHNER et al., 2003). O carbono solúvel em água fornece recursos imediatos para micro organismos do solo, portanto desempenha um papel importante nas respostas em curto prazo da atividade microbiana às mudanças ambientais (SINGH et al., 2021).

Alguns fatores que influenciam o acesso microbiano ao C podem ser críticos para controlar o equilíbrio de produção e consumo de carbono solúvel em água e, portanto, para armazenamento de C no solo em longo prazo (SCHIMEL et al., 2018). A concentração de CSA no solo é regulada por atributos como qualidade e teor de matéria orgânica, acidez do solo, disponibilidade de nutrientes, mineralogia e fatores ligados a comunidade microbiana (OLIVEIRA JÚNIOR et al., 2008). É definido ainda como a fração do carbono orgânico que é solúvel em água, com partículas de diâmetro menor que 0,45 μm (INACIO, 2009), que podem ser oriundos do início da decomposição de resíduos orgânicos, serrapilheira, resíduos culturais, de origem microbiana e também de exsudatos radiculares (SOUZA e MELO, 2003).

O carbono orgânico solúvel em água é considerado a fração mais lábil e reativa do carbono no solo, que pode ser liberado em semanas ou meses, refletindo a fase inicial da degradação dos materiais orgânicos adicionados ao solo (SILVA e MENDONÇA, 2007). Essa forma de C desempenha um papel importante em diversos processos do solo, regulando o transporte de poluentes e de nutrientes, podendo atuar também como complexante de metais pesados amenizando potenciais efeitos tóxicos às plantas (OLIVEIRA JÚNIOR et al., 2008).

O CSA forma complexos solúveis de carga neutra, com cátions metálicos que facilmente são deslocados do perfil do solo, de modo que os cátions como Ca^{2+} e Mg^{2+} possam ser translocados para as camadas mais profundas, e assim a toxidez causada por Al^{3+} em função da movimentação desses complexos pode ser reduzida, minimizando o efeito da acidez do solo (CIOTTA et al., 2004).

2.5 Carbono da Biomassa Microbiana

A biomassa microbiana do solo (BMS) que também pode ser denominada de carbono da biomassa microbiana (C-BMS), é considerada a parte viva da matéria orgânica, classificada como o compartimento central do ciclo do carbono, englobando bactérias, fungos e micro fauna do solo, não levando em consideração as raízes e animais maiores do que 5.000 μm^3 ; atua como

agente de transformação da matéria orgânica no ciclo de nutrientes e no fluxo de energia, contendo em média de 1 a 4% do carbono orgânico do solo (MOREIRA et al., 2006).

Embora compreenda menos de 5% da matéria orgânica do solo, a biomassa microbiana desempenha funções críticas para a produção de plantas no ecossistema. É uma fonte lábil de carbono, nitrogênio, fósforo (P) e enxofre (S) (DALAL et al., 1998); além disso, os microrganismos formam associações simbióticas com as raízes, agindo como agentes biológicos contra os patógenos das plantas, e contribuem para a formação e agregação do solo (ANGERS et al., 1992).

O C-BMS é capaz de promover mudanças importantes no solo devido à grande quantidade de células vivas, e ao fato de ser um dos maiores componentes lábeis da matéria orgânica (DIONISIO et al., 2016). Quando há baixa deposição de resíduos orgânicos há uma redução na BMS devido à pouca disponibilidade de alimento para crescimento populacional dos microrganismos (TOMAZI et al., 2019), por outro lado, em situações com maior acúmulo de resíduos no solo, principalmente através de grandes quantidades de raízes, há estímulo da biomassa microbiana, o que acarreta seu aumento populacional e sua atividade (BONETTI et al., 2018). Assim, a biomassa microbiana representa um indicador de grande sensibilidade para avaliar as mudanças no solo, pois é grandemente influenciado pelo manejo e características da cultura implantada no sistema (MOREIRA et al., 2006), ou seja, o monitoramento dos níveis de carbono da biomassa é uma medida adequada para determinar se um conjunto de práticas é sustentável (DIONISIO et al., 2016).

A entrada de C orgânico no solo por meio dos resíduos de colheitas depende das condições nutricionais da biomassa vegetal, umidade, e manejo em que foi desenvolvida a cultura, sendo o nitrogênio o nutriente mais influente neste processo (URQUIAGA et al., 2006).

2.6 Nitrogênio Total

O C orgânico no solo é armazenado em uma miríade de diferentes compostos químicos, muitos dos quais contém nitrogênio, ou são formados por meio da atividade microbiana que exige N. Sendo assim, a capacidade dos solos de armazenar carbono está ligada diretamente à disponibilidade de nitrogênio; e aumentar o armazenamento de C no solo sem aumentar a fertilização de N ou imobilizar este nutriente, e mesmo assim impactar positivamente a produtividade das plantas, é um grande desafio para as estratégias de sequestro de C do solo (COTRUFO et al., 2019)

A quantificação dos teores de nitrogênio total (NT) na matéria orgânica, assim como o carbono total, expressa a quantidade deste nutriente no ambiente, e está relacionada à fertilidade do mesmo (BATTISTI, 2017). Entre os indicadores de qualidade, é importante destacar o nitrogênio total por apresentar estreita relação com a capacidade produtiva do solo, uma vez que o rendimento de culturas tem sido principalmente atribuído ao aumento da disponibilidade de N (AMADO et al., 1999). Os teores de nitrogênio nas diferentes profundidades do solo apresentam o mesmo padrão de distribuição dos teores de carbono, com os maiores valores observados em camadas mais superficiais, onde há maior acúmulo de matéria orgânica sendo, dessa forma, também influenciados pelos sistemas de plantio adotados (RANGEL et al., 2008).

Apesar do N ser um nutriente de extrema importância, apenas uma pequena fração mineral (representado majoritariamente na forma de amônio e nitrato) equivalente a 2% do NT fica disponível para absorção pelas raízes, enquanto o restante permanece predominantemente complexado e indisponível em formas orgânicas (MENDONÇA et al., 2005; SOUZA et al., 2006). Os teores de N total, assim como a forma em que o nutriente se encontra no solo, podem condicionar diferentes velocidades de mineralização e quantidades acumuladas de nitrogênio mineralizado, sendo provável que elevadas taxas desse processo ocorram nos períodos iniciais de decomposição da matéria orgânica, fazendo com que resíduos mais ricos em N e menos humificados liberem maiores quantidades de nitrogênio (CARNEIRO et al., 2013).

A associação da pouca disponibilidade de N com a grande demanda exigida pelas plantas torna esse nutriente um potente limitante ao crescimento e desenvolvimento de algumas culturas (SANTIAGO, 2013; GAMA-RODRIGUES et al., 2005). A identificação e a quantificação das formas orgânicas de N total no solo podem auxiliar no entendimento dos processos que norteiam a disponibilidade do nitrogênio para as plantas, e formação da matéria orgânica do solo (CHOI et al., 2005).

Os valores de carbono e nitrogênio do solo, quando associados através da relação C:N, possibilitam a obtenção de índices que revelam a dinâmica destes nutrientes de maneira mais adequada, refletindo a qualidade da matéria orgânica do solo, assim como a eficiência da decomposição, eficiência da conversão de carbono e nitrogênio orgânico em mineral, e consequente estocagem no solo (MONTEIRO e GAMA-RODRIGUES, 2004).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Histórico da Área

O estudo foi realizado na Fazenda Registro, localizada no município de Barbacena-MG, situada à latitude de 21°15'18"S, longitude de 43°44'01"W e a 1.092m de altitude. O solo é classificado como Cambissolo Haplíco distrófico (AMARAL et al., 2004). O clima é do tipo Cwb (Classificação de Köppen), tropical de altitude, com invernos frios e verões amenos. A área de estudo possui 27 hectares, dos quais 12 são de área manejada com diferentes cultivos, e 15 ha de floresta nativa advinda de regeneração natural. As coletas de solo foram realizadas durante dois dias no mês de janeiro de 2021.

Em 1984 a área sofreu um corte raso para extração de árvores objetivando a produção de carvão. A partir dessa época, 12 hectares dos 27 pertencentes à área de estudo receberam manejo (Tabela 1), enquanto os 15 hectares referentes à floresta nativa permaneceram em regeneração. Atualmente as áreas não recebem manejo de solo, adubação, e não contam com a presença de animais.

Tabela 1. Histórico de uso do solo na área de estudo.

Ano	Manejo
1984	Corte raso em 27 ha.
1984 a 1994	12 hectares foram arrendados.
1994	<i>Urochloa decumbens</i> cv. Basilisk foi implantada na área de 12 ha que havia sido arrendada.
1996	Milho consorciado com <i>Arachis pintoi</i> cv Amarillo em 2 ha.*
2008	Implantação de <i>Eucalyptus urophylla</i> em 5 ha consorciado com <i>Urochloa decumbens</i> cv. Basilisk

Histórico uso da terra durante 24 anos na área experimental. *Solo recebeu aração e gradagem durante 3 anos, de 1996 a 1998.

3.2 Tratamentos e Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado é inteiramente casualizado, sendo os tratamentos compostos por: Tratamento 1 - consórcio gramínea - leguminosa (CGL), tratamento 2 - sistema silvipastoril com eucalipto (SSP), tratamento 3 - monocultivo de pastagem (MP), tratamento 4 -floresta nativa de Cerrado. (FN) (Figura 1).



Figura 1. A) Consórcio gramínea leguminosa (CGL). B) Sistema Silvipastoril (SSP). C) Monocultivo de pastagem (MP). D) Floresta nativa (FN).

3.3 Coleta de Solo

Em cada tratamento foram abertas cinco mini trincheiras de 30 centímetros de profundidade, caracterizando 5 repetições, onde foram coletadas amostras de solo deformadas e indeformadas em 4 profundidades (0-5cm; 5-10cm; 10-20cm; 20-30cm) (Figura 2), sendo 20 amostras por tratamento e 80 amostras totais. As 80 amostras indeformadas foram peneiradas, secas ao ar, e armazenadas em câmara seca.

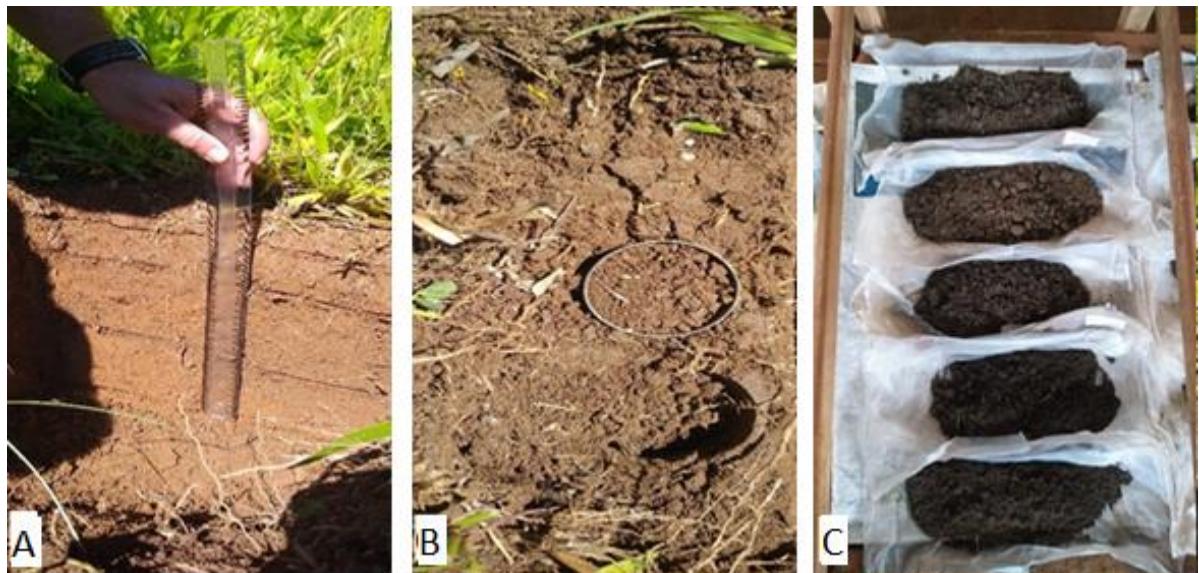


Figura 2. A) Mini trincheiras de 30 centímetros B) Anel volumétrico alocado no solo C) Solo deformado

3.4 Densidade e Análise Física do Solo

Com o objetivo estimar a densidade do solo para realizar os cálculos dos estoques de carbono e nitrogênio, foram coletadas em cada uma das 5 trincheiras, nos 4 tratamentos, 4 amostras indeformadas referentes às 4 profundidades avaliadas, com o auxílio de anéis de Kopeck com volume interno de 100 cm³, totalizando 80 amostras. O solo coletado foi submetido à estufa de 105°C e a densidade calculada através da fórmula:

$$Ds = \frac{P}{V}$$

Onde Ds = densidade do solo (g/cm³); P = peso do solo seco (g); V = volume do anel (cm³).

A análise física referente às frações texturais do solo foi realizada no laboratório Athenas Consultoria Agrícola, localizado no município de Jaboticabal/SP. Com os resultados disponibilizados pelo laboratório foram calculados as médias das frações de argila, areia e silte (Tabela 2).

Tabela 2. Características granulométricas do solo em diferentes profundidades.

SISTEMA	Argila	Silte	Areia
	(%)		
	Profundidade do solo 0-5 (cm)		
CGL	37,5	11,7	50,9
SSP	22,5	10,3	66,0
MP	35,0	11,7	54,3
FN	25,0	9,1	67,8
Profundidade do solo 5-10 (cm)			
CGL	37,5	12,5	51,5
SSP	22,5	7,5	67,5
MP	35,0	8,5	56,7
FN	25,0	9,2	65,1
Profundidade do solo 10-20 (cm)			
CGL	37,5	11,5	51,5
SSP	22,5	6,3	68,8
MP	35,0	9,6	55,5
FN	27,5	9,0	65,7
Profundidade do solo 20-30 (cm)			
CGL	40,0	11,5	46,5
SSP	25,0	8,5	67,2
MP	40,0	9,6	53,4
FN	27,5	8,0	63,3

CGL: Consórcio gramínea - leguminosa; SSP: sistema silvipastoril; MP: monocultivo de pastagem; FN: Floresta nativa. Valores seguidos de letras iguais, na mesma profundidade, não apresentam diferenças significativas entre si pelo teste de Dunn ($p<0,05$).

3.5 Análises Laboratoriais

Todas as análises laboratoriais referentes às frações de carbono e nitrogênio do solo foram feitas no Laboratório de Forragicultura e Pastagem da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, pertencente à Universidade Estadual Paulista, FCAV/UNESP, localizada em Jaboticabal, São Paulo, Brasil.

3.5.1 Determinação do carbono orgânico total

O carbono orgânico total do solo foi determinado segundo metodologia proposta por Yeomans e Bremmer (1988), através da digestão de 0,5 g de terra fina seca ao ar (TFSA) passada em peneira de 0,2 mm, em 5 ml de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$ - 0,167 mol L⁻¹) e 7,5 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4), por 30 minutos a 170 °C, em bloco digestor. Em seguida, foram adicionados 0,3 ml de solução indicadora de ferroin em cada amostra e, procedida titulação com a solução de sulfato ferroso amoniacial ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ - 0,2 mol L⁻¹). Foram realizados quatro brancos controle, sendo dois submetidos a digestão e dois sem

digestão. A quantidade de COT foi expressa em porcentagem através do volume da solução de sulfato ferroso amoniacal gasto na titulação da amostra (Vam), do branco aquecido (Vba) e do branco não aquecido (Vbn), conforme equações:

$$V = \left[(Vba - Vam) * \frac{Vbn - Vba}{Vbn} \right] + (Vba - Vam).$$

$$CO(g/kg) = \frac{V * \text{molaridade sulf. ferroso} * 3}{\text{peso da amostra (g)}}$$

Em que: 3 refere-se ao resultado da relação entre o número de mols de Cr_2O_7 que reagem com Fe^{2+} , multiplicado pelo número de mols de Cr_2O_7 que reagem com o CO, multiplicado pela massa atômica do C (12).

3.5.2 Determinação do carbono lábil

A quantificação do C-lábil (CL) foi procedida segundo metodologia de Blair (1995), a qual foi adaptada para solos tropicais por Shang e Tiessen (1997). O procedimento tem como objetivo a oxidação do carbono lábil a partir da utilização do permanganato de potássio ($KMnO_4$). Foi pesado 1 g de TFSA peneirado em peneira de 0,2 mm, em tubos de centrífuga de 50 ml. Em seguida, adicionados 25 ml da solução de $KMnO_4$ - 0,033 mol L^{-1} , e agitado por uma hora a 60 rpm em agitador vertical. Após esse procedimento, as amostras foram centrifugadas por 5 minutos. Foi pipetado 1 ml do sobrenadante em balão de 250 ml, completando o volume com água deionizada. A posterior quantificação do carbono da amostra foi feita por leitura em espectrofotômetro com comprimento de onda de 565 nm. Foi feita uma curva padrão para determinação do C-lábil a partir de diferentes concentrações de $KMnO_4$ - 0,033 mol L^{-1} , sendo: 0,030; 0,0280; 0,0250 e 0,020 mol L^{-1} . A molaridade (mmol) de cada amostra foi quantificada através da equação de regressão obtida pela curva padrão: $Y = 0,18868x - 0,0002$. A quantificação do C-lábil foi obtida por:

$$Clábil (mg/kg) = \frac{(Y * 9 * 25) / \text{peso da amostra}}{1000}$$

Onde Y = molaridade da amostra, 9 = equivalência de 1 mmol $KMnO_4$ oxidado em 1 mgC, 25 = quantidade de extrator utilizado; 1000 = fator de conversão de g para mg.

3.5.3 Determinação do carbono solúvel em água

O carbono solúvel em água (CSA) foi quantificado através do método de Bartlett e Ross (1988), estimando-se a quantidade de C presente na amostra pela perda de cor, resultante da redução do Mn (III) - pirofosfato pelo C orgânico em meio ácido (H_2SO_4).

Dez gramas de solo foram pesados em tubos de centrífugas acrescidos de 40 ml de água deionizada. Em seguida, permaneceram em agitador horizontal por 15 minutos e, posteriormente, centrifugados a 1.500g (FCRmédia) por 10 minutos, por fim, filtrados em papel filtro quantitativo. Após a filtragem, 2,5 ml do extrato filtrado foram colocados em tubos de ensaio e adicionado 2,5 ml de água destilada, 2,5 ml de reagente de trabalho (solução composta por $H_2O + Na_4P_2O_7 0,1\text{ mol L}^{-1} + H_2SO_4 0,5\text{ mol L}^{-1} + KMnO_4 0,1\text{ mol L}^{-1}$) e 2,5 ml de H_2SO_4 concentrado, e a solução deixada em repouso por 18 horas. Decorrido o tempo, procedeu-se a leitura em espectrofotômetro com comprimento de onda de 495 nm. Foi feita uma curva padrão para determinação do CS. Os cálculos de CS foram realizados através das equações:

$$A(\text{mmol L}^{-1}) = (LA - Lmáx)/(Lmín)$$

$$CS(\text{g.kg}^{-1}) = (A * 40 * 12)/\text{peso da amostra (g)}$$

Em que LA = leitura da amostra no espectrofotômetro, Lmáx = valor máximo obtido na leitura da curva e Lmín = valor mínimo obtido na leitura da curva. 40 refere-se à quantidade de água utilizada para solubilizar a amostra e 12, a massa molar do carbono.

3.5.4 Determinação do carbono da biomassa microbiana

Para determinação do carbono da biomassa foi utilizado o método da fumigação - extração proposto por Vance et al. (1987), realizando a fumigação com acréscimo de clorofórmio (sem álcool) na amostra, como sugerido por Brookes et al. (1982) e Witt et al. (2000), armazenando-as em local isento de iluminação por 24 horas. Dez gramas das amostras de TFSA foram pesadas em duplicatas, sendo duas fumigadas e duas não fumigadas com clorofórmio. Cada amostra foi adicionada em frascos de vidro, e nas amostras destinadas a fumigação foi acrescido 1 ml de clorofórmio. Os frascos foram fechados e armazenados em local escuro por 24 horas, com temperatura média de 26 °C. No dia seguinte, foram abertos em capela de exaustão até que todo o clorofórmio fosse evaporado, para posterior extração.

A extração tanto nas amostras fumigadas quanto nas não fumigadas foi feita com adição de 50 ml de solução de sulfato de potássio ($K_2SO_4 - 0,5\text{ mol L}^{-1}$) e agitação por 30 minutos em agitador orbital a 220 rpm, seguido de decantação e filtragem do sobrenadante em papel filtro

quantitativo. Após a filtragem, foi transferido 8 ml do extrato filtrado para Erlenmayers de 250 ml, acrescido 2 ml da solução de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$), 10 ml de H_2SO_4 , e 5 ml de ácido orto-fosfórico (H_3PO_4), nessa ordem.

Após resfriamento da solução, foram adicionados 70 ml de água deionizada e, em seguida, 4 gotas de difenilamina. A titulação, foi realizada sob agitação magnética com uma solução de sulfato ferroso amoniacial 0,033 mol L^{-1} (sal de mohr). Para a quantificação do C-BMS, primeiramente, será verificado o volume oxidado em cada amostra:

$$Voxi = (Vb - Vt)$$

Onde: Voxi = volume oxidado, Vb = Volume de Sal de Mohr utilizado para titulação do branco e Vt = Volume de Sal de Mohr utilizado para titulação das amostras. A quantidade de C-BMS das amostras foi calculada através das equações:

$$C(\text{mgC. kg}) = \frac{(Vb - Va) * M * 0,003 * V_1 * 10^6}{Ps * V_2}$$

$$BMS = FC * k_c$$

Onde C = carbono extraído do solo; Vb (ml) - volume do sulfato ferroso amoniacial gasto na titulação da solução controle (branco); Va (ml) - volume de sulfato ferroso amoniacial gasto na titulação da amostra; M - molaridade do sulfato ferroso amoniacial; V₁ - volume do extrator (K_2SO_4) utilizado; V₂ - alíquota pipetada do extrato para a titulação; 0,003 - miliequivalente do carbono; Ps (g) - massa de solo seco. BMS-C= carbono da biomassa microbiana do solo; FC - Fluxo obtido da diferença entre a quantidade de C da equação anterior; kc - fator de correção = 0,33.

3.5.5 Determinação do nitrogênio total

A determinação de N total foi feita através da pesagem de 0,5 g de solo transferido para tubo de digestão de 100ml. Foi adicionado 1mL de H_2O_2 30% e 2,0ml de H_2SO_4 concentrado. Após a solução atingir temperatura ambiente, foi adicionado 0,7 g de mistura de digestão (100g de Na_2SO_4 , 10g $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ e 1g de selênio metálico). Os tubos foram colocados em um bloco digestor a 250 °C, por 20 minutos. Após este tempo, a temperatura do bloco digestor foi elevada a 350 °C por, 2 horas. Ao resfriar, foi adicionado 5 mL de água destilada em cada amostra e feita destilação a vapor em destilador Kjeldahl, com 10 mL de NaOH em 5ml de indicador de ácido bórico. Após coletar 40mL do destilado, a titulação foi feita com HCl - 0,05 mol L^{-1} ,

como proposto por Bremner e Mulvaney (1982) e Tedesco et al. (1995), adaptado por Mendonça e Matos (2005). Os valores do nitrogênio total no solo são calculados pela equação:

$$N \text{ (dag. } kg^{-1}) = \frac{(Vam - Vbr) * (H^+) * 1,4}{\text{peso do solo (g)}}$$

Em que Vam - volume de HCl gastos na titulação da amostra; Vbr - Volume de HCl gastos na titulação do branco; $[H^+]$ - concentração real do ácido clorídrico (mol/L^{-1}); 1,4 = Peso equivalente do N (14).

3.6 Estoque de Carbono

Para estimar os estoques de carbono levou-se em consideração a correção por camada equivalente de solo, conforme as recomendações propostas por Carvalho et al. (2009). Essa correção é realizada para minimizar os erros de cálculos dos estoques, oriundos da compactação do solo nos sistemas modificados pela ação do homem, para que amostras de camadas compactadas possam ser comparáveis com as da mata nativa na mesma profundidade através da fórmula:

$$EstC = \frac{A * Dstrat * \left(\frac{Dsfloresta}{Dstrat} \right) * e}{10}$$

Onde EstC = estoque de carbono em determinada profundidade (Mg/ha^{-1}); A = teor de carbono na profundidade amostrada (g/kg^{-1}); Dstrat = densidade do solo na profundidade amostrada na área dos tratamentos (kg/m^{-3}); Dsfloresta = densidade do solo para profundidade amostrada na área de referência (kg/m^{-3}); e = espessura da camada considerada (cm).

3.7 Índice de Manejo do Carbono

O IMC foi calculado para cada sistema e para cada profundidade pelo método proposto por Blair et al. (1995). Utilizaram-se os teores de carbono orgânico total e de carbono lúbil. Os cálculos para a estimativa do Índice de Manejo de Carbono foram realizados considerando a mata nativa como referência ($IMC=100$). Para estimar o IMC é necessário obter o índice de comportamento do carbono (ICC), labilidade (L) e índice de labilidade (IL). Estes serão obtidas através das seguintes fórmulas:

$$CNL = COT - CL$$

$$ICC = COTtrat/COTref$$

$$L = CL/CNL$$

$$IL = Ltrat/Lref$$

Em que: CNL = teor de carbono não lável ($g\ kg^{-1}$); COT = teor de carbono orgânico total ($g\ kg^{-1}$); CL = teor de carbono lável (g/kg^{-1}); ICC = índice de comportamento do carbono; COTtrat = teor de carbono no solo do tratamento (g/kg^{-1}); COTref. = teor de carbono no solo do sistema referência (g/kg^{-1}); L = labilidade do carbono; IL = índice de labilidade do carbono no solo; Ltrat = labilidade do carbono no solo no tratamento e Lref = labilidade do carbono no solo no sistema referência. A partir do ICC e IL, foi calculado o IMC.

$$IMC = ICC * IL * 100$$

3.8 Análise Estatística

Os dados obtidos foram submetidos aos testes de Lilliefors e Bartlett para verificar as distribuições normais e homogeneidade, respectivamente. A análise de variância foi utilizada para comparar as médias de cada variável segundo o modelo estatístico representado por:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + e_{ij}$$

Em que Y_{ij} é a variável dependente (i e j denotam a variável independente e a replicação dentro do nível), μ é o efeito médio geral, T_i é o efeito do tratamento i, e e_{ij} o erro aleatório.

Como as hipóteses de normalidade e homogeneidade não foram validadas, optou-se pelo uso de estatística não paramétrica para todas as avaliações. Assim, foi aplicado o teste Kruskal-Wallis e posterior comparação em pares pelo teste de Dunn ao nível de significância 5% ($p<0,05$). As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do Software R.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Densidade do Solo

Foram observadas diferenças de densidade do solo entre usos da terra ($p<0,05$) apenas na profundidade 5-10cm onde o sistema silvipastoril (SSP) expressou maior densidade do solo, e a floresta nativa, menor. Todos os tratamentos seguiram tendência de aumento de densidade com o aumento da profundidade do solo, e a partir dos 10cm não houve diferença significativa entre os tratamentos e o sistema referência (Tabela 3).

Tabela 3. Densidade do solo avaliada sob diferentes profundidades em sistema de consórcio gramínea-leguminosa, sistema silvipastoril, monocultivo de pastagem, e floresta nativa.

Sistema	Profundidade do solo (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-30
g/cm ³				
CGL	1,16 ns	1,29 ab	1,31 ns	1,31 ns
SSP	1,11 ns	1,37 a	1,44 ns	1,49 ns
MP	1,10 ns	1,28 ab	1,40 ns	1,38 ns
FN	1,06 ns	1,20 b	1,28 ns	1,28 ns

CGL: Consórcio gramínea - leguminosa; SSP: sistema silvipastoril; MP: monocultivo de pastagem; FN: Floresta nativa. Letras iguais na mesma profundidade não apresentam diferenças significativas pelo teste de Dunn ($p<0,05$).

Em todas as profundidades as menores densidades do solo foram encontradas em floresta nativa, reflexo da ausência de interferência de atividades antrópicas na área. O fato de os outros tratamentos apresentarem densidades estatisticamente semelhantes ($p<0,05$) ao sistema FN nas profundidades 0-5 e 10-30cm demonstra que a compactação resultante do pisoteio animal e uso de maquinários em CGL, SSP e MP, pode ter afetado apenas a camada superficial do solo, indicando que as alterações na densidade causadas por pisoteio animal foram de pequena magnitude, permitindo a regeneração da estrutura do solo (CONTE et al., 2011).

Nesta pesquisa a densidade do solo aumentou em profundidade, enquanto os valores de COT diminuíram, comprovando a correlação negativa entre teores de carbono e densidade do solo (Figura 3).

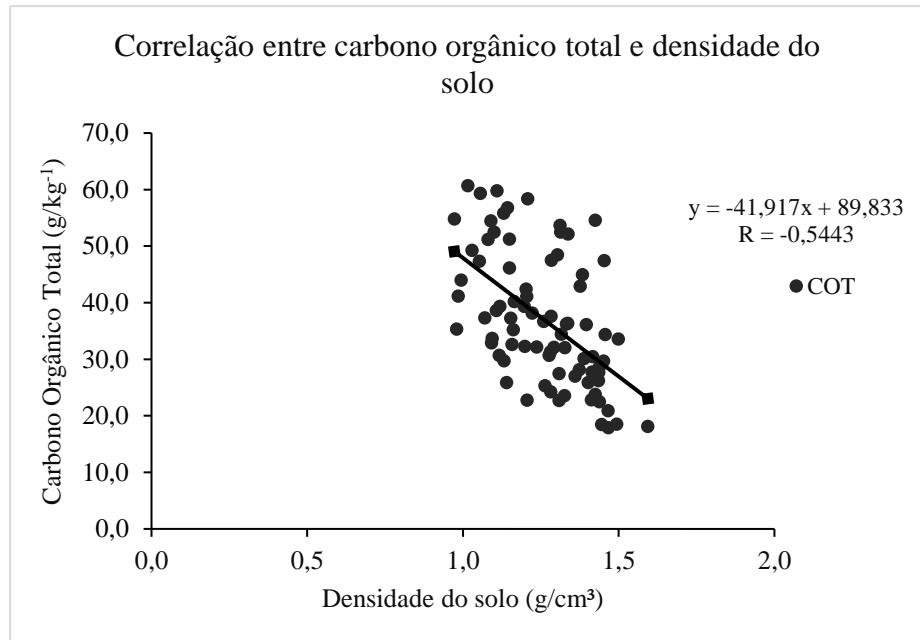


Figura 3. Correlação linear negativa entre dados observados de Carbono Orgânico Total e densidade do solo.

Ao avaliar a qualidade de solos sob diferentes manejos comparados à uma mata nativa Luciano et al. (2020) observaram que as variações dos estoques de carbono no solo dependem diretamente da densidade. Os autores concluem que a densidade do solo diminui linearmente com o aumento no teor de carbono orgânico, e consideraram que essa correlação negativa entre teores de C se deve ao fato de a matéria orgânica apresentar densidade consideravelmente menor do que os constituintes minerais do solo, portanto quanto maior o teor de carbono orgânico, significando maior teor de matéria orgânica, menor a densidade do solo. Rufino (2009) também atribui relação entre carbono orgânico e densidade do solo, justificando que a redução da aeração a partir do aumento da profundidade pode provocar menor atividade de microrganismos decompósitos, resultando decréscimo dos teores de carbono

4.2 Carbono Orgânico e Nitrogênio Total

O teor de carbono orgânico em todos os sistemas de uso da terra foi maior na camada superficial (0-5cm), e tiveram tendência geral de redução com o aumento da profundidade. Os sistemas FN e MP apresentaram semelhança estatística em todas as faixas de avaliação, enquanto CGL e SSP se diferiram do tratamento referência (Tabela 4), evidenciando a perda de carbono a partir da modificação de áreas florestais. Comparados com FN, os teores de COT nos tratamentos CGL e SSP foram, em média, 34% menores na camada 0-5cm, enquanto em MP a

diferença foi de 11,8%. Nas demais camadas, a redução dos teores de COT nos tratamentos foram em média 51% em CGL, 61% em SSP, e 35% em MP.

Tabela 4. Carbono Orgânico Total avaliado em profundidade.

Sistema	Carbono Orgânico Total (g/kg)			
	Profundidade (cm)			
	0-5	05-10	10-20	20-30
CGL	37,3 b	32,1 ab	30,6 ab	22,7 b
SSP	35,3 b	28,2 b	24,2 b	18,5 b
MP	49,2 ab	42,9 a	36,4 a	34,4 ab
FN	55,8 a	54,4 a	52,1 a	47,7 a

CGL: Consórcio gramínea - leguminosa; SSP: sistema silvipastoril; MP: monocultivo de pastagem; FN: Floresta nativa. Valores seguidos de letras iguais, na mesma coluna, não apresentam diferenças significativas entre si pelo teste de Dunn ($p<0,05$).

Em áreas de floresta nativa as adições e perdas de C total atingem um equilíbrio dinâmico onde as variações se tornam menores com o tempo (BAYER e MIELNICZUK, 1999). Quando há conversão de áreas constituídas de vegetação natural em agrícolas e/ou florestais, há uma rápida perda de carbono orgânico em decorrência da combinação entre calor e umidade, intensificando processos bioquímicos, que resultam em altas taxas de decomposição (FU et al., 2001; POST KNOW, 2000). A mudança de uso da terra na área em estudo provocou redução nos teores de carbono total, sendo mais evidente a perda em SSP. Apesar de plantios comerciais de eucalipto serem considerados eficientes em acumular C no solo, o período transcorrido entre a implantação do sistema silvipastoril e a avaliação da qualidade da matéria orgânica pode ter influenciado nesse resultado (ISERNHAGEN et al., 2017).

Estudos anteriores relatam que a presença de espécies arbóreas intensamente produtivas, como o eucalipto, possui alta adição de resíduos orgânicos ao solo, porém esses resíduos nem sempre são incorporados em curto prazo no sistema, pois a presença de altas concentrações de celulose e lignina podem inibir a ação microbiana retardando o processo de decomposição dos resíduos vegetais (SIQUEIRA et al., 1991; SILVA et al., 2004; RANGEL, 2006). Isto permite depreender que a serapilheira e o sistema radicular do eucalipto demandam maior tempo para fixar C orgânico no solo quando comparado à mata nativa e aos outros sistemas que também receberam manejo.

Oliveira et al. (2020) estudando o tempo de meia-vida da serapilheira de coberturas florestais na Bahia apresentaram resultados pertinentes, onde a serapilheira de *Eucalyptus*

urophylla demandou 693 dias para se decompor pela metade, a serapilheira advinda de floresta estacional semidecidual montana apresentou meia vida de 365 dias, *Azadirachta indica* (níngüim indiano) 100 dias, e *Bambusa vulgaris* (bambu) 210 dias, indicando que a matéria orgânica advinda do eucalipto exige 48% mais tempo para ser decomposta e incorporada aos teores de carbono no solo em comparação à floresta nativa. O tratamento SSP foi implantado a 14 anos, indicando que esta janela de tempo ainda não foi suficiente para equiparar os teores de carbono total aos da área de floresta.

Alcântara Neto et al. (2011), ao compararem plantios de eucalipto de 3, 6 e 7 anos de idade com algumas florestas nativas de Cerrado, verificaram que as áreas nativas apresentavam teores maiores de C do que os plantios de eucalipto, mas que a diferença entre essas áreas diminui progressivamente de acordo com o aumento da idade do plantio comercial. Dhillon e Van Rees (2017) destacam que a idade de sistemas silvipastoris povoados com eucalipto, características como altura e diâmetro das árvores, assim como a qualidade da serapilheira, mostram uma correlação positiva com os aumentos nos teores de C do solo. E o fato de raízes, folhas e galhos do componente florestal serem gradualmente e lentamente decompostos, evidencia o potencial de contribuição para o aumento de carbono orgânico em longo prazo (UDAWATTA et al., 2014).

Em contrapartida, o sistema de monocultivo de pastagem revelou maior carbono orgânico total, sendo estatisticamente semelhante à mata nativa em todas as faixas de avaliação (Tabela 4). Resultados semelhantes foram encontrados em outros trabalhos e mostraram que pastos produtivos são capazes de incorporar ao solo altas taxas de C (MAIA et al., 2009; NAVARRETE et al., 2016; TONUCCI et al., 2011; XU et al., 2016).

Investigando a qualidade da matéria orgânica e os estoques de C e N em diferentes sistemas de produção no Cerrado, Almeida et al. (2021) obtiveram resultados semelhantes aos encontrados neste estudo, onde gramíneas em monocultivo apresentaram maior capacidade de agregar carbono orgânico ao solo quando comparado a dois sistemas silvipastoris compostos de capim-marandu (*U. brizantha*) e *Eucalyptus cloeziana* ou *Eucalyptus urograndis*, e vegetação nativa do Cerrado brasileiro. Os autores citam que o abundante volume de raízes de gramíneas, elevada rizo deposição, e a constante renovação do sistema radicular das forrageiras são capazes de promover maior eficiência de alocação de COT até as camadas subsuperficiais do solo.

A área de pastagem em monocultivo foi a primeira a ser implantada, e a condição temporal associada a ausência de manejos intensivos no solo também pode ter contribuído para o resultado obtidos de COT. Resende et al. (2015) ao estudar os atributos físicos e carbono

orgânico em solo sob cerrado convertido para pastagem e sistema misto, relatou que um sistema de monocultivo de pastagem formado há 30 anos expressou valores mais próximos aos encontrados em área de vegetação nativa, tanto em superfície quanto em subsuperfície, quando comparado a um sistema misto de 15 anos, corroborando com os resultados encontrados no presente estudo, evidenciando a forte influência do tempo e do sistema adotado sob os teores de carbono orgânico do solo em áreas de pastagem.

Apesar de não apresentar significância estatística entre os tratamentos ($p<0,05$), o teor de nitrogênio total no solo é um fator fundamental para avaliação da dinâmica dos resíduos orgânicos pois possui uma estreita relação com o carbono. A relação C:N pode afetar diretamente a taxa de decomposição da matéria orgânica influenciando a velocidade com que o C é fixado no solo (MELO, 2018). Solos com relação C:N altas (>30) sugerem lenta velocidade de decomposição associado a maior consumo de nitrogênio, enquanto solos com baixa relação C:N (<20) geralmente apresentam comportamento oposto, revelando rápida decomposição dos resíduos (SÁ SOUZA et al., 2018), sendo a relação entre 20 a 30 ideal para que haja equilíbrio e fornecimento de nutrientes necessários à reprodução microbiana (PES et al., 2015). A relação C:N expressou comportamento de equilíbrio no sistema de consórcio com gramínea e leguminosa e no sistema silvipastoril em todas as faixas de solo avaliadas, enquanto monocultivo de pastagem e vegetação nativa revelaram alta relação desde a camada mais superficial, com aumento em profundidade (Tabela 5)

Tabela 5. Relação entre Carbono e Nitrogênio avaliada sob diferentes profundidades em sistema de consórcio gramínea-leguminosa, sistema silvipastoril, monocultivo de pastagem, e floresta nativa do Cerrado.

Sistema	Relação C:N			
	Profundidade (cm)	0-5	5-10	10-20
CGL	19,4 b	23,1 b	22,1 b	22,2 b
SSP	27,3 ab	25,5 ab	28,5 ab	28,1 ab
MP	30,0 a	34,1 a	32,7 a	37,0 a
FN	32,3 a	40,6 a	39,9 a	37,9 a

CGL: Consórcio gramínea - leguminosa; SSP: sistema silvipastoril; MP: monocultivo de pastagem; FN: Floresta nativa. Valores seguidos de letras iguais, na mesma coluna, não apresentam diferenças significativas entre si pelo teste de Dunn ($p<0,05$).

O sistema FN apresentou maior relação C:N em todas as profundidades avaliadas, sendo estatisticamente semelhantes à MP e SSP ($p<0,05$). A alta relação C:N em floresta nativa é um

fator inerente à diversidade de espécies presentes neste sistema, enquanto a serapilheira de gramíneas forrageiras, de modo geral, apresenta relação C:N elevada devido a sua maior eficiência de aproveitamento do nitrogênio, refletindo em baixos teores desse nutriente na serapilheira (HERINGER; MOOJEN, 2002). Moreira e Costa (2004) e Soares et al. (2009) destacam que a relação carbono - nitrogênio em área de floresta, podendo variar entre 30 e 100, é atribuída ao incremento no conteúdo de folhas, ramos e galhos, que são de difícil decomposição, sendo provavelmente causada pelos altos teores de compostos como lignina e polifenóis. A composição da biomassa vegetal com altos teores de lignina reflete na lenta decomposição do material depositado, favorecendo o aumento de frações recalcitrantes no solo formando complexos organominerais (GAZOLLA et al., 2015; SILVA e MENDONÇA 2007), que proporcionam proteção ao carbono através da formação de agregados, dificultando a oxidação microbiana, e aumentando a permanência de C no solo (POST e KWON, 2000).

O mesmo comportamento observado em FN também ocorreu em MP, que apresentou elevada relação C:N. A menor disponibilidade de nitrogênio da serapilheira de gramíneas, associada a ausência de adubação de manutenção, pode ter causado imobilização desse nutriente no solo acarretando redução da atividade microbiana, lenta decomposição, e menor mineralização da matéria orgânica, o que favorece a formação de agregados no solo através de complexos organominerais. Porém a alta relação C:N no solo de pastagem pode provocar degradação do sistema, e consequente redução na produção de forragem (SÁ SOUZA et al., 2018)

A introdução de leguminosas em áreas de pastagens pode produzir mudanças na ciclagem de nutrientes, como observado através dos resultados para relação C:N em CGL. De acordo com Loss et al. (2009) e Silva et al. (2021), plantas que apresentam altos teores de nitrogênio em sua biomassa, como as leguminosas, disponibilizam resíduos com baixa relação C:N, o que significa acelerada decomposição da matéria orgânica, maior taxa de mineralização, elevada disponibilidade de nitrogênio para as gramíneas, e maior contribuição nos teores de carbono associados à fração argila. Kohmann et al. (2019) avaliaram a dinâmica de decomposição de leguminosas e a mineralização de seus nutrientes, concluindo que à medida que a decomposição da serapilheira progride, o C e N disponíveis na serapilheira também diminuem devido ao desaparecimento contínuo de suas formas lábeis, acompanhadas pela formação de novos materiais recalcitrantes pelos microrganismos. Os resultados encontrados por Silva (2009) e Kolmann et al. (2019) corroboram com os resultados encontrados neste trabalho, onde a relação C:N no tratamento CGL se mostrou equilibrada, porém com menores

teores de carbono lável (Tabela 6), indicando a possível alocação de carbono nas frações estáveis da matéria orgânica, e menor contribuição em longo prazo para estes estoques.

Em SSP o menor aporte de carbono orgânico total associado aos teores totais de nitrogênio provocou menor relação C:N, apesar de ser estatisticamente semelhante ao tratamento referência (Tabela 5). Enquanto o carbono é o combustível utilizado pela microbiota do solo para gerar energia (PULRONIK, 2009), o nitrogênio também é utilizado pela microbiota do solo, sendo essenciais para o crescimento das plantas. A estabilidade de relação C:N em SSP indica que esses nutrientes não estão sofrendo imobilização no solo, nem mineralização excessiva, fazendo com que haja um equilíbrio entre a entrada e saída de C, favorecendo a ciclagem de nutrientes e a possível transformação da matéria orgânica lável em matéria orgânica associada aos minerais.

Apesar de apresentar menor relação C:N comparado aos tratamentos MP e FN, o sistema SSP revelou maior relação C:N quando comparado aos resultados encontrados na literatura, que variam entre 12 e 20 (MIRANDA et al., 2007; SILVA et al., 2020). Alguns autores relatam que a serapilheira de eucaliptos mais jovens possui baixa relação C:N por possuir menos lignina, contudo, a adição de material lenhoso como os galhos e a cascas na serapilheira ao longo do ciclo de plantio altera a relação C:N do solo, modificando a velocidade de decomposição da serapilheira (SILVA et al., 2013; WANG et al., 2015; WINK et al., 2015). Com isso, apesar do SSP apresentar relação C:N dentro da faixa ideal, é possível inferir que com o decorrer do tempo essa variável tende a elevar, aumentando o tempo de decomposição dos resíduos no solo refletindo em maiores teores de carbono na matéria orgânica particulada.

4.3 Carbono Lável

A labilidade do carbono dos diferentes usos do solo variou de acordo com a faixa de solo avaliada, sendo SSP e MP semelhantes à FN ($p<0,05$) até 20cm (Tabela 6). As maiores concentrações de C-lável foram encontradas na camada superficial do solo, e apresentaram redução em decorrência do aumento da profundidade.

Em média, CGL apresentou redução de 9,5%, SSP 4,75% e MP 5,5% de carbono lável comparados a mata nativa.

Tabela 6. Carbono lábil do solo avaliado sob diferentes profundidades em sistema de consórcio gramínea-leguminosa, sistema silvipastoril, monocultivo de pastagem, e floresta nativa do Cerrado.

Sistema	Carbono lábil (g/kg)			
	Profundidade (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-30
CGL	6,2 b	5,9 b	5,7 b	5,4 ns
SSP	6,3 ab	6,4 a	5,9 ab	5,6 ns
MP	6,3 ab	6,2 ab	5,9 ab	5,8 ns
FN	6,7 a	6,4 a	6,2 a	6,2 ns

CGL: Consórcio gramínea - leguminosa; SSP: sistema silvipastoril; MP: monocultivo de pastagem; FN: Floresta nativa. Valores seguidos de letras iguais, na mesma profundidade, não apresentam diferenças significativas entre si pelo teste de Dunn ($p<0,05$).

Os resultados encontrados quanto à redução de carbono lábil no solo de SSP e MP foram menores que os achados por Brito et al. (2019). Os autores avaliaram o C lábil em resposta a conversões de terra no Cerrado brasileiro após mudança no uso da terra e encontraram reduções significativas, representando -16% na conversão para pastagem e -14% na conversão para eucalipto. Batista et al. (2013) relataram que o carbono lábil, referente à matéria orgânica particulada (MOp), posteriormente será transformada em matéria orgânica associada aos minerais (MOam), ou seja, um sistema que possui maiores teores de carbono lábil tem maior capacidade de contribuir com compartimento estável da matéria orgânica, promovendo maior estabilização de C no solo.

Em SSP o carbono lábil está diretamente associado a fatores como proteção física da matéria orgânica no interior dos agregados (MULLER et al., 2012; POST; KNOW, 2000), e maior aporte e diversidade de resíduos vegetais, que por apresentarem taxas de crescimento superiores ao Cerrado, depositam sobre o solo elevadas quantidades de folhas e resíduos finos, levando ao aumento de C lábil (PULROLNIK, 2009).

O sistema silvipastoril apresentou CL mais aproximado ao da floresta nativa, se equiparando em 5-10 cm de profundidade, indicando que a integração da serapilheira do eucalipto + serapilheira da *Urochloa* proporcionou grande contribuição para o carbono nas frações particuladas da matéria orgânica. Apesar de os resultados de carbono orgânico total terem sido inferiores para o tratamento SSP, os resultados de carbono lábil e relação C:N indicam o potencial desse sistema em aportar C nas frações estáveis da MOS com o decorrer do tempo, mantendo o solo protegido, e disponibilizando quantidades adequadas de nutrientes para o sistema.

Os resultados de carbono lável em MP foram semelhantes à SSP e FN, não apresentando diferença estatística entre os tratamentos (Tabela 6). A ausência de práticas agrícolas, grande deposição radicular das forrageiras, e a constante ciclagem de raízes finas favorecem a entrada de material orgânico no solo, que é convertido em carbono lável (LEITE et al., 2013; MICKAEL et al., 2015). Gualberto (2018) encontrou resultados semelhantes avaliando a qualidade química e biológica do solo em sistemas de plantio direto, pastagem e eucalipto no Cerrado, onde o sistema com eucaliptos e a pastagem foram capazes de aumentar a fração de C lável no solo, concordando com os resultados encontrados neste trabalho.

O manejo adotado na área de consórcio entre gramínea e leguminosa refletiu na redução dos teores de carbono lável. Oliveira et al. (2018) também observaram redução de 20% nos teores de C lável em área plantada com amendoim forrageiro com 2 anos de idade comparado à vegetação nativa, enquanto no presente estudo, a redução foi de 10% após 12 anos de implantação, mostrando que apesar das práticas agrícolas empregadas no solo, é possível recuperar os teores de carbono lável nesses sistemas.

Solomon et al. (2007) relatam que uma parte importante da perda de COT ocorre durante os primeiros anos após a mudança de uso do solo de vegetação nativa, indicando que esses sistemas continham grandes quantidades de carbono lável vulneráveis à degradação, concordando com os valores encontrados para os teores de carbono lável em FN. No entanto, comprovou-se que o tempo de implantação de um sistema, associado à ausência de práticas agrícolas intensivas, favorece a recuperação significativa destes estoques principalmente nas camadas mais superficiais, quando comparados sistemas de uso da terra com históricos distintos.

4.4 Carbono Solúvel em Água

O carbono solúvel em água apresentou diferença entre os tratamentos ($p<0,05$), sendo menor em CGL e maior em FN (Tabela 7) em todas as faixas de solo avaliadas.

Tabela 7. Carbono solúvel avaliado sob diferentes profundidades em sistema de consórcio gramínea-leguminosa, sistema silvipastoril, monocultivo de pastagem, e floresta nativa.

Sistema	Carbono solúvel (mg/kg)			
	Profundidade (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-30
CGL	99,9 b	91,4 b	90,8 b	75,9 b
SSP	116,3 ab	116,1 ab	119,5 ab	117,6 a
MP	114,9 ab	110,9 ab	109,2 ab	98,5 ab
FN	123,1 a	124,8 a	126,2 a	118,8 a

CGL: Consórcio gramínea - leguminosa; SSP: sistema silvipastoril; MP: monocultivo de pastagem; FN: Floresta nativa. Valores seguidos de letras iguais, na mesma coluna, não apresentam diferenças significativas entre si pelo teste de Dunn ($p<0,05$).

Não houve diferença entre os tratamentos SSP, MP e FN. A dinâmica de carbono solúvel nos tratamentos pode estar associada ao aporte e diversidade de raízes nas camadas mais profundas do solo, à quantidade do material vegetal da parte aérea que é constantemente depositado pelas culturas, aliado à diversificação da serapilheira. Levando em consideração que os sistemas SSP e MP foram implantados em diferentes períodos, mas não apresentam diferença entre si quanto a CSA, os resultados confirmam que a presença do eucalipto e a quantidade de serapilheira depositada sobre o solo proporcionam elevação do carbono solúvel. Rosa et al. (2004) relatam que há aumento na produção do C solúvel no solo quando há resíduos orgânicos recentemente depositados, com isso entende-se que FN, SSP e MP depositam no solo maiores teores matéria orgânica advinda tanto de raízes quanto de serapilheira acima do solo quando comparados a CGL, mantendo altos os seus teores de CSA.

Ao comparar os reservatórios de carbono do solo entre sistemas agroflorestais Singh et al. (2021) relata que a diferença dos teores de CSA entre sistemas de uso da terra se dá devido a desigualdade dos exsudatos radiculares, e a quantidade e tipo de entrada de carbono no solo. Os autores dizem ainda que os materiais derivados de plantas mortas e a decomposição de raízes finas sob sistemas à base de árvores resultaram em carbono orgânico solúvel significativamente maior em comparação com sistemas sem árvores. O carbono solúvel em água pode representar até 5% do total de carbono lável (ZHANG et al., 2002), e como os resíduos orgânicos precisam ser hidrolisados antes de sua utilização pelos microrganismos, essa fração orgânica impacta bastante a comunidade microbiana (SILVA et al., 2021).

Os tratamentos que não contam com a presença de árvores apresentaram redução de carbono solúvel de acordo com a profundidade avaliada (Figura 4), em contrapartida, os tratamentos SSP e FN demonstraram discreto aumento de CSA até 20 cm de profundidade.

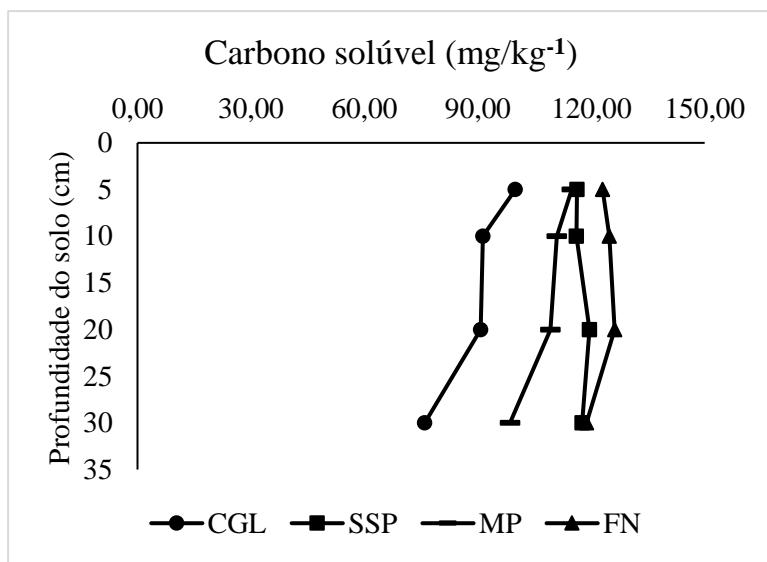


Figura 4. Dinâmica de Carbono solúvel avaliada em profundidade (0-30cm). CGL: Consórcio gramínea - leguminosa; SSP: sistema silvipastoril; MP: monocultivo de pastagem; FN: floresta nativa.

A maior distribuição de raízes, proporciona a liberação de compostos solúveis pela exsudação ou decomposição radicular, que são facilmente utilizáveis como fonte de energia pelos microrganismos no solo (KUZYAKOV e DOMANSKI, 2000). Os exsudatos radiculares incluem carboidratos, ácidos orgânicos, nucleotídeos, flavonas, enzimas e fatores de crescimento, que quando degradados por enzimas extracelulares em açúcares simples e aminoácidos, podem ser absorvidos e metabolizados por microrganismos do solo, que liberam CO₂ e N mineral (WALEN et al., 2014), assim, entende-se que a serapilheira advinda de SSP, MP e FN contribuem substancialmente para a qualidade da biomassa microbiana quando comparada ao tratamento CGL.

O fato de o carbono orgânico solúvel em CGL ter apresentado respostas inferiores aos outros sistemas pode ser analisado de diferentes formas. Souza e Melo (2003) relatam duas hipóteses acerca da dinâmica de carbono solúvel, os autores relatam que o baixo teor de CSA no solo pode significar a dificuldade do ataque inicial pelas enzimas oriundas de micro organismos em consequência de fatores climáticos e ambientais, ou que o estágio de síntese das enzimas já se encontra mais avançado, refletindo o estágio inicial de degradação dos resíduos orgânicos incorporados ao solo. Como o sistema CGL é composto por uma leguminosa que possui rápida taxa de decomposição, é mais passível a concordância com a segunda hipótese.

Barbara et al. (2009) e Kalbitz et al. (2007) relatam que o processo de acúmulo de CSA depende da forma de uso da terra, e que a produção de carbono orgânico solúvel diminui se o

reservatório de matéria orgânica no horizonte superior não for reabastecido pela entrada contínua de serapilheira. Dubeux et al. (2007) revelam que o tempo de meia vida de leguminosas da espécie *A. pintoi* é de 50 dias, enquanto a *U. decumbens* demanda 223 dias, assim pode-se depreender que a proporção leguminosa/gramínea presente em CGL, e a quantidade de resíduos gerados nesse sistema associado à sua velocidade de decomposição pode não estar sendo equilibrada à taxa de decomposição, justificando os baixos teores de carbono lável e carbono solúvel.

4.5 Carbono da Biomassa Microbiana

O carbono da biomassa microbiana atingiu menores teores em CGL e maiores em FN, sendo estatisticamente diferentes a partir de 5cm de profundidade ($p<0,05$), não apresentando diferença estatística apenas na camada mais superficial (Tabela 8). O sistema CGL revelou em média 49% menos carbono da biomassa microbiana comparado a FN, enquanto o sistema silvipastoril em média 8%, e o monocultivo de pastagem 12% de diferença.

Tabela 8. Carbono da biomassa microbiana avaliado sob diferentes profundidades em sistema de consórcio gramínea-leguminosa, sistema silvipastoril, monocultivo de pastagem, e floresta nativa do Cerrado.

Sistema	Carbono da biomassa (mg/kg ¹)			
	Profundidade (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-30
CGL	153,1 ^{ns}	152,9 ^b	132,6 ^b	91,3 ^b
SSP	255,3 ^{ns}	234,5 ^{ab}	232,2 ^a	220,0 ^a
MP	234,7 ^{ns}	233,6 ^{ab}	224,2 ^{ab}	214,9 ^{ab}
FN	295,7 ^{ns}	265,5 ^a	235,0 ^a	235,0 ^a

CGL: Consórcio gramínea - leguminosa; SSP: sistema silvipastoril; MP: monocultivo de pastagem; FN: Floresta nativa. Valores seguidos de letras iguais, na mesma profundidade, não apresentam diferenças significativas entre si pelo teste de Dunn ($p<0,05$).

Os resultados encontrados nesse estudo foram superiores aos de Brito et al. (2019), que avaliando a perda de carbono lável do solo em resposta à conversão de terras no cerrado relatou perda de 56% de carbono da biomassa microbiana em um sistema silvipastoril e 39% em pastagem, comparado à floresta nativa, enquanto Santos et al. (2009) também encontraram redução de 49% de carbono da biomassa microbiana em um solo constituído por gramínea e leguminosa comparado com solo de vegetação nativa.

O teor de biomassa microbiana mais elevado na área de vegetação nativa pode ser reflexo do fornecimento contínuo de materiais orgânicos com diferentes graus de

susceptibilidade à decomposição. A diversidade das espécies vegetais do cerrado nativo é geralmente maior do que em sistemas de manejados, o que implica a deposição de substratos orgânicos oxidáveis com composição variada na serapilheira (D'ANDRÉA et al., 2002). Além disso, existe maior diversidade de compostos orgânicos depositados na rizosfera, o que constitui fator favorável à sobrevivência e crescimento dos diferentes grupos de microrganismos do solo (CUNHA et al., 2011). Assim, as condições distintas do solo sob vegetação de cerrado nativo, aliado a ausência de perturbações decorrentes de atividade antrópica, tornam possível a existência de maiores teores de biomassa microbiana, indicando o maior equilíbrio da microbiota do solo nesse ecossistema.

O sistema CGL possui um histórico de cultivo intensivo, e sistemas de cultivo geralmente apresentam menores conteúdos de carbono microbiano em relação ao ambiente florestal, enquanto áreas de pastagem tendem a apresentar maiores teores de carbono da biomassa microbiana em relação ao sistema de cultivo com revolvimento do solo (GLAESER et al., 2010). Segundo Matias et al. (2009) o revolvimento do solo durante as atividades agrícolas pode influenciar a biomassa vegetal causando danos diretos à reprodução microbiana, uma vez que a reparação dos danos causados por distúrbios no solo requer desvio de energia do crescimento e reprodução, para a manutenção celular.

Resultados apresentados por Cunha et al. (2011) ao avaliar os atributos biológicos de solos sob plantio de leguminosa em sistema convencional de preparo do solo foram semelhantes aos descritos neste trabalho, onde o carbono da biomassa microbiana foi substancialmente inferior ao de mata nativa, sendo essa redução de até 54%. Os autores afirmam ser provável que as adições de C oxidável sob esse tipo de sistema podem não ser suficientes para atender à demanda para a manutenção da biomassa existente (CUNHA et al., 2011), o que pode ter promovido o decréscimo acentuado observado nos valores de C-BMS.

O monocultivo de pastagem se iguala estatisticamente à floresta nativa e ao SSP revelando teores de carbono da biomassa semelhante a esses sistemas, mesmo sem a presença de árvores. Apesar da baixa diversidade de cobertura vegetal existente no sistema MP, a biomassa microbiana foi provavelmente estimulada em decorrência do elevado efeito rizosférico da gramínea. D'Andréa et al. (2002) relatam que mesmo não havendo alta diversidade vegetal em áreas de monocultivo de pastagem, o sistema radicular denso e em constante renovação das gramíneas promove liberação de substratos orgânicos oxidáveis com composição variada, proporcionando maior disponibilidade de nutrientes e favorecendo o crescimento de microrganismos do solo.

O carbono da biomassa microbiana em SSP foi, em média, o que mais se aproximou numericamente ao tratamento referência. O carbono microbiano indica a quantidade de C imobilizada temporariamente pela biomassa microbiana que participa do processo de humificação, à medida que ocorre a morte dos microrganismos há mineralização e liberação dos nutrientes imobilizados (PEREZ et al., 2005).

O carbono solúvel em água influencia diretamente a qualidade da biomassa microbiana, que por sua vez constitui uma importante parcela do carbono lábil. O C lábil sofre transformações no solo sendo posteriormente armazenado na forma de carbono associado aos minerais. Todas as frações citadas conferem ao solo características particulares, que são retratadas nos teores de carbono orgânico total, e refletidas no estoque de carbono no solo.

4.6 Estoque de Carbono no Solo

Tanto para os teores de carbono orgânico total quanto para o estoque de carbono, a área de consórcio gramínea leguminosa e o sistema silvipastoril não foram eficientes em acumular C no solo, mesmo nas camadas mais superficiais, comparados ao sistema de monocultivo de pastagem e floresta nativa até o momento deste estudo. Entretanto, a área de monocultivo apresentou estoque de carbono estatisticamente semelhante a floresta nativa (Tabela 9).

Tabela 9. Estoque de Carbono (Mg/ha) avaliado sob diferentes profundidades em sistema de consórcio gramínea-leguminosa, sistema silvipastoril, monocultivo de pastagem, e floresta nativa do Cerrado.

Sistema	Estoque de carbono (Mg/ha)			
	Profundidade (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-30
CGL	19,6 ^b	18,4 ^b	17,5 ^b	14,1 ^b
SSP	18,3 ^b	16,3 ^b	15,4 ^b	14,5 ^b
MP	25,5 ^{ab}	25,8 ^a	23,8 ^{ab}	23,6 ^{ab}
FN	28,2 ^a	28,9 ^a	28,9 ^a	27,7 ^a

CGL: Consórcio gramínea - leguminosa; SSP: sistema silvipastoril; MP: monocultivo de pastagem; FN: Floresta nativa. Valores seguidos de letras iguais, na mesma profundidade, não apresentam diferenças significativas entre si pelo teste de Dunn ($p<0,05$).

A prática de manejos agrícolas no solo associada à ausência de manutenção da pastagem acarretou menor acúmulo de carbono lábil, solúvel, e reduzida atividade microbiana em CGL, causando menor acúmulo de carbono orgânico total, resultando em menor estoque de carbono no solo comparado ao tratamento referência. BODDEY et al. (2012) citam que os sistemas de produção agrícolas brasileiros muitas vezes têm contribuído com menos estoque de C para o

solo quando comparados aos ecossistemas naturais, uma vez que lavrar o solo com arados e outros maquinários estimula a degradação da matéria orgânica, e a liberação de C pelo solo na forma de CO₂.

A maior aeração proporcionada pelo manejo de sistemas convencionais, tal como o aumento da temperatura na camada revolvida e a destruição dos agregados pela ação dos implementos, expõe a matéria orgânica fisicamente protegida ao ataque microbiano, o que causa a perda de C orgânico e seu estoque no solo (COSTA et al., 2008). O tratamento CGL, até o momento da avaliação, possuía maior estoque de carbono que o sistema silvipastoril, contudo é importante ressaltar que as duas áreas possuem uma lacuna de 12 anos de diferença entre as implantações, sendo necessária uma avaliação temporal para quantificar e comparar as perdas e acúmulo de carbono no solo pelo uso desses sistemas

São escassos na literatura trabalhos que avaliem em conjunto a dinâmica de carbono em sistemas de consórcio gramínea-leguminosa comparado a monocultivo de gramíneas e sistemas com presença de eucalipto, entretanto, quando avaliado através de outras condições de manejo, a presença de leguminosas em sistemas integrados geralmente é capaz de provocar aumento do estoque de carbono no solo (BODDEY et al., 2004; LIU et al., 2017; LIMA et al., 2018), principalmente quando comparado a monocultivo de gramíneas. Porém, a vantagem relatada no acúmulo de C no solo de sistemas com leguminosas não é garantido, tendo em vista que a produtividade relativa da biomassa, o manejo adotado no sistema e as características ambientais provavelmente terão um impacto direto no acúmulo de C ao longo do tempo (SILVA et al., 2022). Neste estudo, o histórico de manejo do solo e a ausência de manutenção da pastagem conferiram a CGL menor potencial para acúmulo de carbono no solo.

O acúmulo de carbono no solo em sistemas que contam com a presença de árvores não está relacionado apenas ao volume de deposição de material orgânico, mas também pela idade da cultivo, pela qualidade do material depositado e pela textura do solo (ROSA et al., 2017), com isso, os menores teores e estoques de carbono em SSP podem ser atribuídos a diferentes fatores: a idade do sistema silvipastoril (13 anos) ainda não foi suficiente para aportar matéria orgânica e C no solo em comparação à MP (27 anos) e CGL (25 anos); a maior densidade do solo sob SSP pode ter influenciado a dinâmica da matéria orgânica; ou ainda, os teores de argila e areia nesse sistema dificultaram a estocagem de C.

Diversos estudos relatam a influência do tempo de plantio de sistemas silvipastoris nos estoques de carbono no solo. Wink et al. (2015) ao estudar os estoques de carbono do solo e biomassa vegetal associados a diferentes idades de plantações de eucalipto encontraram

menores quantidades de carbono nas florestas plantadas com 13 anos de idade quando comparada a um plantio de 20 anos, 29,8 Mg/ha e 32,9 Mg/ha, respectivamente, valores superiores aos encontrados em SSP.

Rosa et al. (2017) demonstrou que plantios de eucalipto com 9 anos de idade proporcionaram maiores estoques de carbono no solo do que plantios com 5 e 7 anos de idade, enquanto Barreto et al. (2008) constatou que a idade de um sistema formado por eucalipto proporciona variação no aporte e na contribuição de galhos, cascas, e folhas na composição da serrapilheira e na taxa de ciclagem das raízes. Nos dois trabalhos foram encontradas variações nos estoques de C de acordo com a idade, sendo esses valores menores para plantios mais jovens. No caso de plantações de eucalipto, as árvores mais jovens possuem menores valores da relação celulose: N e lignina:N, havendo aumento desses índices quando atingirem a maturidade, o que confere maior nível de recalcitrância e consequentemente maior resistência a decomposição dos resíduos (ROSA et al., 2017). Nesse sentido, o tempo de plantio está diretamente relacionado a maior a capacidade de acumular carbono no solo.

Apesar de apresentar teores e estoques de carbono inferiores a MP e FN, o sistema SSP expressou maior potencial para estocar C ao longo do tempo. Os resultados de carbono lável, carbono solúvel em água e o elevado C-BMS indicam constante deposição de resíduos e atividade microbiana, podendo proporcionar incorporação de carbono e redução da densidade do solo (BRITO et al., 2018; FLORENSE, 2021), fatores que influenciam diretamente a estocagem de C.

Estudos destacam que o estoque de carbono no solo depende de relações existentes entre vegetação, manejo, clima e drenagem, além de propriedades intrínsecas do solo, como mineralogia, textura e estrutura, afirmando também que as argilas são responsáveis pela estabilização dos compostos coloidais ou húmicos da matéria orgânica em virtude do processo de adsorção (Resck et al., 2008; Losada et al., 2011). Os solos de todos os sistemas avaliados são enquadrados como franco-argiloso-arenoso, porém há diferença entre os teores de argila. Enquanto FN e SSP apresentam diferença média entre si de 3,7% na fração argila, essa diferença quando comparada a CGL e MP sobe para 40%. O fato de o sistema silvipastoril ter as mesmas características texturais que a floresta nativa, mas em contrapartida FN apresentar maior estocagem de carbono, confirma que a alteração de uso do solo causa um grande impacto nas perdas de carbono, principalmente em solos com menores porcentagens de argila.

A associação dos estoques de carbono com a fração argila vem sendo estabelecida a alguns anos. Um estudo feito por Aduan et al. (2003) avaliando a ciclagem de carbono no

Cerrado brasileiro revelou que a argila é uma das propriedades físicas determinantes na estabilização da matéria orgânica e do carbono, pois a incorporação física da MO dentro dos agregados de argila confere maior proteção aos polímeros orgânicos contra o ataque enzimático, promovendo estabilização química da matéria orgânica através de ligações eletrostáticas entre MO e fração mineral, favorecendo o maior tempo de permanência de C no solo. A associação de argila e carbono também foi relatada por Lal et al. (2007) afirmando que solos mais arenosos tendem a apresentar maior perda nos estoques de carbono em decorrência da maior lixiviação de carbono orgânico, menor agregação das partículas do solo, e baixa atividade das argilas. A relação da textura do solo com os estoques de carbono em sistemas silvipastoris foi amplamente mostrada nos estudos de Nair et al. (2011), onde os estoques de C em sistemas silvipastoris com idade de pelo menos 15 anos de implantação, em condições diversificadas tanto ecológicas quanto geográficas (Estados Unidos, Espanha, Mali e Brasil), dependeram da qualidade do solo, estando diretamente correlacionados com a fração mais fina (argila ou silte).

Para o sistema silvipastoril, neste estudo, as características texturais podem ter implicado na menor proteção do carbono do solo contra os agentes decompositores e contra a perda de C pela própria movimentação do solo, que aliadas a maior densidade relativa e menor tempo de implantação do sistema justificam a reduzida estocagem de carbono. Apesar disso, é importante ressaltar que os altos teores das frações lábeis da matéria orgânica conferem a este sistema maior potencial para estocagem de C em longo prazo.

A área com monocultivo de pastagem apresentou estoque de carbono mais aproximado ao de vegetação nativa, com redução média de 3,75 MgC/ha em cada faixa de profundidade, correspondente a 10% de diferença entre os dois sistemas. Mesmo sendo estatisticamente semelhante a CGL e SSP nas camadas 0-5cm e 10-30 cm, o estoque de carbono em MP foi em média 25% superior aos sistemas que receberam manejo. Contudo, o tratamento MP expressou menores teores de C nas frações mais lábeis da matéria orgânica.

Apesar de ser o sistema com maior idade, a área destinada ao monocultivo de pastagem foi a que menos sofreu com perturbações antrópicas. Após a implantação da *U. decumbens*, quando foram executadas práticas de aração e gradagem, o sistema permaneceu 27 anos sem maiores intervenções, propiciando maior estabilidade do carbono no solo. Estudos recentes obtiveram resultados semelhantes ao quantificar os estoques de carbono em pastagens de longa duração. Nanzer et al. (2019) avaliando diferentes sistemas de uso do solo no Cerrado encontraram valores superiores quanto aos estoques de carbono em pastagem de 30 anos quando comparada à vegetação nativa e plantio convencional, assim como Florence et al.

(2021) que ao comparar uma área de monocultivo de pastagem com ausência de manejos a 20 anos, ao solo de vegetação nativa do cerrado, encontraram diferença de 6,95 MgC/ha para área de pastagem. Os estudos de Fernandes e Fernandes (2013) compararam os estoques de carbono entre pastagens de longa duração degradadas e não degradadas, tendo como área de referência um solo sob cerradão nativo. Os autores observaram que, comparado à mata nativa, a pastagem manejada apresentou redução de 2,8 MgC/ha, enquanto a pastagem degradada se diferenciou em 4,4 MgC/ha. Todos os autores atribuem o estoque de carbono em pastagens de longa duração ao sistema radicular agressivo das forrageiras que por possuir alta relação C:N são capazes de permanecer no solo por um longo período de tempo.

Apesar expressar maiores teores de carbono orgânico total e estoque de carbono, é necessário observar alguns fatores relacionados ao MP. Este tratamento é composto por uma forrageira de média a baixa exigência em nitrogênio e alta relação C:N no resíduo (CRISPIN et al., 2002), fazendo que, pela falta de adubação e lenta decomposição da serapilheira, a população microbiana necessite retirar N do solo para seu crescimento, imobilizando este nutriente e tornando-o menos disponível para a forrageira, podendo causar menor produtividade da pastagem e possível degradação do solo (CERRETA et al., 2008; SÁ SOUZA et al., 2018), propiciando a compactação, perda dos teores de carbono e menor estocagem de C no solo. No momento da coleta de dados, o sistema MP apresentava poucos sinais de degradação, sendo constatada a presença de cupins, indicando o possível início do processo de degradação (SANTANA et al., 2019).

O carbono estocado no sistema MP pode ser ainda proveniente dos resíduos aportados pela mata antes da mudança no uso do solo. As mínimas atividades de revolvimento podem ter contribuído para que esse carbono permanecesse estocado no perfil do solo principalmente na fração não lábil. Mosquera et al. (2012), relatam que após 30 anos da implantação de um sistema de monocultivo de *U. decumbens*, o solo ainda continha mais do 50% do C derivado da floresta nativa até 40cm de profundidade, sugerindo que em muitos estudos as mudanças nos estoques de carbono atribuídas às mudanças no uso da terra podem ser mal interpretadas, sendo necessário um estudo acerca da origem do carbono para melhor avaliação.

Embora MP apresente um estágio inicial de degradação, menor carbono lábil e menor atividade microbiana, é um sistema que mostra aptidão para estocar mais carbono que a vegetação nativa ao ponto que recebesse manejo adequado.

4.7 Índice de Manejo do Carbono

Ao propor a avaliação do índice de manejo do carbono, Blair et al. (1995) enfatizam que solos manejados que possuem valores de IMC acima de 100 indicam maior potencial de recuperação de carbono comparado a um sistema referência. Os resultados obtidos no presente estudo revelam que apenas o sistema silvipastoril alcançou IMC superior a 100 em todas as profundidades avaliadas enquanto o sistema MP expressou índice maior que 100 apenas na profundidade 5-10cm, e CGL não alcançou IMC igual a 100 em nenhuma profundidade de avaliação (Tabela 10).

Tabela 10. Índice de manejo do carbono de solos submetidos a diferentes sistemas de uso solo

Sistema	Índice de manejo do carbono			
	Profundidade (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-30
CGL	98,1	99,9	98,1	98,7
SSP	102,1	114,8	110	113,9
MP	95,5	101,2	99,6	98,8
FN	100	100	100	100

CGL: Consórcio gramínea - leguminosa; SSP: sistema silvipastoril; MP: monocultivo de pastagem; FN: Floresta nativa.

Muitos pesquisadores adotaram o índice de manejo do carbono (IMC) para comparar a capacidade de melhoraria do solo em diferentes sistemas de produção, no qual, quanto maior o IMC, maior será a qualidade do manejo realizado na área (LEAL et al., 2016). Estudos recentes abordam o IMC como um bom indicador de qualidade do solo após mudança de uso da terra no Cerrado, contudo, são escassos os trabalhos que relatam essa avaliação em sistemas de longa duração. Como o IMC revela o potencial de um sistema em estocar carbono através de índices de labilidade, e isso depende de fatores relacionados à deposição de biomassa pela planta e pelas formas de manejo do solo (FREITAS et al., 2013), os resultados apresentados na literatura são bastante distintos.

Avaliando o índice de manejo do carbono em solo de pastagem com 10 anos de implantação e solo com plantio de eucalipto com 8 anos, e comparando-os com a mata nativa do cerrado, Balin et al. (2017) encontraram valores de IMC superiores a 100 apenas na faixa de 10 a 20 cm de profundidade, sendo o plantio de eucalipto o que obteve melhores índices, mesmo apresentando menor teor de COT. Os autores atribuem esse resultado a concentração de raízes finas do eucalipto que se concentram até 20cm, que associada as raízes do sub bosque conferem maior labilidade à matéria orgânica, influenciando no índice de manejo do carbono. Balin et al.

(2017) concluem que, assim como nesta pesquisa, sistemas sob plantio de eucalipto precisam de maior tempo de consolidação para promover melhorias no solo.

Costa et al. (2020) também encontraram resultados semelhantes aos deste estudo, onde ao avaliar as frações do carbono orgânico em áreas sob diferentes usos da terra no cerrado, sendo pastagem de 3 anos, sistema silvipastoril com eucalipto implantado a 9 anos, e área com plantio convencional, obtiveram índices de manejo do carbono acima de 100 nos sistemas de pastagem e sistema com eucalipto. Os resultados negativos da pesquisa de Costa et al. (2020) quanto ao IMC da área de plantio convencional são atribuídos a redução na qualidade do solo, associada a práticas de preparo como aração e gradagem, enquanto os resultados para os outros tratamentos avaliados são atribuídos a maior labilidade do carbono nestes sistemas.

Os resultados de IMC abaixo de 100 em CGL encontrados neste trabalho não indicam que o sistema não possua capacidade para estocar carbono. Silva et al. (2022) comparando diferentes leguminosas consorciadas com gramíneas, a sistemas em monocultivo de forrageira, encontraram IMC superiores a 100 em todos os tratamentos com leguminosas, sendo esses índices até 4 vezes maiores do que em áreas de monocultivo. Os autores atribuem os elevados índices de manejo do carbono em áreas consorciadas principalmente a combinação de espécies, que pode gerar maior fornecimento de matéria orgânica de alta qualidade no solo, concluindo que a integração entre gramínea e leguminosa bem manejada pode apresentar maiores índices de manejo de carbono do que pastagens adubadas.

Vieira et al. (2007) dizem que é coerente fazer uma correlação entre IMC e atributos biológicos do solo, pois quanto maior o reservatório de C total do solo e C lábil, maior a disponibilidade de carbono e energia para a atividade microbiana e faunística. O sistema CGL apresentou reduzidos teores de carbono total comparado a MP e FN, e menor teor de carbono lábil comparado a todos os tratamentos, e consequentemente, menor índice de manejo do carbono; o sistema SSP expressou menor carbono orgânico total entre todos os tratamentos, contudo, apresentou maior carbono lábil e maior IMC entre os sistemas que receberam manejo; o sistema MP indicou maior COT comparado aos sistemas manejados, mas apresentou menor carbono lábil e menor IMC comparado a SSP e FN, confirmado que o índice de manejo do carbono é fortemente afetado pelas frações lábeis da matéria orgânica.

5 CONCLUSÕES

Os resultados do presente estudo confirmaram o potencial do sistema silvipastoril em estocar carbono em longo prazo. As frações de carbono lábil, carbono solúvel em água, e carbono da biomassa microbiana confirmam estudos anteriores, onde essas frações constituem medidas adequadas para detectar mudanças na qualidade da matéria orgânica do solo em função do manejo. A fração lábil da matéria orgânica, assim como o carbono solúvel e carbono da biomassa microbiana conferiram ao sistema silvipastoril maior qualidade de manejo do solo e maior disponibilidade de nutrientes para a microbiota, o que pode ser confirmado através do índice de manejo do carbono, que atingiu valores maiores que 100 em todas as camadas de solo avaliadas.

A conversão de áreas florestais em áreas cultivadas provocou redução dos teores de carbono e modificaram a dinâmica da matéria orgânica. A presença de árvores no sistema silvipastoril e ausência de práticas convencionais de uso do solo na área de pastagem em monocultivo proporcionaram recuperação das frações lábeis da matéria orgânica, igualando estas frações à mata nativa, conferindo maior sustentabilidade a estes sistemas quando comparados ao consórcio entre gramíneas e leguminosas.

A adesão a sistemas conservacionistas de uso do solo pode ser considerada uma medida mitigatória de gases do efeito estufa, conferindo melhoria à dinâmica da matéria orgânica, favorecendo o crescimento da biomassa microbiana, a ciclagem de nutrientes, promovendo melhoria do potencial produtivo das culturas, e elevando a capacidade dos sistemas de produção em estocar carbono no solo.

6 REFERÊNCIAS

- ADUAN, R. E.; VILELA, M. F.; KLINK, C. A. **Ciclagem de carbono em ecossistemas terrestres - o caso do cerrado brasileiro**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2003. 30 p. (Documentos, 105).
- ALCÂNTARA NETO, F.; LEITE, L. F. C.; ARNHOLD, E.; MACIEL, G. A.; CARNEIRO, R. F. V. Compartimentos de carbono em Latossolo Vermelho sob cultivo de eucalipto e fitofisionomias de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 849-856, 2011
- ALMEIDA, L. L. S.; FRAZÃO, L. A.; LESSA, T. A. M.; FERNANDES, L. A.; VELOSO, A. L. C.; LANA, A. M. Q.; SOUZA, I. A.; PEGORARO, R. F.; FERREIRA, E. A. Soil carbon and nitrogen stocks and the quality of soil organic matter under silvopastoral systems in the Brazilian Cerrado. **Soil And Tillage Research**, v. 205, n. 1, p. 621-641, jan. 2021.
- ANGERS, D.; PESANT, A.; VIGNEUX, J.; Early cropping-induced changes in soil aggregation, organic matter, and microbial biomass. **Soil Science Society of America Journal**. v. 56, p. 115-119, 1992.
- BALIN, N. M.; ZIECH, A. R. D.; OLIVEIRA, J. P. M.; GIRARDELLO, V. C.; STUMPF, L.; CONCEIÇÃO, P. C. Frações da matéria orgânica, índice de manejo do carbono e atributos físicos de um latossolo vermelho sob diferentes sistemas de uso. **Revista Scientia Agraria**, Curitiba, v. 18, n. 3, p. 85-94, set. 2017
- BARBERO, L. M.; CECATO, U.; LUGÃO, S. M. B.; GOMES, J. A. N.; LIMÃO, V. A.; BASSO, K. C. Produção de forragem e componentes morfológicos em pastagem de coastcross consorciada com amendoim forrageiro. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, n. 5, p. 788-795, mai. 2009.
- BARRETO, P. A. B.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; BARROS, N. F.; FONSECA, S. Atividade microbiana, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana em plantações de eucalipto, em sequência de idades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 611-619, abr. 2008
- BARTLETT, R. J.; ROSS, D. S. Colorimetric determination of oxidizable carbon in acid soil solutions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, p.1191-1192, 1988.
- BATISTA, I.; PEREIRA, M. G.; CORREIA, M. E. F.; BIELUCZYK, W.; SCHIAVO, J. A.; ROWS, J. R. C. Teores e estoque de carbono em frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica do solo sob integração lavoura-pecuária no bioma Cerrado. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 1, n. 34, p. 3377-3388, jun. 2013.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Org.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2^aed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 9-26.
- BLAIR, G. J.; LEFRoy, 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**, Victoria, v. 46, p. 1459-1466, 1995.
- BLANCO, H.; SHAPIRO, C. A.; WORTMANN, C. S.; DRIJBER, R. A.; MAMO, M.; SHAVER, T. M.; FERGUSON, R. B. Soil organic carbon: The value to soil properties. **Journal Of Soil And Water Conservation**, v. 68, n.5, p. 129-134. abr. 2013.
- BLANKINSHIP, J.; SCHIMEL, J. Biotic versus Abiotic Controls on Bioavailable Soil Organic Carbon. **Soil Systems**, v. 2, n. 1, p. 10-22, fev. 2018.
- BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; JANTALIA, C. P.; MARTIN-NETO, L.; MADARI, B; MILORI, D. M. B. P.; MACHADO, P. L. O. Carbon stocks in Brazilian soils: Quantity and mechanisms for accumulation and preservation. In: LIMA, M. A.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J.

R. A.; MACHADO, P. L. O. de A.; URQUIAGA, M. S. **Carbon stocks and greenhouse gas emissions in Brazilian agriculture**. Brasília: Embrapa, 2012. Cap. 2. p. 24-53

BODDEY, R. M.; MACEDO, R.; TARRÉ, R. M.; FERREIRA, E.; OLIVEIRA, O. C.; REZENDE, C. de P.; CANTARUTTI, R. B.; PEREIRA, J. M.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S. Nitrogen cycling in Brachiaria pastures: the key to understanding the process of pasture decline. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 103, n. 2, p. 389-403, jul. 2004.

BONETTI, J. A.; PAULINO, H. B.; SOUZA, E. D.; CARNEIRO, M. A. C.; CAETANO, J. O. Soil physical and biological properties in an integrated crop-livestock system in the Brazilian Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 11, p. 1239-1247, nov. 2018.

BRITO, G. S.; BAUTISTA, S.; LÓPEZ-POMA, R.; PIVELLO, V. R. Labile soil organic carbon loss in response to land conversion in the Brazilian woodland savanna. **Biogeochemistry**, v. 144, p. 31-46, mai. 2019

BRITO, M. R.; SIQUEIRA, F. L. T.; SOUSA, I. J. A.; SOUSA, R. N. Estoque de carbono no solo sob diferentes condições de cerrado. **Revista Desafios**, v. 5, n. esp. p. 114-124, out. 2018.

BROOKES, P. C.; POWLSON, D. S.; JENKINSON, D. S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 14, p. 319-329, 1982.

CALAZANS, S. O. L.; MORAIS, V. A.; SCOLFORO, J. R. S.; ZINN, Y. L.; MELLO, J. M.; MANCINI, L. T.; SILVA, C. A. Soil organic carbon as a key predictor of N in forest soils of Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 18, p. 1242-1251, set 2018

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

CARDOSO, E. L.; SILVA, M. L. N.; SILVA, C. A.; CURI, N.; FREITAS, D. A. F. Estoques de carbono e nitrogênio em solo sob florestas nativas e pastagens no bioma Pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 9, p. 1028-1035, set. 2010.

CARNEIRO, W. J. O.; SILVA, C. A.; MUNIZ, J. A.; SAVIAN, T. V. Mineralização de nitrogênio em Latossolos adubados com resíduos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 3, p. 715-725, jun. 2013.

CASTRO NETO, F. de; JACOVINE, L. A. G.; TORRES, C. M. M. E.; OLIVEIRA NETO, S. N. de; CASTRO, M. M. de; VILLANOVA, P. H.; FERREIRA, G. L. Balanço de Carbono – Viabilidade Econômica de Dois Sistemas Agroflorestais em Viçosa, MG. **Floresta e Ambiente**, Viçosa, v. 24, n. 1, p. 1-9, ago. 2017.

CERETTA, C. A.; AITA, C. **Manejo e conservação do solo**. 5. ed. Santa Maria: Ministério da Educação, 2010. 89 p.

CERETTA, C. A.; BAYER, C.; DICK, D. P.; MARTIN-NETO, L.; COLNAGO, L. A. Métodos espectroscópicos. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre, p. 201, 2008.

CHOI, W. J.; CHANG, S. X.; ALLEN, H. L.; KELTING, D. L.; RO, H. M. Irrigation and fertilization effects on foliar and soil carbon and nitrogen isotope ratios in a loblolly pine stand. **Forest Ecology and Management**, v.213, n.1-3, p.90-101, 2005

CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C.; ALBUQUERQUE, J. A. Manejo da calagem e os componentes da acidez de Latossolo Bruno em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 317-326, 2004.

CONTE, O.; FLORES, J. P. C.; CASSOL, L. C.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. F.; LEVIEN, R.; WESP, C. L. Evolução de atributos físicos de solo em sistema de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1301-1309, out. 2011.

COSTA, A. A.; DIAS, B. O.; FRAGA, V. S.; SANTANA, C. C.; SAMPAIO, T. F.; SILVA, N. Physical fractionation of organic carbon in areas under different land uses in the Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 8, p. 534-540, ago. 2020.

COSTA, C. C. A.; OLIVEIRA, F. L.; CAMACHO, R. G. V.; DANTAS, I. M.; MARACAJÁ, P. B. Entomofauna presente no conteúdo da serapilheira em área de caatinga na floresta nacional do Açu-RN. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Mossoró, v. 8, n. 4, p. 50-56, out. 2013.

COSTA, F. S.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.323-332, 2008.

COTRUFO, F.; RANALLI, M. G.; HADDIX, M. L.; SIX, J.; LUGATO, E. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. **Nature Geoscience**, v. 12, n. 12, p. 989-994, nov. 2019.

CRISPIM, S. M. A.; BRANCO, O. D. **Aspectos gerais das Braquiárias e suas características na sub-região da Nhecolândia, Pantanal, MS.** Corumbá: Embrapa Pantanal, 2002. 25 p. (Embrapa Pantanal. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 33).

CUNHA, E. Q.; STONE, L. F.; FERREIRA, E. P. B.; DIDONET, A. D.; MOREIRA, J. A. A.; LEANDRO, W. M. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho: ii - atributos biológicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 603-611, abr. 2011

D'ANDRÉA, A. F.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; SIQUEIRA, J. O.; CARNEIRO, M. A. C. Atributos biológicos indicadores da qualidade do solo em sistemas de manejo na região do cerrado no sul do estado de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 4, p. 913-923, dez. 2002.

DHILLON, G. S.; VAN REES, K. C. J. Soil organic carbon sequestration by shelterbelt agroforestry systems in Saskatchewan. **Canadian Journal Of Soil Science**, v. 97, n. 3, p. 265-278, set. 2017.

DIAS FILHO, M. B. Os desafios da produção animal em pastagens na fronteira agrícola brasileira. **Revista Brasileira de Zootecnia**. v.40, p.270-279, 2011.

DIONÍSIO, J. A.; PIMENTEL, I. C.; SIGNOR, D. Biomassa microbiana. In: DIONISIO, J. A.; PIMENTEL, I. C.; SIGNOR, D.; PAULA, A. M. de; MACEDA, A.; MATANNA, A. L. **Guia prático de biologia do solo.** cap. 13, p. 78-83, 2016

DUBEUX, J. C. B. JR.; SOLLENBERGER, LYNN E. Sustainable Intensification of Livestock Systems Using Forage Legumes. In: international grassland congress, XXIV., 2021, Reino Unido. **Proceedings...** National Organizing Committee of 2021 IGC/IRC Congress, 2021. Disponível em: <https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4288&context=igc>

DUBEUX, J. C. B.; SOLLENBERGER, L.; MATHEWS, B. W.; SCHOLBERG, J. M.; SANTOS, H. Q. Nutrient Cycling in Warm-Climate Grasslands. **Crop Science**, v. 47, n. 3, p. 915-928, mai. 2007.

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

FERREIRA, R. R. M.; TAVARES FILHO, J.; FERREIRA, V. M. Efeitos de sistemas de manejo de pastagens nas propriedades físicas do solo. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 31, n. 4, p. 913-932, out. 2010.

FIORETTO, A.; INNANGI, M.; MARCO, A.; MENTA, C.; PAPA, S.; PELLEGRINO, A.; SANTO, A. V. Discriminating between Seasonal and Chemical Variation in Extracellular Enzyme Activities within Two Italian Beech Forests by Means of Multilevel Models. **Forests**, v. 9, n. 4, p. 219, abr. 2018.

FLORENCE, E. A. S.; CAIONE, G.; SCHONINGER, E. L.; FERREIRA, F. M.; SEBEN JUNIOR, G. F. Estoque de Carbono e atributos físicos do solo, sob diferentes usos em pastagens na Amazônia Norte mato-grossense. **Brazilian Journal Of Animal And Environmental Research**, v. 4, n. 2, p. 1902-1909, abr. 2021.

FRANCHINI, J. C.; CRISPINO, C. C.; SOUZA, R. A.; TORRES, E.; HUNGRIA, M. Microbiological parameters as indicators soil quality under various soil management and crop rotation systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 92, n.1-2, p.18-29, 2007.

FREITAS, E. C. S. D., OLIVEIRA NETO, S. N. D., FONSECA, D. M. D., SANTOS, M. V., LEITE, H. G., & MACHADO, V. D. Deposição de serapilheira e de nutrientes no solo em Sistema Agrossilvipastoril com eucalipto e acácia. 2013.

FU, BO-JIE; GUO, X. D.; CHEN, L. D.; MA, K. M.; Soil nutrient changes due to land use changes in Northern China: A case study in Zunhua County, Hebei Province. **Soil Use And Management**, v. 17, n. 4, p. 294-296, dez. 2001.

GARCIA, R; TONUCCI, R. G.; GOBBI, K. F. Sistemas silvipastoris: uma integração pasto, árvore e animal. In: OLIVEIRA NETO, S.N.; DO VALE, A. B.; NACIF, A.P.; VILAR, M. B.; DE ASSIS, J. B. Sistema agrossilvipastoril: Integração lavoura, pecuária e floresta. 1. ed. Viçosa, MG. **Sociedade de investigações florestais**, 2010. cap. 4, p. 123 - 166.

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**, v. 36, p. 693–704, 2015.

GLAESER, D. F.; MERCANTE, F. M.; ALVES, M. A. M.; SILVA, R. F. da; KOMORI, O. M. Biomassa microbiana do solo sob sistemas de manejo orgânico em cultivos de café. **Ensaios e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, v. 14, n. 2, p. 103-114, 2010.

GUALBERTO, A. V. S. **Qualidade química e biológica do solo em sistemas de plantio direto, pastagem e eucalipto no Cerrado**. 2018. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2018.

GUILLAUME, T.; DAMRIS, M.; KUZYAKOV, Y. Losses of soil carbon by converting tropical forest to plantations: erosion and decomposition estimated by δ (13) C. **Global Change Biology**. v. 21, p. 3548– 3560, abr 2015.

GUO, L. B.; GIFFORD, R. M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. **Global Change Biology**, v. 8, n. 4, p. 345-360, abr. 2002.

HASSEN, A.; TALORE, D. G; TESFAMARIAM, E.; FRIEND, M. A.; MPANZA, T. D. Potential use of forage-legume intercropping technologies to adapt to climate change impacts on mixed crop-livestock systems in Africa: A review. **Regional Environmental Change**, v. 73, n. 10, p. 13-24, ago. 2017.

INACIO, E. S. B. **Distribuição vertical de carbono orgânico em latossolo sob diferentes usos**. 2009. 86 p. Tese (Doutorado em Ciências do solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA IBGE. **Censo Agropecuário 2017**. Disponível em: <https://censoagro2017.ibge.gov.br/templates/censo_agro/resultadosagro/index.html>

ISERNHAGEN, E. L. C.; RODRIGUES, R. A. R.; DIEL, D; MATOS, E. S.; CONCEIÇÃO, M. C. G. Estoques de carbono lábil e total em solo sob integração lavoura-pecuária-floresta na região de Transição Cerrado/Amazônia. **Nativa**, Sinop, v. 5, p. 515-521, dez. 2017

KALBITZ, K.; MEYER, A.; YANG, R.; GERSTBERGER, P. Response of dissolved organic matter in the forest floor to long-term manipulation of litter and throughfall inputs. **Biogeochemistry**, v. 86, n. 3, p. 301-318, out. 2007.

KOHMANN, M. M.; SOLLENBERGER, L. E.; DUBEUX JR, J. C.; SILVEIRA, M. L.; e MORENO, L. S. Legume proportion in grassland litter affects decomposition dynamics and nutrient mineralization. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 3, p. 1079-1089, 2019.

KUNDE, R. J.; LIMA, A. C. R. DE.; SILVA, J. L. S. DA.; VALGAS, R. A.; PILON, C. N. Qualidade do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária no Bioma Pampa. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 13, n. 4, p. 1-8, 2018.

KUZYAKOV, Y.; DOMANSKI, G. Carbon input by plants into the soil. Review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 163, n. 4, p. 421-431, 2000.

LAL, R. Carbon Management in Agricultural Soils. **Mitigation And Adaptation Strategies For Global Change**, v. 12, n. 2, p. 303-322, abr. 2007

LAL, R. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. **Global Change Biology**, v. 24, n. 8, p. 3285-3301, jan. 2018.

LEAL, O. D. A.; CASTILHOS, R. M. V.; PINTO, L. F. S.; PAULETTO, E. A.; LEMES, E. S.; KUNDE, R. J. Initial Recovery of Organic Matter of a Grass-Covered Constructed Soil after Coal Mining. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, n. 1, p. 1-16, 2016.

LEITE, L. F. C.; ARRUDA, F. P.; COSTA, C. N.; FERREIRA, J. S.; HOLANDA NETO, M. R. Qualidade química do solo e dinâmica de carbono sob monocultivo e consórcio de macaúba e pastagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 12, p. 1257-1263, 2013.

LIMA, H. N. B.; DUBEUX JUNIOR, J. C. B.; SANTOS, M. V. F.; MELLO, A. C. L.; LIRA, M. A.; CUNHA, M. V. Soil attributes of a silvopastoral system in Pernambuco Forest Zone. **Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales**, v. 6, n. 1, p. 15-25, abr. 2018.

LIU, S. B.; ZAMANIAN, K.; SCHLEUSS, P. M.; ZAREBANADKOUKI, M.; KUZYAKOV, Y. Degradation of Tibetan grasslands: consequences for carbon and nutrient cycles. **Agriculture, Ecosystem & Environment**, v. 252, p. 93-104, jan 2018.

LIU, Y.; TIAN, F.; JIA, P.; ZHANG, J.; HOU, F.; WU, G. Leguminous species sequester more carbon than gramineous species in cultivated grasslands of a semi-arid area. **Solid Earth**, v. 8, n. 1, p. 83-91, jan. 2017.

LORENZ, K.; LAL, R. Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 34, p. 443-454, fev. 2014.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; FERREIRA, E. P.; SANTOS, L. L.; BEUTLER, S. J.; FERRAZ JÚNIOR, A. S. L. Frações oxidáveis do carbono orgânico em argissolo vermelho-amarelo sob sistema de aleias. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 52-64, ago. 2009.

LOSS, A.; RIBEIRO, E. C.; PEREIRA, M. G.; COSTA, E. M. Atributos físicos e químicos do solo em sistemas de consórcio e sucessão de lavoura, pastagem e silvipastoril em Santa Teresa, ES. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 5, p. 1347-1357, 2014.

LUCIANO, R. V.; BERTOL, I.; BARBOSA, F. T.; KURTZ, C.; FAYAD, J. A. Propriedades físicas e carbono orgânico do solo sob plantio direto comparados à mata natural, num Cambissolo Háplico. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 9, n. 1, p. 9-19, 2010.

LUSTOSA FILHO, J. F.; NOBREGA, J. C. A.; FURTINI NETO, A. E.; SILVA, C. A.; NÓBREGA, R. S. A.; PRAGANA, R. B.; DIAS, B. O.; GMACH, M. R. Disponibilidade de nutrientes e teor de matéria orgânica sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 12, n. 4, p. 475-483, 2017.

MAIA, S. M. F.; OGLE, S. M.; CERRI, C. P.; CERRI, C. Effect of grassland management on soil carbon sequestration in Rondônia and Mato Grosso states, Brazil. **Geoderma**, v. 149, n. 1-2, p. 84-91, fev. 2009.

- MARSCHNER, B.; KALBITZ, K. Controls of bioavailability and biodegradability of dissolved organic matter in soils. **Geoderma**, v. 113, n 4, p. 211-235, mai. 2003, 113, 211–235
- MATIAS, M. C. B. S.; SALVIANO, A. A. C.; LEITE, L. F. C.; ARAUJO, A. S. F. Biomassa microbiana e estoques de C e N do solo em diferentes sistemas de manejo, no Cerrado do Estado do Piauí. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 31, n. 3, p. 517-521, jun. 2009.
- MATOSO, S. C. G.; SALMAN, A. K. D. Fertilização orgânica em sistemas silvipastoris. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 88, p. 519-526, 2016.
- MEENA, V. S.; MONDAL, T.; PANDEY, B. M.; MUKHERJEE, A.; YADAV, R. P.; CHOUDHARY, M.; SINGH, S.; BISHT, J. K.; PATTANAYAK, A. Land use changes: Strategies to improve soil carbon and nitrogen storage pattern in the mid-Himalaya ecosystem. **Geoderma**, v. 321, p. 69-78, ago. 2018.
- MELO, V. F.; SILVA, W.; ANGULO-VILLACORTA, C.; CARVALHO, L.; BARBOSA, I. R. Efeito do gradiente ambiental na relação c:n do solo de florestas ecotonais da ilha de maracá, Roraima. In: Simpósio Cenbam e PPBio Amazônia Ocidental, 2018, Amazônas. **Livro de Resumos**. INPA, 2018. p. 10-11.
- MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. Viçosa: UFV, 2005. 107 p.
- MICKAEL, H.; CHRISTOPHE, M.; THIBAUD, D.; JOHANNE, N.; BENJAMIN, P.; JODIE, T.; YVAN, C. Orchard management influences both functional and taxonomic ground beetle (Coleoptera, Carabidae) diversity in South-East France. **Applied Soil Ecology**, v. 88, p. 26–31. 2015.
- MIRANDA, C. C.; CANELLAS, L. P.; NASCIMENTO, M. T. Caracterização da matéria orgânica do solo em fragmentos de mata atlântica e em plantios abandonados de eucalipto. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 31, n. 1, p. 905-916, ago. 2007.
- MONTEIRO, M. T. e GAMA-RODRIGUES, E.F. Carbono, nitrogênio e atividade da biomassa microbiana em diferentes estruturas de serapilheira de uma floresta natural. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.28, p.819-826, 2004.
- MORAES, J. F. L.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M. Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. **Geoderma**, v. 70, n. 1, p. 63-81, mar. 1996.
- MOREIRA, A.; COSTA, D. G. Dinâmica da matéria orgânica na recuperação de clareiras da floresta amazônica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 10, p. 1013-1019, out. 2004.
- MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E. Dinâmica da matéria orgânica e da biomassa microbiana em solo submetido a diferentes sistemas de manejo na Amazônia Ocidental. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 11, p. 124-137, nov. 2004.
- MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do solo**. 2. ed. atual. Lavras: UFLA, 729 p. 2006.
- MOSQUERA, O.; BUURMAN, P.; RAMIREZ, B. L.; AMEZQUITA, M. C. Carbon stocks and dynamics under improved tropical pasture and silvopastoral systems in Colombian Amazonia. **Geoderma**, v. 189-190, p. 81-86, nov. 2012.
- MOSQUERA-LOSADA, M. M.; FREESE, D.; RIGUEIRO-RODRÍGUEZ, A. Carbon Sequestration in European Agroforestry Systems. In: KUMAR, B. M.; NAIR, P. K. R. **Carbon Sequestration in Agroforestry Systems: opportunities and Challenges**, 8. ed. Netherlands, 2011. Cap. 3, p. 43-59. Springer Science
- MÜLLER, C. B.; WEBER, O. L. S.; SCARAMUZZA, J. F. Oxidizable fraction of organic carbon in an argisol under different land use systems. **Cerne**, v.18, p.215-222, 2012.

MYRNA J.; CLEMENTE, JOYCE S.; FENG, XIAOJUAN; GRAYSTON, SUE J.; BARKER, JASON; GREGORICH, ED G. Transforming plant carbon into soil carbon: process-level controls on carbon sequestration. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 94, n. 6, p. 1065-1073, ago. 2014.

NAIR, P. K. R.; TONUCCI, R. G.; GARCIA, R.; NAIR, V. D. Silvopasture and carbon sequestration with special reference to the Brazilian Savanna (Cerrado). In: KUMAR, B. M.; NAIR, P. K. R. **Carbon sequestration potential of agroforestry systems: opportunities and challenges**. 8. ed. Netherlands, 2011. Cap. 8, p. 145-162.

NANZER, M. C.; ENSINAS, S. C.; BARBOSA, G. F.; BARRETA, P. G. V.; OLIVEIRA, T. P.; SILVA, E. R. G.; 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**, v. 18, n. 1, p. 136-145, fev. 2019.

NAVARRETE, D.; SITCH, S.; ARAGÃO, L. O C.; PEDRONI, L. Conversion from forests to pastures in the Colombian Amazon leads to contrasting soil carbon dynamics depending on land management practices. **Global Change Biology**, v. 22, n. 10, p. 3503-3517, out. 2016.

OLIVEIRA JÚNIOR, A. C.; SILVA, A. A.; CURI, N.; LIMA, J. M.; Formas e quantidades de carbono lixiviados de latossolos vermelhos sob influência de calcário e fósforo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 327-345, jun. 2008.

OLIVEIRA, A. M.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; NOVAES, A. B.; CARVALHO, F. F.; MEIRELES, I. E. S. Decomposição da serapilheira foliar em plantios de bambu, nim indiano e eucalipto. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 30, n. 3, p. 845-855, set. 2020.

OLIVEIRA, D. M. S.; PAUSTIAN, K.; DAVIES, C. A.; CHERUBIN, M. R.; FRANCO, A. L. C.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Soil carbon changes in areas undergoing expansion of sugarcane into pastures in south-central Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 228, n. 1, p. 38-48, ago. 2016.

OLIVEIRA, E. S.; REATTO, A.; ROIG, H. L. Estoques de carbono do solo segundo os componentes da paisagem. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**, v. 32, n. 1-2, p. 71-93, 2015.

OLIVEIRA, T. P.; ENSINAS, S. C.; BARBOSA, G. F.; NANZER, M. C.; BARRETA, P. G. V.; SILVA, M. F. G.; QUEIROZ, G. R. S. S.; PRADO, E. A. F. Carbono lável e frações oxidáveis de carbono em solos cultivados sob diferentes formas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 8, n. 4, p. 49-56, set. 2018.

OLIVEIRA, W. R. D., RAMOS, M. L. G., CARVALHO, A.M., COSER, T.R., SILVA, A. M. M., LACERDA, M. M., SOUZA, K. W., MARCHÃO, R. L., VILELA, L., PULROLNIK, K. Dynamics of soil microbiological attributes under integrated production systems, continuous pasture, and native cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 51, p. 1501–1510, set. 2016.

PEREIRA, M. F.; NOVO JÚNIOR, J.; SÁ, J. R.; LINHARES, P. C. F.; BEZERRA NETO, F.; PINTO, J. R. S. Ciclagem do carbono do solo nos sistemas de plantio direto e convencional. **Agropecuária Científica no Semiárido**, Campina Grande, v. 9, n. 2, p. 21-32, jun. 2013

PEREZ, K. S. S.; RAMOS, M. L. G.; MCMANUS, C. Nitrogênio da biomassa microbiana em solo cultivado com soja, sob diferentes sistemas de manejo, nos Cerrados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 2, p. 137-144, 2005.

PES, L. Z.; ARENHARDT, M. H. Solos. **Santa Maria: Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria**, 2015.

POST, W M; KWON, K C. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. **Global Change Biology**, [s. l.], v. 6, n. 3, p. 317-327, out. 2000.

PULROLNIK, Karina. **Transformações do carbono no solo**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados (Documentos), 2009. 36 p

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A.; GUIMARÃES, P. T. G; GUILHERME, L. R. G. Frações oxidáveis do carbono orgânico de Latossolo cultivado com cafeeiro em diferentes espaçamentos de plantio. **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, p. 429-437, 2008.

RANGEL, O. P. S.; SILVA, C. A.; GUIMARÃES, P. T. G. Estoque e frações da matéria orgânica de Latossolo cultivado com cafeeiro em diferentes espaçamentos de plantio. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, [s. l], v. 31, n. 6, p. 132-141, dez. 2017.

RESCK, D. V. S.; FERREIRA, E. A. B.; FIGUEIREDO, C. C.; ZINN, Y. L. Dinâmica da matéria orgânica no Cerrado. In: SANTOS. G. de A.; SILVA, L. S. da; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. de O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. Cap. 21, p. 359-417.

RESENDE, T. M.; ROSOLEN, V.; BERNOUX, M.; BRITO, J. L. S.; BORGES, E. N.; ALMEIDA, F. P. Atributos físicos e carbono orgânico em solo sob Cerrado convertido para pastagem e sistema misto. **Sociedade e Natureza**, [s. l], v. 27, n. 3, p. 35-45, dez. 2015.

RIBEIRO, P. H.; SANTOS, J. V. V. M.; COSER, S. M.; NOGUEIRA, N. O.; MARTINS, C. A. S. Adubação verde, os estoques de carbono e nitrogênio e a qualidade da matéria orgânica do solo. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 6, n. 1, p. 43-50, jun. 2011.

ROSA, M. E. C.; OLSZEVSKI, N.; MENDONÇA, E. S.; COSTA, L. M.; CORREIA, J. R. Formas de carbono em Latossolo Vermelho Eutroférrego sob plantio direto no sistema biogeográfico do cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, p. 911-923, out. 2003

ROSA, V. A.; JESUS, E. S.; SOL, P. J. S. N.; NUNES, H. B.; NETO, J. P. S. Sequestro de carbono em áreas cultivadas com eucalipto em diferentes idades na região oeste da Bahia. In: II Congresso Internacional Das Ciências Agrárias PDVAgro., 2017, Natal. **Anais** [...], Iidv, 2017. p. 72-86.

RUFINO, A. M. **Estoque de carbono em solos sob plantios de eucalipto e fragmento de cerrado**. 2009. 60p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2009.

SÁ SOUZA, M.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; JARDIM, A. M. R. F.; SILVA, J. R. I. Ciclagem de nutrientes em ecossistemas de pastagens tropicais. **Pubvet**, v. 12, n. 5, p. 1-9, maio 2018.

SÁ SOUZA, M.; JARDIM, A. M. R.; F.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SILVA, J. R. I.; LEITE, M. L. M. V.; TEIXEIRA, V. I.; SILVA, T. G. F. Ciclagem de nutrientes em ecossistemas de pastagens tropicais. **Pubvet**, v. 12, n. 5, p. 1-9, mai. 2018.

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

SANTANA, W. D.; SANTOS, A. C.; REIS, A. S.; TAVARES, R. C.; FREITAS, G. A. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em sistema de agropecuária familiar no Tocantins. **Científica**, v. 47, n. 3, p. 344-357, set. 2019.

SANTOS, D. C.; CASTILHOS, D. D.; PAULETTO, E. A.; FERNANDES, F. F.; PINTO, L. F. S.; CASTILHOS, R. M. V. Biomassa e atividade microbiana em solo construído após mineração de carvão e submetido a diferentes coberturas vegetais. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 14, n. 3-4, p.135-146, set. 2008.

SANTOS, J. S.; LIMA, V. L. A.; JÚNIOR, J. C. F. B.; SILVA, L. V. B. D.; AZEVEDO, C. A. V. Mobilidade de solutos em colunas de solo com água residuária doméstica de suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.11, p.1226- 1233, 2010.

SCAGLIA, B; ADANI, F. Biodegradability of soil water soluble organic carbon extracted from seven different soils. **Journal of Environmental Sciences**, v. 21, n. 5, p. 641-646, jan. 2009.

SHANG, C.; TIESSEN, H. Organic matter lability in a tropical oxisol: evidence from shifting cultivation, chemical oxidation, particle size, density and magnetic fractionations. **Soil Science**, Baltimore, v. 162, n. 11, p. 795-807, 1997.

SILVA, A. A.; SCHMITT FILHO, A. L.; KAZAMA, D. C. S.; LOSS, A.; SOUZA, M.; PICCOLO, M. C. Estoques de carbono e nitrogênio no Sistema Silvipastoril com Núcleos: a nucleação aplicada viabilizando a pecuária de baixo carbono. **Research, Society And Development**, v. 9, n. 10, p. 1-30, set. 2020.

SILVA, A. B.; LIRA JUNIOR, M. A.; DUBEUX JUNIOR, J. C. B.; FIGUEIREDO, M. V. B.; VICENTIN, R. P. Estoque de serapilheira e fertilidade do solo em pastagem degradada de Brachiaria decumbens após implantação de leguminosas arbustivas e arbóreas forrageiras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 2, p. 502-511, abr. 2013.

SILVA, I. R. D., NOVAIS, R. F. D., BARROS, N. F. D., & SILVA, E. F. D. Manejo de resíduos e matéria orgânica do solo em plantações de eucalipto: uma questão estratégica para a manutenção da sustentabilidade. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.10-20, 2004.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1017p, 2007.

SILVA, J. M.; SANTOS, M. F. S.; SILVA, J. P. C.; OLIVEIRA, J. K. C. R.; GOMES, T. C. A. Carbono solúvel em água na avaliação da aceleração da compostagem da casca de coco verde com dejetos de suínos e hidrólise alcalina. In: X seminário de iniciação científica e pós-graduação da embrapa tabuleiros costeiros, 2018, Aracaju. **Anais [...]**. Aracaju: Embrapa, 2021. p. 54-58.

SILVA, L. S.; LAROCA, J. V. S.; COELHO, A. P.; GONÇALVES, E. C.; GOMES, R. P.; PACHECO, L. P.; CARVALHO, P. C. F.; PIRES, G. C.; OLIVEIRA, R. L.; SOUZA, J. N. A. Does grass-legume intercropping change soil quality and grain yield in integrated crop-livestock systems? **Applied Soil Ecology**, v. 170, p. 104257, fev. 2022.

SILVA, L. S.; SOLLENBERGER, L. E.; MULLENIX, K.M.; KOHMANN, M. M.; DUBEUX, J. C. B.; SILVEIRA, M. L. Soil carbon and nitrogen stocks in nitrogen-fertilized grass and legume-grass forage systems. **Nutrient Cycling In Agroecosystems**, v. 122, n. 1, p. 105-117, jan. 2022.

SILVA, M. A.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; AVANZI, J. C. e LEITE, F. P. Sistemas de manejo em plantios florestais de eucalipto e perdas de solo e água na região do Vale do Rio Doce, MG. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 4, p. 765-776, 2011.

SILVA, P. H. M.; POGGIANI, F.; LIBARDI, P. L.; GONÇALVES, A. N. Fertilizer management of eucalypt plantations on sandy soil in Brazil: Initial growth and nutrient cycling. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 67-78, 2013.

SINGH, J.; SINGH, B.; SHARMA, S. Comparison of soil carbon and nitrogen pools among poplar and eucalyptus based agroforestry systems in Punjab, India. **Carbon Management**, v. 12, n. 6, p. 693-708, nov. 2021.

SIQUEIRA, J. O.; NAIR, M. G.; HAMMER SCHMIDT, R.; SAFIR, G. R.; PUTNAM, A. R. Significance of phenolic compounds in plant-soil-microbial systems. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 10, n. 1, p. 63-121, 1991.

SMITH, P. Do grasslands act as a perpetual sink for carbon? **Global Change Biology**, v. 20, n. 9, p. 2708-2711, fev. 2014.

SOARES, E. M. B. Frações da matéria orgânica e composição molecular de substâncias húmicas de solos sob cultivo de eucalipto em biomassas distintas. 2009. 123p. **Tese** (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SOLOMON, D.; LEHMANN, J.; KINYANGI, J.; AMELUNG, W.; LOBE, I.; PELL, A.; SKJEMSTAD, J. A. N. Long-term impacts of anthropogenic perturbations on dynamics and speciation of organic carbon in tropical forest and subtropical grassland ecosystems. **Global Change Biology**, v. 13, n. 2, p. 511-530, 2007.

SOUZA W. J. O; MELO, W. J. Matéria orgânica em um latossolo submetido a diferentes sistemas de produção de milho. **Revista Brasileira Ciências do Solo**, v. 27, p. 1113-1122, 2003.

SOUZA, S. R.; FERNANDES, M. S. NITROGÊNIO. *In: Nutrição Mineral de Plantas*. Viçosa: SBCS, cap. 9, p. 216-245, 2006

TATE, K. R.; SCOTT, N.; PARSHOTAM, A.; ROSS, D. J. Plant effects on soil carbon storage and turnover in a montane beech (*Nothofagus*) forest and adjacent tussock grassland in New Zealand. **Australian Journal Of Soil Research**, v. 38, n. 3, p. 391-404, jan. 2000.

TOMAZI, M.; JUNQUEIRA, P. H.; COELHO, R. S.; SALTON, J. C.; MONTEIRO, L. C.; SILVA, I. M. O.; SOUZA, M. H. S. Biomassa microbiana e estrutura do solo em sistemas de produção agrícola. *In: simpósio brasileiro de solos arenosos, III.*, 2019, Campo Grande. **Anais...** Brasília: Embrapa, 2019.

TONUCCI, R.; NAIR, V. Grass vs. Tree Origin of Soil Organic Carbon under Different Land-Use Systems in the Brazilian Cerrado. **Plant And Soil**, v. 419, n. 1-2, p. 54-65, out. 2017.

UDAWATTA, R.; KREMER, R.; NELSON, K.; JOSE, S.; BARDHAN, S. Soil Quality of a Mature Alley Cropping Agroforestry System in Temperate North America. **Communications In Soil Science And Plant Analysis**, v. 45, n. 19, p. 2539-2551, set. 2014.

URQUIAGA, S.; JANTALIA, C. P.; ZOTARELLI, L.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Manejo de sistemas agrícolas para sequestro de C no solo. *In: AQUINO, A.; ASSIS, R. L. Processos biológicos no sistema solo-planta: ferramentas para uma agricultura sustentável*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, p. 323- 342. 2005

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 19, p. 703-707, 1987.

VIEIRA, F. C. B.; BAYER, C.; ZANATTA, A. J.; DIECKOW, J.; MIELNICZUK, J.; HE, Z. L. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems. **Soil And Tillage Research**, v. 96, n. 1-2, p. 195-204, out. 2007.

WANG, J.; YOU, Y.; TANG, Z.; LIU, S.; SUN, O. J. Variations in leaf litter decomposition across contrasting forest stands and controlling factors at local scale. **Journal of Plant Ecology**, v. 8, n. 3, p. 261-272, 2015.

WEBER, M. A.; MIELNICZUK, J. Estoque e disponibilidade de nitrogênio no solo em experimento de longa duração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 429-437, 2009.

WINK, C.; REINERT, D. J.; TORNQUIST, C. G.; SILVA, I. R. Dinâmica do Carbono e Nitrogênio em Plantações de Eucalipto no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1623-1632, dez. 2015.

WMO GREENHOUSE GAS BULLETIN. **The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2019**. 16. ed. Atmospheric Environment Research Division, 2020. Disponível em: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10437. Acesso em: 11 nov. 2020

XU, S.; SILVEIRA, M. L.; INGLETT, K.; SOLLENBERGER, L. Effect of land-use conversion on ecosystem C stock and distribution in subtropical grazing lands. **Plant And Soil**, v. 399, n. 1, p. 89-102, fev. 2016.

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

ZHANG, Q.; JIA, X.; WEI, X.; SHAO, M.; LI, T.; YU, Q. Total soil organic carbon increases but becomes more labile after afforestation in China's Loess Plateau. **Forest Ecology And Management**, v. 461, p. 1-7, abr. 2020.

AMARAL, F. C. S. do; SANTOS, H. G. dos; AGLIO, M. L. D.; DUARTE, M. N.; PEREIRA, N. R.; OLIVEIRA, R. P. de; CARVALHO JUNIOR, W. de. **Mapeamento de solos e aptidão agrícola das terras do Estado de Minas Gerais**. Embrapa Solos, 2004. 95p

HERINGER, I; MOOJEN, E. L. Potencial produtivo, alterações da estrutura e qualidade da pastagem de milheto submetida a diferentes níveis de nitrogênio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 31, n. 2, p. 875-882, abr. 2002.

SILVA, M. A.; NASCENTE, A. S.; FRASCA, L. L. M.; REZENDE, C. C.; FERREIRA, E. A. S.; FILIPPI, M. M. C. de; LANNA, A. C.; FERREIRA, E. P. B.; LACERDA, M. C. Plantas de cobertura isoladas e em mix para a melhoria da qualidade do solo e das culturas comerciais no Cerrado. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 12, p. 1-11, 12 set. 2021.