

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

Juliana Martins Ribeiro

**Dinâmica do carbono orgânico em cronossequências de uso do solo no Cerrado mineiro:
mudanças nos estoques e simulação com o modelo Century**

**Montes Claros
2020**

Juliana Martins Ribeiro

Dinâmica do carbono orgânico em cronossequências de uso do solo no Cerrado mineiro: mudanças nos estoques e simulação com o modelo Century

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal, da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal.

Orientador: Profa. Dr^a. Leidivan Almeida Frazão

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Arnaldo Fernandes

Ribeiro, Juliana Martins.

R484d
2020

Dinâmica do carbono orgânico em cronossequências de uso do solo no Cerrado mineiro [manuscrito] : mudanças nos estoques e simulação com o modelo Century/ Juliana Martins Ribeiro. Montes Claros, 2020.

96 f.: il.

Tese (doutorado) - Área de concentração em Produção Vegetal. Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientadora: Leidivan Almeida Frazão.

Banca examinadora: Carlos Eduardo Pellegrino Cerri, Michele Xavier Vieira Megda, Reginaldo Arruda Sampaio, Rodinei Facco Pegoraro, Luiz Arnaldo Fernandes.

Inclui referências: f. 23-27; 46-48; 66-68; 92-95.

1. Agrossilvicultura -- Teses. 2. Carbono -- Teses.. 3. Dinâmica do solo - Teses. I. Frazão, Leidivan Almeida. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 631.4



Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Ciências Agrárias
Doutorado em Produção Vegetal

ATA DE DEFESA DE TESE

Aos 31 dias do mês de julho de 2020, às 08:00 horas, sob a Presidência da Professora Leidivan Almeida Frazão, D. Sc. (Orientadora - ICA/UFMG) e com a participação dos Professores Luiz Arnaldo Fernandes, D. Sc. (Coorientador - ICA/UFMG), Michele Xavier Vieira Megda, D. Sc. (Unimontes), Carlos Eduardo Pellegrino Cerri, D. Sc. (Esalq/USP), Reginaldo Arruda Sampaio, D. Sc. (ICA/UFMG) e Rodinei Facco Pegoraro, D. Sc. (ICA/UFMG), reuniu-se, por videoconferência, a Banca de tese de **Juliana Martins Ribeiro**, aluna do Curso de Doutorado em Produção Vegetal. O resultado da defesa de tese intitulada: "DINÂMICA DO CARBONO ORGÂNICO EM CRONOSSEQUÊNCIAS DE USO DO SOLO NO CERRADO MINEIRO: MUDANÇAS NOS ESTOQUES E SIMULAÇÃO COM O MODELO CENTURY"

sendo a aluna considerada (aprovado/reprovado) APROVADA. E, para constar, eu, Professora Leidivan Almeida Frazão, Presidente da Banca, lavrei a presente ata que depois de lida e aprovada, será assinada por mim e pelos demais membros da Banca examinadora.

OBS.: A aluna somente receberá o título após cumprir as exigências do ARTIGO 68 do regulamento do Curso de Doutorado em Produção Vegetal, conforme apresentado a seguir.

Art. 68 Para dar andamento ao processo de efetivação do grau obtido, o candidato deverá, após a aprovação de sua Dissertação ou Tese e da realização das modificações propostas pela banca examinadora, se houver, encaminhar à secretaria do Colegiado do Programa, com a anuência do orientador, no mínimo 3 (três) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da dissertação ou, 4 (quatro) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da tese, no prazo de 60 (sessenta) dias.

Montes Claros, 31 de julho de 2020.

Leidivan Almeida Frazão
Orientadora

Michele Xavier Vieira Megda
Membro

Reginaldo Arruda Sampaio
Membro

Luiz Arnaldo Fernandes
Coorientador

Carlos Eduardo Pellegrino Cerri
Membro

Rodinei Facco Pegoraro
Membro

*À minha filha Alice por ser fonte
de inspiração em minha vida.
À minha mãe Regina e ao meu
esposo Igor pelo carinho,
confiança e apoio,
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

A Deus pela dádiva da vida e por oferecer muito mais do que preciso e por abençoar muito mais do que mereço.

Aos meus familiares Aristotelina (*In Memoriam*), Regina, Ana, Antônio, Igor, Madalena, Ludimila, João, Welton, Rosângela, Rui Eustáquio pelo apoio, carinho, amizade e incentivo em todas as etapas de minha vida.

À Professora Leidivan A. Frazão pela orientação, apoio, amizade e incentivo durante todas as etapas deste trabalho.

À Universidade Federal de Minas Gerais, ao Instituto de Ciências Agrárias e ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal pela oportunidade de realização do curso de doutorado.

Aos Professores, Luiz A. Fernandes, Reginaldo A. Sampaio, Rodinei F. Pegoraro, Carlos Eduardo P. Cerri e Plínio B. de Camargo pelos ensinamentos, oportunidades e auxílios prestados durante a execução da pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo.

Aos Professores Demerson A. Sanglard e Ernane R. Martins, bem como aos técnicos de laboratório, Francine, Flávia e Márcio pelo empréstimo de instrumentos, equipamentos e uso do laboratório para a condução parcial desta pesquisa.

Aos Professores Álvaro L. Veloso e Márcia V. Santos, por compartilhar as áreas experimentais, bem como à Fazenda da Barra em Francisco Sá e a Fazenda do Moura em Curvelo.

Ao pesquisador da Embrapa Gado de Corte Davi J. Bungenstab pela doação e envio do livro "Sistemas de Integração lavoura-pecuária-floresta: a produção sustentável".

Aos queridos amigos e integrantes do grupo de estudos em ILPF Paula, Jaqueline, Luana, Igor, Rafael, Iandra, Ana Clara, Gabriel, Sávio, Etiam, Elora, Camila Cunha, Guga, Débora pelo apoio na condução dos experimentos em campo e no laboratório e por conhecimentos compartilhados.

À amiga Betânia pela amizade, apoio neste trabalho e por conhecimentos compartilhados.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Obrigada!

Não morre aquele que deixou na terra a melodia de seu
cântico na música de seus versos.

Cora Coralina

Faça o teu melhor na condição que você tem, enquanto você
não tem condições melhores, para fazer melhor ainda!

Mario Sergio Cortella

DINÂMICA DO CARBONO ORGÂNICO EM CRONOSSEQUÊNCIAS DE USO DO SOLO NO CERRADO MINEIRO: MUDANÇAS NOS ESTOQUES E SIMULAÇÃO COM O MODELO CENTURY

RESUMO

A crescente necessidade por alimentos tem gerado demandas por expansão de novas áreas agricultáveis. A substituição de áreas degradadas, com baixos estoques de C, por sistemas de manejo mais sustentáveis apresenta-se como alternativa viável para promover melhorias na qualidade do solo e aumento do carbono orgânico do solo (COS), uma vez que 60% das pastagens no Brasil estão em algum estágio de degradação. A introdução de sistemas que integram vários componentes agrícolas, em uma mesma área, como os sistemas agrossilvipastoris, aumenta a capacidade de acúmulo de COS e o potencial para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi avaliar os estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo e as frações húmicas da matéria orgânica do solo (MOS), além de simular e projetar cenários futuros sobre a dinâmica do COS em duas cronossequências de uso da terra no Cerrado mineiro. As cronossequências de uso da terra foram compostas por vegetação nativa (VN), pastagem degradada (PAD) e sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e monocultivo de *Urochloa brizantha* 'Marandu' (MAR), em áreas de transição Cerrado-Floresta Estacional Semidecidual e Cerrado-Mata Atlântica, em Minas Gerais. Para a análise dos dados foi utilizado o teste t a 5% de probabilidade (Artigo 1), estatística não-paramétrica, aplicando-se o teste Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) (Artigo 2) e o teste t a 10% de probabilidade (Artigo 3) com o uso do software R. Os sistemas de ILPF apresentaram aumento nos estoques de carbono do solo, variando entre 1,44 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ a 2,17 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Aumentos nos estoques de N e nos teores de C das frações húmicas do solo foram observados com a introdução dos sistemas de ILPF nos dois locais avaliados. Os resultados deste estudo comprovaram que houve melhorias nos estoques de C, após a mudança de uso do solo de pastagens degradadas, em sistemas de ILPF e monocultivo de pastagem bem manejada. Adicionalmente, foi observado enriquecimento isotópico de ¹³C, nas camadas superficiais do solo, promovido pelo cultivo de gramíneas (espécie C₄), indicando que esses sistemas promovem o acúmulo de C no solo ao longo do tempo de condução. Os resultados mostraram que o modelo Century simulou de forma confiável os estoques de COS das duas cronossequências. O modelo previu aumento do COS ao converter o sistema PAD (46,04 Mg ha⁻¹) em sistemas de ILPF (54,94 Mg ha⁻¹) na cronossequência de Francisco Sá – MG e sistema PAD (42,38 Mg ha⁻¹) em sistemas de ILPF (51,71 Mg ha⁻¹) na cronossequência de Curvelo - MG em curto, médio e longo prazo, mostrando que a intensificação desses sistemas, em áreas degradadas, principalmente em solos com textura argilosa, contribui ao acúmulo de COS e podem ser utilizados como modelo para a adaptação e mitigação das mudanças climáticas nas regiões de transição do Cerrado Mineiro.

Palavras-Chaves: ¹³Carbono. Estoque de carbono. Estoques de nitrogênio. Mudança climática. Sistemas agrossilvipastoris.

DYNAMICS OF ORGANIC CARBON IN CHRONOSEQUENCES OF SOIL USE IN THE CERRADO MINEIRO: STOCK CHANGES AND SIMULATION WITH THE CENTURY MODEL

ABSTRACT

The growing need for food has generated demands for the expansion of new agricultural areas. The replacement of degraded areas, with low C stocks, with more sustainable management systems presents as a viable alternative to promote improvements in soil quality and increase in soil organic carbon (SOC), since 60% of pastures in the Brazil are in some stage of degradation. The introduction of systems that integrate several agricultural components in the same area, such as agrosilvopastoral systems, increases the SOC accumulation capacity and the potential for reducing greenhouse gas (GHG) emissions. Given the above, the objective of this study was to evaluate the carbon (C) and nitrogen (N) stocks of the soil and the humic fractions of the soil organic matter (SOM), in addition to simulating and designing future scenarios on the dynamics of the SOC in two chronosequences of land use in the Cerrado of Minas Gerais. The chronosequences of land use were composed of native vegetation (NV), degraded pasture (DPA) and crop-livestock-forest integration system (ICLF) and monoculture of *Urochloa brizantha* 'Marandu' (MAR) in Cerrado-Forest transition areas Semideciduous Seasonal and Cerrado-Atlantic Forest in Minas Gerais. For data analysis, it was used the t test at 5% probability (article 1), non-parametric statistics applying the Kruskal-Wallis test ($p < 0.05$) (article 2) and the test t 10% probability (article 3) using software R. The ICLF systems presented an increase in soil carbon stocks, ranging from $1.44 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ to $2.17 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Increases in N stocks and C levels of soil humic fractions were observed with the introduction of ICLF systems in the two evaluated sites. The results of this study proved that there were improvements in soil quality and in C stocks after the change of land use of degraded pastures in ICLF systems and well-managed pasture monoculture. Additionally, it was observed an isotopic enrichment of ^{13}C in the superficial layers of the soil promoted by the cultivation of grasses (species C_4), indicating that these systems promote the accumulation of C in the soil over the driving time. The results showed that the Century model reliably simulated the SOC stocks of the two chronosequences. The model predicted an increase in SOC by converting the DPA system (46.04 Mg ha^{-1}) into ICLF systems (54.94 Mg ha^{-1}) in the chronosequence of Francisco Sá - MG and DPA system (42.38 Mg ha^{-1}) in ICLF systems (51.71 Mg ha^{-1}) in chronosequence of Curvelo - MG in the short, medium and long term, showing that the intensification of these systems in degraded areas, mainly in soils with clay texture, contributes to the accumulation of SOC and can be used as a model for adaptation and mitigation of climate change in the transition regions of the Cerrado of Minas Gerais.

Keywords: ^{13}C Carbon. Carbon stock. Nitrogen stocks. Climate change. Agrosilvopastoral systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama do submodelo de simulação do ciclo do carbono.....	21
Figura 2 - Localização da área experimental em Francisco Sá-MG, Brasil.....	31
Figura 3 - Precipitação e temperatura mensais para os anos de 2017 e 2018 da região de Montes Claros, MG, Brasil, próxima ao experimento.....	32
Figura 4 - Cronossequência de uso da terra em área de transição do Cerrado no Brasil.....	34
Figura 5 - Estoques de carbono do solo (C) e nitrogênio (N) sob diferentes usos da terra na área de transição do Cerrado no Brasil.....	38
Figura 6 - Fracionamento isotópico do carbono (C) de espécies C ₃ e C ₄ sob diferentes usos do solo em área de transição do Cerrado no Brasil.....	41
Figura 7 - Localização da área de estudo no município de Curvelo-MG.....	51
Figura 8 - Precipitação pluviométrica e temperatura média no município de Curvelo/MG nos anos 2017 e 2018.....	52
Figura 9 - Cronossequência de uso da terra em área de Cerradão localizada no município de Curvelo/MG.....	53
Figura 10 - Estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) em diferentes usos do solo em área de Cerradão localizada no município de Curvelo/MG.....	57
Figura 11 - Estoques de carbono (C) do solo provenientes da vegetação nativa (espécies C ₃) e introduzido pela pastagem (espécie C ₄) e pelo Eucalyptus urograndis (espécie C ₃) nos diferentes sistemas de uso do solo em área de Cerradão localizada no município de Curvelo/MG.....	59
Figura 12 - Variação natural de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) nos diferentes sistemas de uso do solo em área de Cerradão em Curvelo/MG.....	60
Figura 13 - Localização das áreas de estudo nos municípios de Francisco-Sá e Curvelo no Estado de Minas Gerais, Brasil.....	72
Figura 14 - Precipitação e temperatura mensais, nos últimos 30 anos, nos municípios de Francisco Sá e Curvelo, Minas Gerais, Brasil.....	73
Figura 15 - Cronosequência do uso da terra e breve descrição das práticas de manejo dos locais estudados no Cerrado brasileiro.....	75
Figura 16 - Valores medidos e simulados dos estoques de C do solo na camada de 0 a 20 cm na cronossequência avaliada no município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil.....	78

Figura 17 - Estoques de C do solo medidos (símbolos) e simulados (linhas) na camada de 0 a 20 cm, usando o modelo Century para simulação até 100 anos.....	79
Figura 18 - Estoques de carbono dos compartimentos Ativo, Lento e Passivo da Matéria Orgânica do Solo no município de Francisco Sá, Estado de Minas Gerais, Brasil.....	81
Figura 19 - Valores medidos e simulados dos estoques de C do solo na camada de 0 a 20 cm na cronosequência avaliada no município de Curvelo, Minas Gerais, Brasil.....	82
Figura 20 - Estoques de C do solo medidos (símbolos) e simulados (linhas) na camada de 0 a 20 cm, usando o modelo Century para simulação até 100 anos.....	83
Figura 21 - Estoques de carbono dos compartimentos Ativo, Lento e Passivo da Matéria Orgânica do Solo no município de Curvelo, Estado de Minas Gerais, Brasil.....	85
Figura 22 - Estoque de C do solo mensurado versus simulado no município de Francisco Sá em (a) e Curvelo em (b), em áreas de vegetação nativa, pastagem degradada, sistema de integração lavoura-pecuária-floresta e monocultivo de pastagem no Cerrado Brasileiro, n=4.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização do solo (0-20 cm de profundidade) em uma cronosequência em área de transição do Cerrado no Brasil.....	33
Tabela 2 - Conteúdo de Carbono Orgânico Total (COT) e Nitrogênio Total (NT) e relação carbono/nitrogênio (C/N) entre diferentes usos do solo em área de transição do Cerrado.....	37
Tabela 3 - Estoques de carbono e nitrogênio no solo corrigidos em 2016 e 2018 e taxa de acúmulo (TA) de carbono e nitrogênio a 0-40 cm de profundidade (n = 4), sob diferentes usos da terra em área de transição do Cerrado no Brasil.....	39
Tabela 4 - Contribuição isotópica de C ₃ e C ₄ (Mg ha ⁻¹ e %) no estoque de carbono do solo corrigido sob diferentes usos do solo em área de transição do Cerrado no Brasil.....	40
Tabela 5 - Conteúdo de carbono orgânico (CO) e nitrogênio (N) nas frações ácido fúlvico (FAF), ácido húmico (FAH) humina (HUM), relação FAH/FAF, relação (FAH+FAF)/HUM e índice de humificação (C-IH e N-IH) da matéria orgânica do solo (MOS) entre diferentes usos do solo em área de transição do Cerrado no Brasil.....	42
Tabela 6 - Teores de carbono orgânico total do solo (COT), nitrogênio total (NT), relação carbono / nitrogênio (C/N) e densidade aparente do solo (Ds) em diferentes sistemas de uso da terra em área de Cerradão localizada no município de Curvelo/MG.....	56
Tabela 7 - Estoques corrigidos de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo (0 - 30 cm de profundidade) em 2016 e 2018 e taxa de acúmulo (TA) de C e N em diferentes sistemas de uso da terra, em área de Cerradão localizada no município de Curvelo/MG.....	58
Tabela 8 - Abundância natural de ¹³ C e carbono derivado das espécies C ₃ e C ₄ nos diferentes sistemas de uso da terra em área de Cerradão localizada no município de Curvelo/MG.....	61
Tabela 9 - Teores de carbono orgânico (CO) e nitrogênio (N) das frações ácido fúlvico (FAF), ácido húmico (FAH), humina (HUM), relação C:N das frações, relação FAH/FAF, relação (FAH+FAF)/HUM e índice de humificação (C-IH e N-IH) da matéria orgânica do solo (MOS), em diferentes sistemas de uso da terra, em área de Cerradão localizada no município de Curvelo/MG.....	62
Tabela 10 - Caracterização do solo (0 a 20 cm de profundidade) de duas cronosequências de uso da terra no Cerrado de Minas Gerais, Brasil.....	74
Tabela 11 - Testes estatísticos aplicados entre os valores simulados e medidos dos estoques de C das duas cronosequências nos municípios de Francisco Sá (n=5) e Curvelo – MG (n=7) no Cerrado do Estado de Minas Gerais, Brasil.....	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C	Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
C-CO ₂	Perda de carbono por respiração
COS	Carbono Orgânico do Solo
FAF	Fração Ácido Fúlvico
FAH	Fração Ácido Húmico
GEE	Gases de Efeito Estufa
HUM	Fração Humina
ILPF	Integração Lavoura-Pecuária-Floresta
MAR	Monocultivo de <i>Urochloa brizantha</i> 'Marandu'
MOS	Matéria Orgânica do Solo
N	Nitrogênio
NT	Nitrogênio Total
PAD	Pastagem Degradada
Pg	Pentagrama
SH	Substância Húmica
VN	Vegetação Nativa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo Geral.....	15
2.2 Objetivos Específicos.....	15
3 REVISÃO DE LITERATURA	16
3.1 Sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta – ILPF.....	16
3.2 Teores e estoques de C e N em sistemas de ILPF	17
3.3 Frações húmicas do solo em sistemas de integração.....	17
3.4 Fracionamento isotópico do $\delta^{13}\text{C}$ em sistemas de integração.....	18
3.5 Simulação da Matéria Orgânica do Solo (MOS) com uso do Modelo Century.....	19
3.6 Referências.....	23
4 ARTIGOS	28
4.1 Artigo 1 - Estoques de carbono e nitrogênio e frações da matéria orgânica do solo em uma cronosequência de uso do solo em área de transição Cerrado-Floresta Estacional Semidecidual.....	28
4.2 Artigo 2 - Mudanças nos estoques de carbono e nitrogênio do solo sob sistema agrossilvipastoril e pastagem bem manejada no Cerrado da mesorregião Central de Minas Gerais.....	49
4.3 Artigo 3 - Simulação de mudanças no carbono orgânico do solo em duas cronosequências de intensificação de uso da terra no Cerrado Mineiro.....	69
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	92

1 INTRODUÇÃO

O elemento carbono (C) está presente em diferentes reservatórios terrestres, interagindo com a biosfera, atmosfera e hidrosfera. Os ecossistemas terrestres constituem um reservatório importante de C em virtude dos processos de fotossíntese e do armazenamento de CO₂ reduzido na matéria orgânica do solo (MOS) (LAL, 2018).

O aumento da concentração atmosférica de dióxido de C (CO₂) entre a era pré-industrial (278 mg L⁻¹), no ano de 1750, e nos tempos atuais (407,8 mg L⁻¹), junto com outros gases de efeito estufa (GEE), na atmosfera, propiciaram o aumento médio global da temperatura de 1 °C. Entre as fontes antropogênicas, o uso da terra e a conversão de ecossistemas naturais, em sistemas agrícolas, continuam sendo uma fonte importante de emissão de GEE (LAL, 2020).

As mudanças climáticas são geradas pelas emissões de GEE para a atmosfera, por várias décadas, causadas por atividades antropogênicas (CERRI *et al.*, 2018). Uma das estratégias para mitigar os efeitos do aquecimento global e das mudanças climáticas, é identificar solos que estão com baixa resiliência, como solos erodidos e em estágios de degradação e convertê-los em sistemas agrícolas sustentáveis, aumentando o potencial de captura, armazenamento e sequestro de C atmosférico (MINASNY *et al.*, 2017; LAL, 2019; YANG *et al.*, 2019).

Sendo assim, sistemas agrícolas que visam à ampla gama de bens e serviços com maior diversidade de espécies florísticas emitem menos dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera (BUZHDIYGAN *et al.*, 2020). Por conseguinte, os sistemas conservacionistas com integração de lavoura, pecuária e floresta (ILPF), também conhecidos como sistemas agrossilvipastoris, foram introduzidos como alternativas aos modelos atuais de produção e visam aumentar a biodiversidade e a manutenção da sustentabilidade agrícola, pecuária e agrossilvicultura (BALBINO *et al.*, 2011a).

Os sistemas de ILPF têm o potencial de armazenar C no solo relacionando-se diretamente com as condições climáticas, tipo e mineralogia de solos e ao tipo de cobertura vegetal (BRANDANI *et al.*, 2015). Essas informações em conjunto podem ser utilizadas em modelos matemáticos, como o modelo Century, para estimar a capacidade de determinado solo acumular C em curto, médio e longo prazo, complementando estudos da dinâmica da MOS.

Nessa perspectiva, o modelo Century é uma ferramenta importante para a análise dos efeitos do manejo e das mudanças climáticas na produtividade e sustentabilidade em diferentes agroecossistemas (PARTON; STEWART; COLE, 1988). Assim, pode-se comparar dados modelados de diferentes condições edafoclimáticas e estratégias de manejo com observações experimentais em longo prazo ou estudos de cronossequências, servindo como estratégias para tomadas de decisões e fornecendo informações importantes sobre uso do solo para priorização de aplicação de recursos pelos formuladores de políticas públicas. Contudo, não há estudos de simulação com o modelo Century, em sistemas agrossilvipastoris e poucas informações na literatura sobre o potencial de acúmulo de C e nitrogênio total (N) do solo nesses sistemas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste estudo foi avaliar os teores e estoques C e nitrogênio (N) do solo, frações húmicas da MOS, contribuição de espécies C₃ e C₄ no aporte de C do solo, e simular a dinâmica do C do solo, para a projeção de cenários futuros sobre os o acúmulo de COS, mediante alterações climáticas, em duas cronossequências de uso da terra composta por vegetação nativa (VN), pastagem degradada (PAD) e sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e monocultivo de pastagem Marandu (MAR) no Cerrado de Minas Gerais.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar os teores e estoques de C e N do solo em duas cronossequências de intensificação do uso do solo com vegetação nativa (referência), pastagens degradadas, sistemas agrossilvipastoris e monocultivo de pastagem bem manejada;
- Avaliar os conteúdos de C e N das frações húmicas da MOS;
- Avaliar a abundância natural de ¹³C e contribuição de espécies C₃ e C₄ no aporte de C do solo;
- Simular, com o uso do modelo Century v.4, os estoques de C do solo, bem como, dos compartimentos da MOS: compartimentos ativo, lento e passivo;
- Projetar cenários futuros de aumento da temperatura da região em 2°C, diminuição da precipitação pluviométrica em 20 mm e modificação do teor de argila do solo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta - ILPF

O Cerrado é o segundo maior bioma da América do Sul, predominantemente savânico, que ocupa 203,4 milhões de hectares e aproximadamente 24% do território brasileiro. O Cerrado brasileiro tem importância mundial por apresentar mais de 11.627 espécies de plantas nativas já catalogadas, do ponto de vista da diversidade biológica. Considerado como um hotspots mundiais de biodiversidade (áreas naturais com grande diversidade ecológica e que estão em risco de extinção), o Cerrado apresenta extrema abundância de espécies endêmicas e sofre uma excepcional perda de habitat pela expansão da produção agrícola (BRASIL, 2020a).

Segundo o mapa de Biomas do Brasil, o domínio do Cerrado mineiro, localizado na porção centro-ocidental, ocupa 54% da extensão territorial do Estado de Minas Gerais, sendo que 22,3% são áreas de remanescentes da cobertura vegetal nativa (IBGE, 2019).

Assim, nas três últimas décadas, o bioma Cerrado passou por transformações pela expansão da fronteira agrícola brasileira, e muitas dessas áreas possuem algum grau de degradação. A mudança do uso do solo de vegetação nativa do Cerrado para áreas de pastagens, que, ao longo do tempo, sofreram perda de produtividade, implicou em redução dos estoques de COS (BRAZ *et al.*, 2013).

Nesse sentido, o Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC) do governo brasileiro, lançado em dezembro de 2016, tem o objetivo de apoiar os agricultores a recuperar pastagens degradadas pela implementação de tecnologias, como, por exemplo, a ILPF, para melhorar a eficiência da produção de carne bovina e leite, além da mitigação de GEE por meio do acúmulo de C no solo (BRASIL, 2020b).

A tecnologia de sistemas de ILPF consiste na diversificação com rotação ou sucessão de espécies agrícolas, forrageiras, florestais e pecuária, em uma mesma área, de forma que haja interação e benefícios para todas as atividades (BALBINO *et al.* 2011a). Esses sistemas estão alicerçados em conceitos da sustentabilidade, pois são ecologicamente corretos, socialmente justos, culturalmente diversos e economicamente viáveis de modo a abranger pequenos, médios e grandes produtores rurais, desde que haja um mínimo de tecnologia em suas propriedades (BALBINO *et al.*, 2011b).

O interesse pela adoção dos sistemas de ILPF ocorreu, sobretudo, pela necessidade de recuperação das áreas de pastagens degradadas e pelas restrições ambientais para a abertura de novas áreas de vegetação nativa (BUNGENSTAB, 2012). Além disso, outras vantagens desse sistema são a redução da erosão do solo, melhoria das condições microclimáticas e bem-estar animal, redução dos custos de produção, aumento de produtividade e diminuição do risco inerente à agropecuária, especialmente por variações climáticas e oscilações do mercado (CARVALHO *et al.*, 2010).

3.2 Teores e estoques de C e N em sistemas de ILPF

Diversos estudos relataram melhorias nos atributos químicos e físicos do solo em sistemas integrados de produção (MACEDO, 2009; SPERA *et al.*, 2010; SANTOS *et al.*, 2011). Adicionalmente, o acúmulo de matéria orgânica do solo e melhorias das suas propriedades biológicas sugerem que os sistemas de integração reduzam os impactos ambientais na produção agrícola e a mitigação de gases do efeito estufa (FRANCHINI *et al.*, 2011).

Silva *et al.* (2011), verificaram aumentos nos teores de C e N, quando as áreas de culturas agrícolas em plantio direto rotacionado com pastagens, há 19 anos, foram convertidas para sistemas de integração lavoura-pecuária ($101,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ e $5,5 \text{ Mg ha}^{-1}$), com maiores incrementos na camada superficial do solo pelo aporte de resíduos, maior concentração de raízes e não revolvimento do solo nos sistemas integrados. Ademais, as gramíneas forrageiras do gênero *Urochloa* são eficientes em acumular C no solo em virtude de seu abundante sistema radicular que apresenta rápida renovação e alto efeito rizosférico (D'ANDREA *et al.*, 2004).

Os sistemas integrados de produção proporcionam aumento dos teores de C e N no solo e isso varia, conforme a espécie implantada no sistema, o tipo de solo e condições edafoclimáticas (CARVALHO *et al.*, 2010). Tonucci *et al.* (2011) verificaram que o sistema silvipastoril (*Eucalyptus* x *Urochloa brizantha* 'Marandu'), no bioma Cerrado, foi eficiente em acumular carbono ($426,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de 0-100 cm de profundidade), em virtude do aumento da diversidade de espécies e de densidade de raízes, fornecendo uma produção de biomassa vegetal maior.

Elevados teores de C e N nesses sistemas indicam que há proteção física da MOS, em complexos organominerais que associam moléculas orgânicas com argilas silicatadas e ou óxidos e hidróxido de ferro e alumínio (SOUZA *et al.*, 2009). Rosa, Sano e Rosendo, (2014), observaram que a mudança de uso do solo de pastagem degradada (58.47 Mg ha^{-1}) em pastagem melhorada (68.28 Mg ha^{-1}), na camada de 0-30 cm de profundidade, promoveu aumentos dos estoques de COS. Desta forma, a adoção de práticas sustentáveis de manejo que promovam o acúmulo de carbono no sistema solo-planta podem mitigar os efeitos do aquecimento global (CARVALHO *et al.*, 2010).

3.3 Frações húmicas do solo em sistemas de integração

A fração humificada do solo apresenta maior tempo de permanência no solo e sua principal função é atuar sobre as condições físicas e químicas do solo, além de ser importante no acúmulo de COS. A mudança de uso do solo de áreas cultivadas de forma convencional, para plantações de eucalipto sob sistemas de integração, por resultarem em aumento dos estoques de COS, pode influenciar na dinâmica da matéria orgânica do solo, especialmente, quando sistemas de integração são introduzidos, resultando em aumento dos teores de C nas frações húmicas do solo (SILVA *et al.*, 2011).

Além disso, em sistemas agrossilvipastoris, a presença do componente arbóreo reduz a incidência solar sobre o solo, diminuindo a temperatura e aumentando a umidade do solo. Esse fato promove maior

atividade microbiana na transformação de resíduos orgânicos, uma vez que os microrganismos são responsáveis pela ciclagem de nutrientes no solo. Assim, esse processo ao longo do tempo pode contribuir para a maior entrada de carbono orgânico no solo e à formação de frações mais estáveis da matéria orgânica do solo (SILVA *et al.*, 2020).

Desta forma, aumento nos teores de C nas frações ácido fúlvico (AF) e ácido húmico (AH), em sistemas silvipastoris, podem ser atribuídos pela maior deposição de serapilheira das árvores e rizodeposição das pastagens (LOSS *et al.*, 2014).

Também, a deposição de serapilheira e raízes podem aumentar o teor de C na fração humina em detrimento das frações AF e AH em pastagens cultivadas, pastagens nativas e florestas nativas, pela presença de material orgânico com maior teor de lignina (CARDOSO *et al.*, 2010)

Além disso, alguns estudos, com sistemas conservacionistas, mostraram maior teor de C da fração ácido fúlvico (AF) em comparação à fração ácido húmico (AH), em profundidade. Isso pode estar relacionado à maior solubilidade da fração AF, em condições de pH discrepantes, já que os AH são solúveis em meio básico. Contudo, maiores teores de AH são em decorrência da maior humificação e rápida mineralização do resíduo orgânico alocado ao solo (MARTINS *et al.*, 2009 e CAMPOS *et al.*, 2013).

Outros autores observaram que solos de áreas de vegetação nativa e pastagens apresentaram menor relação extrato alcalino/humina (EA/HUM), em função da composição dos resíduos vegetais serem pobres em lignina, já que é predecessor químico das frações humina e ácidos húmicos (MARTINS *et al.*, 2009). Além desta relação, a razão AH/AF (ácido húmico/ácido fúlvico) é utilizada como indicador de qualidade do solo, sendo maior o grau de humificação da MOS quando a razão for próxima a um (CAMPOS *et al.*, 2013).

Portanto, em sistemas de uso da terra com pouco revolvimento do solo, observam-se maiores valores da fração HUM, seguidos das frações AH e AF, as quais constituem um compartimento com papel crucial no acúmulo de carbono em formas estáveis e com longo tempo de permanência no solo (BALDOTTO *et al.*, 2015; LOSS *et al.*, 2014; SILVA *et al.*, 2020).

3.4 Fracionamento isotópico do $\delta^{13}\text{C}$ em sistemas de integração

Isótopos são átomos de mesmo número de prótons e elétrons, porém apresentam número de nêutrons diferentes. Na natureza há vários isótopos de carbono (C) que, em sua maioria são instáveis no meio ambiente, contudo os isótopos ^{12}C e ^{13}C são estáveis. O isótopo de ^{13}C contém um nêutron a mais que o isótopo de ^{12}C e, por isso, torna-se mais pesado que o isótopo de ^{12}C , podendo sofrer discriminação isotópica no processo de fotossíntese (FRY, 2006; MICHENER; LAJTHA, 2008).

As espécies C_3 discriminam mais o $^{13}\text{CO}_2$ e espécies C_4 discriminam menos o $^{13}\text{CO}_2$. Nas espécies C_3 , o fracionamento do carbono ocorre nos dois passos do processo fotossintético: difusão/ dissolução e carboxilação. No segundo passo desse processo, a carboxilação pela enzima ribulose-1,5 bifosfato carboxilase (Rubisco) possui grande afinidade pelo $^{12}\text{CO}_2$ e pouca afinidade pelo $^{13}\text{CO}_2$. Já as plantas C_4 , usam a via fotossintética Hatch-Slack em que a enzima de carboxilação fofoenolpiruvato (PEP) carboxilase reduz o CO_2 a ácido aspártico ou málico discriminando menos o $^{13}\text{CO}_2$ (TAIZ; ZEIGER, 2002).

O ^{12}C e ^{13}C são isótopos de carbono de grande importância para o crescimento vegetal e que possuem os ciclos mais complexos nos sistemas agrícolas, tendo influência nos estoques de COS (ALVES *et al.*, 2005).

Desta forma, a compreensão da dinâmica da MOS, pela da determinação do fracionamento isotópico do $\delta^{13}\text{C}$, em áreas com culturas arbóreas e pastagens, deve ser conhecida para facilitar e planejar o manejo do sistema (SEVERO *et al.*, 2017).

Assim, a variação na abundância natural de ^{13}C tem sido usada, para avaliar o impacto de diferentes usos e manejos do solo, em diversas regiões do Brasil (SÁ *et al.*, 2001; SISTI *et al.*, 2004; OLIVEIRA *et al.*, 2017). A mudança do $\delta^{13}\text{C}$ pode ocorrer, em períodos curtos, como consequência da mudança do manejo das culturas e na função da qualidade dos resíduos (espécies C_3 e C_4) incorporados ao solo (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

Um exemplo foi a mudança de uso do solo de uma floresta de Mata Atlântica em pastagem de *Urochloa brizantha* cultivar Marandu, cujos valores de $\delta^{13}\text{C}$ foram menos negativos nos primeiros 30 cm de profundidade do solo (-22‰ a -18‰), indicando fixação do ^{13}C no processo de fotossíntese pela pastagem, espécie C_4 (SANTOS *et al.*, 2019).

Da mesma forma, Oliveira *et al.* (2017) observaram maior enriquecimento de ^{13}C na camada superficial do solo no sistema ILPF (-23,90‰ a -20,86‰) pelo estabelecimento de *Urochloa brizantha*, cultivar Marandu, sendo mais pronunciado em posições mais distantes da árvore.

Assim também, Sant-Anna *et al.* (2017), ao substituir uma área de pastagem degradada, que anteriormente foi Cerrado *Strictu sensu*, em um sistema integrado com pastagens e culturas agrícolas, constataram maior contribuição de ^{13}C na camada superficial do solo (-18‰ a -16‰) e maior discriminação do ^{13}C com o aumento da profundidade (-20‰ a -19‰).

Outros autores encontraram maiores valores de ^{13}C em monocultivo de pastagem de *Urochloa brizantha*, cultivar Marandu (-14,16‰), enquanto, em sistemas de ILPF, os valores de ^{13}C foram maiores com o aumento da profundidade do solo (-21,87‰ de 0-10 cm e -18,30‰ de 20-50 cm), pelo histórico de manejo do solo, que, com o seu revolvimento, os valores de ^{13}C foram reduzidos na camada superficial do solo (TONUCCI *et al.*, 2017).

3.5 Simulação da Matéria Orgânica do Solo (MOS) com uso do Modelo Century (versão 4.0)

Modelos de simulação consistem na utilização de técnicas matemáticas, empregadas em computadores, que permitem imitar o funcionamento de sistemas reais pelo exercício de modelos. Por meio dos modelos de simulação, consegue-se fazer integração com algoritmos que reproduzem, por funções matemáticas, as respostas de um sistema com uma determinada combinação de fatores que influenciam o sistema. E por possibilitar o estudo dos sistemas naturais de maneira integrada, os modelos, ao serem construídos possibilitam a detecção de falhas e lacunas do conhecimento relativo ao sistema simulado (LEAL; DE-POLLI, 2008a).

Para a construção de modelo de simulação, é necessário dividir o sistema em partes. Após cada parte do sistema ter sido trabalhada separadamente, faz-se a integração de modo que o modelo funcione

como um todo. Para ajustar as interações entre cada segmento do modelo, é realizada a sua calibração para que o modelo funcione corretamente. A calibração consiste em reajustar alguns parâmetros de suas equações e interações (WHISLER *et al.*, 1986).

Após a montagem e calibração, inicia-se a fase de validação do modelo que é a comparação dos dados obtidos pelo modelo com os observados experimentalmente, observando se esses resultados estão de acordo com os objetivos pré-estabelecidos (LEAL; DE-POLLI, 2008a).

Para que seja considerado válido, um modelo de simulação deve reproduzir a dinâmica do sistema, bem como o seu comportamento ao longo do tempo. Após essa fase, é quantificada a sensibilidade do modelo a um determinado parâmetro ou variável, de modo a avaliar o quanto uma variação, no valor de um parâmetro ou de uma variável, influencia a resposta final desse modelo (PARTON *et al.*, 1987).

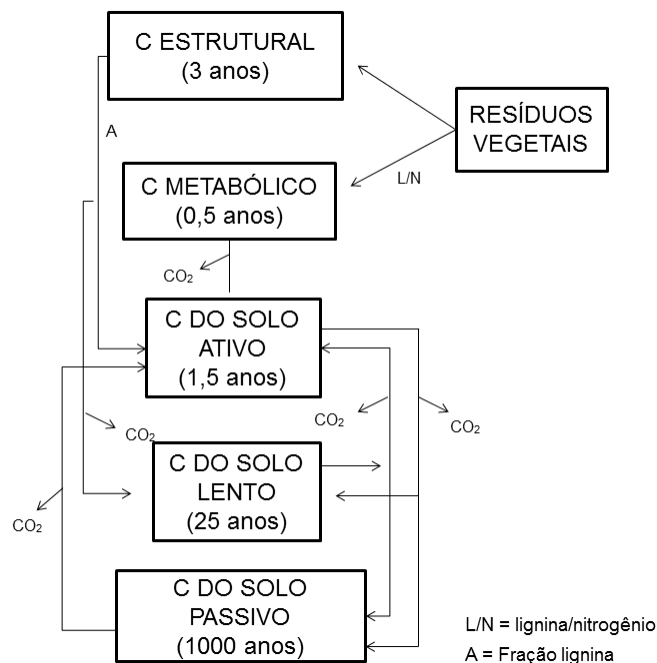
Há uma grande diversidade de modelos para representar mudanças no C do solo (VAN VEEN; PAUL, 1981; JANSSEN, 1984; PARTON *et al.*, 1987). O modelo de simulação Century foi desenvolvido por Parton *et al.*, 1987. Esses autores criaram o modelo CENTURY SOM para simular a dinâmica da matéria orgânica do solo, em sistemas naturais ou cultivados com pastagem, simulando a ciclagem do C, N, P e S no sistema solo-planta em clima temperado.

Dentro do ciclo do carbono, assume-se que existam sete compartimentos de C também chamados de “pools” orgânicos (PARTON *et al.*, 1987), conforme pode ser visualizado na Figura 1. Os resíduos vegetais que morrem e se desprendem das plantas são denominados de superficiais, que compreendem resíduos da parte aérea, liteira e resíduos do solo, do sistema radicular. Esse compartimento é subdividido em compartimento metabólico, em que é constituído pelo conteúdo intracelular das células vegetais, tanto da parte aérea como do sistema radicular, com uma taxa de renovação de 0,1 a 1 ano e compartimento estrutural constituído pela parede celular dos resíduos vegetais, tanto da parte aérea como do sistema radicular, com taxa de renovação de 1 a 5 anos. Assim, dentro do compartimento de resíduos vegetais, há quatro compartimentos: estrutural superficial, metabólico superficial, estrutural do solo e metabólico do solo. Além disso, o modelo Century demonstra que os compartimentos estruturais e metabólicos superficiais, que são oriundos de resíduos da parte aérea, apresentam taxa de renovação 20% mais lenta do que os compartimentos estrutural e metabólico, originários do solo (LEAL; DE-POLLI, 2008b).

Assim, o submodelo da matéria orgânica do solo pode ser dividido em compartimentos (ativo, lento e passivo), com base no seu tempo de reciclagem e taxas de decomposição. O compartimento ativo é representado pela biomassa microbiana e produtos derivados, com tempo de reciclagem de até 5 anos. O compartimento lento é representado pela matéria orgânica leve, derivada do material vegetal das culturas ou da aplicação orgânica ao solo, com tempo de reciclagem estimado entre 20 e 40 anos. E o compartimento passivo é representado pelo material muito resistente à decomposição e protegido física e quimicamente pelo solo, podendo alcançar tempos de reciclagem entre 150 a 500 anos (FIGURA 1) (PARTON *et al.*, 1987).

Esses compartimentos estão relacionados diretamente com fatores edafoclimáticos, composição química da serapilheira como relação lignina/N, relação C/N e práticas de manejo. Aumentos na proporção dessas relações resultam em mais resíduos, sendo adicionados nos conjuntos estruturais, que apresentam taxas de decomposição mais lentas. Além disso, esses fatores controlam as taxas de decomposição do material orgânico e determinam o fluxo de C e N entre os compartimentos da MOS (METHERELL *et al.* 1993).

Figura 1 - Diagrama do submodelo de simulação do ciclo do carbono



Fonte: Adaptado de PARTON *et al.*, 1987; LEAL; DE-POLLI, 2008a.

Os principais objetivos do modelo Century são fornecer uma ferramenta para análise de agroecossistemas, testar a consistência dos dados e avaliar os efeitos das mudanças no manejo e no clima nos agroecossistemas (PARTON *et al.*, 1987).

Estudos utilizando o modelo Century avaliaram a dinâmica da matéria orgânica, em solos da região tropical (PARTON *et al.*, 1989), a relação entre a idade e distribuição da matéria orgânica, em função do fracionamento de partículas do solo (BONDE *et al.*, 1992), em cronossequências na Amazônia brasileira (CERRI *et al.*, 2004), estudos em escala regional (TORNQUIST, 2007), entre outras simulações.

Outros estudos utilizaram o modelo Century como ferramenta, para avaliar os impactos nos estoques de COS em diferentes cronossequências e práticas de manejo do solo, em ambientes tropicais (CERRI *et al.*, 2004; CERRI *et al.*, 2007; TORNQUIST *et al.*, 2009; BORTOLON *et al.*, 2011; OELBERMANN; VORONEY, 2011; BRANDANI *et al.*, 2015; SILVA-OLAYA *et al.*, 2016; ZANI *et al.*, 2018).

Cerri *et al.* (2007) avaliaram a precisão do modelo Century na estimativa de mudanças do COS, em 11 cronossequências, em condição de floresta para pastagens na Amazônia brasileira. Esses autores previram que o desmatamento e a mudança de uso do solo, em pastagens bem manejadas, causariam um declínio inicial nos estoques de COS (0-20 cm) seguido por uma lenta subida para níveis superiores aos da floresta nativa. Seus resultados sugerem que o modelo Century pode ser usado com sucesso para monitorar os estoques e alterações do COS, tendo aplicações importantes como no cálculo das emissões de CO₂ da mudança de uso do solo nos inventários nacionais de gases de efeito estufa.

O uso do modelo Century por Oelbermann; Voroney (2011) foi utilizado para prever os estoques de COS em sistemas agroflorestais e monocultivos em ambientes tropicais e temperados. O modelo previu,

adequadamente, ao longo do tempo, declínio dos estoques de COS para sistema de monocultivo e aumento do COS nos sistemas agroflorestais. Isso foi associado à maior entrada de MOS, proveniente de podas de árvores e da serapilheira, nos sistemas agroflorestais, que, por terem maior diversidade de espécies florísticas, apresentaram maior aporte de matéria orgânica no solo, contribuindo para o aumento do COS, em longo prazo e, conseqüentemente, dos compartimentos de C ativo, lento e passivo do solo.

Ao avaliar a dinâmica do COS em sistemas de cana-de-açúcar convencional e com manejo conservacionista, Brandani *et al.* (2015) observaram que o sistema com manejo conservacionista manteve os estoques de COS, em níveis iguais ou superiores a vegetação nativa de Cerrado, enquanto práticas convencionais, como a queima de resíduos, provocariam redução do COS em níveis abaixo de 60% dos níveis da vegetação nativa.

Além disso, outros estudos obtiveram resultados confiáveis ao aplicar o modelo Century, para analisar os estoques de COS. Oelbermann *et al.* (2017) avaliaram sistemas de monocultivos com as culturas milho e soja e sistemas consorciados com milho e soja. Em monocultivo de pastagem, o COS era de 20,30 Mg ha⁻¹ (15,7%) no ano 1881. Os autores observaram que o COS declinou, quando a produção estava sob monocultivo com manejo convencional do solo, após o qual houve aumento do COS em 46,7% entre o período de 2007 e 2120. Houve aumento das frações ativa e lenta de 61% e 35%, respectivamente, entre o período de 2007 e 2120, ao implantar o sistema consorciado, mostrando a importância da diversidade de espécies agrícolas no sistema, para que tenha maior aporte de matéria orgânica no solo e acúmulo de COS, reduzindo a emissão de GEE.

3.6 Referências

- ALVES, Bruno José Rodrigues; ZOTARELLI, L.; JANTALIA, C. P.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S. Emprego de isótopos estáveis para o estudo do carbono e do nitrogênio no sistema solo-planta. *In*: AQUINO, A. M.; ASSIS, R. L. (eds). **Processos biológicos no sistema solo-planta**: Ferramentas para uma agricultura sustentável. Brasília, Embrapa-SCT, 2005. p. 343-350.
- BALBINO, Luiz Carlos *et al.* Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S. l.], v. 46, n. 10, p. 1–12, 2011 a. DOI: 10.1590/s0100-204x2011001000001.
- BALBINO, L.C.; BARCELLOS, A.O.; STONE, L.F. **Marco Referencial em Integração Lavoura-Pecuária-Floresta**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011 b. 130p.
- BALDOTTO, Marihus Altoré; VIEIRA, Erli Maciel; DE OLIVEIRA SOUZA, Dálisson; BALDOTTO, Lílian Estrela Borges. Estoque e frações de carbono orgânico e fertilidade de solo sob floresta, agricultura e pecuária. **Revista Ceres**, [S. l.], v. 62, n. 3, p. 301–309, 2015. DOI: 10.1590/0034-737X201562030010.
- BONDE, T.A.; CHRISTENSEN, B.T.; CERRI, C.C. Dynamics of soil organic-matter as reflected by natural C-13 abundance in particle-size fractions of forested and cultivated oxisols. **Soil Biology & Biochemistry**, [S. l.], v. 24, p. 275-277, 1992. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(92\)90230-U](https://doi.org/10.1016/0038-0717(92)90230-U)
- BORTOLON, Elisandra Solange Oliveira; MIELNICZUK, João; TORNQUIST, Carlos Gustavo; LOPES, Fabíola; BERGAMASCHI, Homero. Validation of the Century model to estimate the impact of agriculture on soil organic carbon in Southern Brazil. **Geoderma**, [S. l.], v. 167–168, p. 156–166, 2011. DOI: 10.1016/j.geoderma.2011.08.008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.08.008>.
- BRANDANI, Carolina B.; ABBRUZZINI, Thalita F.; WILLIAMS, Stephen; EASTER, Mark; PELLEGRINO CERRI, Carlos E.; PAUSTIAN, Keith. Simulation of management and soil interactions impacting SOC dynamics in sugarcane using the CENTURY Model. **GCB Bioenergy**, [S. l.], v. 7, n. 4, p. 646–657, 2015. DOI: 10.1111/gcbb.12175.
- BUNGENSTAB, D.J., *et al.* **Sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta**: a produção sustentável. 2 ed. Brasília, DF : Embrapa, 2012. ISBN 9788570351104.
- BRASIL. **Ministério do Meio Ambiente**. O Bioma Cerrado. Brasília: [s. n.], 2020a. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/biomas/cerrado>. Acesso em: 18 maio 2020.
- BRASIL. **Agricultura de Baixo Carbono**. 2020b. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/plano-abc>. Acesso em: 18 maio 2020.
- BRAZ, Sérgio P.; URQUIAGA, Segundo; ALVES, Bruno J. R.; JANTALIA, Claudia P.; GUIMARÃES, Ana Paula; SANTOS, Camila A. Dos; SANTOS, Sashia C. Dos; PINHEIRO, Érika F. Machado; BODDEY, Robert M. Soil Carbon Stocks under Productive and Degraded Brachiaria Pastures in the Brazilian Cerrado. **Soil & Water Management & Conservation**, [S. l.], v. 77, p. 914–928, 2013. DOI: 10.2136/sssaj2012.0269.
- BUZHDIYGAN, Oksana Y. *et al.* Biodiversity increases multitrophic energy use efficiency , flow and storage in grasslands. **Nature, Ecology & Evolution**, [S. l.], v. 4, p. 393–405, 2020. DOI: 10.1038/s41559-020-1123-8.
- CAMPOS, L.P.; LEITE, L.F.C.; MACIEL, G.A.; BRASIL, E.L.; IWATA, B. de F. Estoques e frações de carbono orgânico em Latossolo Amarelo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, p. 304-312, 2013. DOI: 10.1590/S0100-204X2013000300009.
- CARDOSO, Evaldo Luis *et al.* Estoques de carbono e nitrogênio em solo sob florestas nativas e pastagens no bioma Pantanal. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília , v. 45, n. 9, p. 1028-1035, Sept. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000900013>.

CARVALHO, J.L.N.; CERRI, C.E.P.; FEIGL, B.J.; PICOLLO, M.C.; GODINHO, V.P.; CERRI, C.C. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. **Soil Tillage Research**, v.103, p. 342-349, 2009.

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

CERRI, CARLOS. EDUARDO P.; PAUSTIAN, KEITH; BERNOUX, MARTIAL; IA, REYNALDO L. VICTOR; MELILLO, JERRY M; CERRI, CARLOS C. Modelling changes in SOC from conversion amazon forest to pasture. **Global Change Biology**, [S. l.], v. 10, p. 815–832, 2004. DOI: 10.1111/j.1529-8817.2003.00759.x.

CERRI, C.E.P.; EASTER, M.; PAUSTIAN, K.; KILLIAN, K.; COLEMAN, K.; BERNOUX, M.; FALLOON, P.; POWLSON, D.S.; BATJES, N.; MILNE, E.; CERRI, C. C. et al. Simulating SOC changes in 11 land use change chronosequences from the Brazilian Amazon with RothC and Century models. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [S. l.], v. 122, p. 46–57, 2007. DOI: 10.1111/10.1016/j.agee.2007.01.007.

CERRI, Carlos Eduardo Pellegrino; CERRI, Carlos Clemente; MAIA, Stoécio Malta Ferreira; MAURÍCIO ROBERTO, Cherubin; FEIGL, Brigitte Josefine; LAL, Rattan. Reducing Amazon Deforestation through Agricultural Intensification in the Cerrado for Advancing Food Security and Mitigating Climate Change. **Sustainability**, [S. l.], v. 10, n. 989, p. 1–18, 2018. DOI: 10.3390/su10040989.

D'ANDREA, Alexandre Fonseca *et al.* Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 39, n. 2, p. 179-186, fev. 2004. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2004000200012>.

FRANCHINI, J.C., COSTA, J.M.D., DEBIASI, H., TORRES, E. **Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná**. Embrapa Soja, Londrina, 2011. pp. 52.

FRY, Brian. **Stable isotope ecology**. [s.l.]: [s.n.]. DOI: 10.1007-0-387-33745-8.

GOUVEIA, S. E. M.; PESSENDA, L. C. R.; ARAVENA, R.; BOULET, R.; SCHEEL-YBERT, R.; BENDASSOLI, J. A.; RIBEIRO, A. S.; FREITAS, H. A. Carbon isotopes in charcoal and soils in studies of paleovegetation and climate changes during the late Pleistocene and the Holocene in the southeast and centerwest regions of Brazil. **Global and Planetary Change**, [S. l.], v. 33, n. 1–2, p. 95–106, 2002. DOI: 10.1016/S0921-8181(02)00064-4.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Biomass e Sistema Costeiro-Marinho do Brasil**. 2019. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/biomass/>. Acesso em: 3 ago. 2020.

LAL, Rattan. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. **Global Change Biology**, [S. l.], v. 24, n. 8, p. 3285–3301, 2018. DOI: 10.1111/gcb.14054.

LAL, Rattan. Promoting “4 Per Thousand” and “Adapting African Agriculture” by south-south cooperation: Conservation agriculture and sustainable intensification. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 188, n. November 2017, p. 27–34, 2019. DOI: 10.1016/j.still.2017.12.015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.015>. Acesso em: 3 ago. 2020.

LAL, Rattan. Managing soils for negative feedback to climate change and positive impact on food and nutritional security. **Soil Science and Plant Nutrition**, [S. l.], v. 66, n. 1, p. 1–9, 2020. DOI: 10.1080/00380768.2020.1718548. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00380768.2020.1718548>.

LEAL, M.A.A.; DE-POLLI, H. Aplicação de Modelos ao Estudo da Matéria Orgânica. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O., eds. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre, Metrópole, 2008a. p.171-182.

LEAL, M.A.A.; DE-POLLI, H. Modelagem da Matéria Orgânica. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O., eds. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre, Metrópole, 2008b. p. 293-322.

LOSS, Arcângelo; RIBEIRO, Eduardo Castro; PEREIRA, Marcos Gervasio; COSTA, Elias Mendes. Atributos físicos e químicos do solo em sistemas de consórcio e sucessão de lavoura, pastagem e silvipastoril em Santa Teresa, ES. **Bioscience Journal**, [S. l.], v. 30, n. 5, p. 1347–1357, 2014.

JANSSEN, B. H. A simple method for calculating decomposition and accumulation of “young” soil organic matter. **Plant and Soil**, [S. l.], v. 76, p. 297–304, 1984. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-009-6101-2_26.

JENNY, H. **Factors of soil formation**. New York: McGraw-Hill, 1941. 281p.

MACEDO, M.C.M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.38, p.133-146, 2009. DOI: 10.1590/S1516-35982009001300015.

MARTINS, E.L.; CORINGA, J.E.S.; WEBER, O.L.S. Carbono orgânico nas frações granulométricas e substâncias húmicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico – LVAd sob diferentes agrossistemas. **Acta Amazonica**, v.39, p.655-660, 2009. DOI: 10.1590/S0044-59672009000300021.

METHERELL, A.K., L.A. HARDING, C.V. COLE; WJP. *et al.* **CENTURY Soil organic matter model environment. Tech. Doc. Agroecosystem version 4.0. Gt.** Plains Syst. Res. Unit Tech. Rep. No. 4. USDA-ARS, Fort Collins, Color. 1993.

MICHENER, Robert; LAJTHA, Kate. **Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science**. Second Edition. [s.l.: s.n.]. DOI: 10.1002/9780470691854.

MINASNY, Budiman *et al.* **Soil carbon 4 per mille. Geoderma**. Elsevier B.V., 2017. DOI: 10.1016/j.geoderma.2017.01.002.

OELBERMANN, M., Echarte, L., MARROQUIN, L., MORGAN, S., REGEHR, A., VACHON, K.E., WILTON, M. Estimating soil carbon dynamics in intercrop and sole crop agroecosystems using the century model. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, [S. l.], v.180, 241–251, 2017. DOI:10.1002/jpln.201600578.

OELBERMANN, Maren; VORONEY, R. P. An evaluation of the century model to predict soil organic carbon: Examples from Costa Rica and Canada. **Agroforestry Systems**, [S. l.], v. 82, n. 1, p. 37–50, 2011. DOI: 10.1007/s10457-010-9351-6.

OLIVEIRA, Janaína de Moura; MADARI, Beata Emoke; CARVALHO, Márcia Thaís de Melo; ASSIS, Paula Camylla Ramos; SILVEIRA, André Luiz Rodrigues; LIMA, Mateus L.; WRUCK, Flávio Jesus; MEDEIROS, João Carlos; MACHADO, Pedro Luiz Oliveira de Almeida. Integrated farming systems for improving soil carbon balance in the southern Amazon of Brazil. **Regional Environmental Change**, [S. l.], v. 18, n. 1, p. 105–116, 2017. DOI: 10.1007/s10113-017-1146-0.

PARTON, W.J.; SCHIMEL, D.S.; COLE, C.V.; OJIMA, D.S. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. **Soil Science of America Journal**, Madison, v.51, p.1173-1179, 1987.

PARTON, W.J.; STANFORD, R.L.; SANCHEZ, P.A.; STEWART, W.B. Modeling soil organic matter dynamics in tropical soils. In: COLEMAN, D.C. (eds.) **Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems**. Honolulu: NIFTAL Project, 1989. p.153-171.

PARTON, W. J.; STEWART, J. W. B.; COLE, C. V. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model. **Biogeochemistry**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 109–131, 1988. DOI: 10.1007/BF02180320.

PESSENDA, L. C. R.; GOMES, B. M.; ARAVENA, R.; RIBEIRO, A. S.; BOULET, R.; GOUVEIA, S. E. M. The carbon isotope record in soils along a forest-cerrado ecosystem transect: Implications for vegetation changes in the Rondonia state, southwestern Brazilian Amazon region. **Holocene**, [S. l.], v. 8, n. 5, p. 599–603, 1998. DOI: 10.1191/095968398673187182.

ROSA, R.; SANO, E.E.; ROSENDO, J.S. Estoque de carbono em solos sob pastagens cultivadas na bacia hidrográfica do Rio Paranaíba. **Sociedade e Natureza**, Uberlândia, v. 26, p. 2, p. 333-351, 2014.

SÁ, João Carlos de M.; CERRI, Carlos C.; DICK, Warren a; LAL, Rattan; VENSKE FILHO, Solismar P.; PICCOLO, Marisa C.; FEIGL, Brigitte E. Organic Matter Dynamics and Carbon Sequestration Rates for a Tillage Chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, [S. l.], v. 65, n. October, p. 1486–

1499, 2001. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.6551486x>.

SANT-ANNA, Selenobaldo A. C.; JANTALIA, Claudia P.; SÁ, Jerusa M.; VILELA, Lourival; MARCHÃO, Robélio L.; ALVES, Bruno J. R.; URQUIAGA, Segundo; BODDEY, Robert M. Changes in soil organic carbon during 22 years of pastures, cropping or integrated crop/livestock systems in the Brazilian Cerrado. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, [S. l.], v. 108, n. 1, p. 101–120, 2017. DOI: 10.1007/s10705-016-9812-z.

SANTOS, C. A.; REZENDE, C. P.; MACHADO PINHEIRO, E. F.; PEREIRA, J. M.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Changes in soil carbon stocks after land-use change from native vegetation to pastures in the Atlantic forest region of Brazil. **Geoderma**, [S. l.], v. 337, n. September 2018, p. 394–401, 2019. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.09.045. DOI: : <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.045>.

SANTOS, H.P.; FONTANELI, R.S.; SPERA, S.T.; DREON, G. Fertilidade e teor de matéria orgânica do solo em sistemas de produção com integração lavoura e pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.6, p.474-482, 2011. DOI: 10.5039/agraria.v6i3a1266.

SEVERO, Fabiane Figueiredo; AITA, Natália Tobin; MARQUES, Laila Garcia; SILVA, Leandro Souza Da. Isotopic abundance of ¹³C and contribution of eucalyptus biomass to soil organic matter conversion. **Ciência Rural**, [S. l.], v. 47, n. 4, p. 1–7, 2017. DOI: 10.1590/0103-8478cr20150900.

SILVA, E.F.; LOURENTE, E.P.R.; MARCHETTI, M.E.; MERCANTE, F.M.; FERREIRA, A.K.T.F.; FUJII, G.C. Frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica em solos sob integração lavoura-pecuária, **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.46, n.10, p.1321-1331, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000028>

SILVA, J. R. M.; ENSINAS, S. C.; BARBOSA, G. F.; REZENDE, J. V. O.; BARRETA, P. G. V.; ZUFFO, A. M. Total organic carbon and the humic fractions of the soil organic matter in silvopastoral system. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, [S. l.], v. 15, n. 2, p. 1–6, 2020. DOI: 10.5039/agraria.v15i2a6874.

SILVA-OLAYA, Adriana M.; CERRI, Carlos E. P.; WILLIAMS, Stephen; CERRI, Carlos C.; DAVIES, Christian A.; PAUSTIAN, Keith. Modelling SOC response to land use change and management practices in sugarcane cultivation in South-Central Brazil. **Plant and Soil**, [S. l.], v. 410, n. 1–2, p. 483–498, 2017. DOI: 10.1007/s11104-016-3030-y. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-016-3030-y>.

SILVA, Vinicius Evangelista; SILVA, Alexandre Christofaro; PEREIRA, Rosana Cristina; CAMARGO, Plínio Barbosa De; SILVA, Bárbara Pereira Christofaro; BARRAL, Uidemar Moraes; MENDONÇA FILHO, Carlos Victor. Composição lignocelulósica e isotópica da vegetação e da matéria orgânica do solo de uma turfeira tropical: I - composição florística, fitomassa e acúmulo de carbono. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 37, n. 1, p. 121–133, 2013. DOI: 10.1590/S0100-06832013000100013.

SISTI, Claudia P. J.; DOS SANTOS, Henrique P.; KOHHANN, Rainoldo; ALVES, Bruno J. R.; URQUIAGA, Segundo; BODDEY, Robert M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 76, n. 1, p. 39–58, 2004. DOI: 10.1016/j.still.2003.08.007.

SOUZA, E.D. de; COSTA, S.E.V.G. de A.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P.C. de F.; ANDRIGUETI, M.; CAIO, E. Estoque de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.1829-1836, 2009.

SPERA, S.T.; SANTOS, H.P. dos; FONTANELI, R.S.; TOMM, G.O. Atributos físicos de um Hapludox em função de sistemas de produção integração lavoura-pecuária (ILP), sob plantio direto. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.32, p.37-44, 2010. DOI: 10.4025/actasciagron.v32i1.926.

TAIZ, Lincoln; ZEIGER, Eduardo. **Plant Physiology's Best Paper award 2002**. [s.l: s.n.]. v. 1 DOI: 10.1104/pp.900074.

TONUCCI, R. G.; NAIR, P. K. R.; NAIR, V. D.; GARCIA, R.; BERNARDINO, F. S. Soil carbon storage in silvopasture and related land use systems in the Brazilian Cerrado. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 40, p. 833-841, 2011.

TONUCCI, Rafael G.; NAIR, Vimala D.; RAMACHANDRAN NAIR, P. K.; GARCIA, Rasm. Grass vs. tree origin of soil organic carbon under different land-use systems in the Brazilian Cerrado. **Plant and Soil**, [S. l.], v. 419, n. 1–2, p. 281–292, 2017. DOI: 10.1007/s11104-017-3347-1.

TORNQUIST, C.G. **Simulação da dinâmica do carbono orgânico do solo em escala regional: aplicação do modelo Century e sistemas de informações geográficas**. 2007. 156f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

TORNQUIST, Carlos Gustavo; MIELNICZUK, João; CERRI, Carlos Eduardo Pellegrino. Modeling soil organic carbon dynamics in Oxisols of Ibirubá (Brazil) with the Century Model. **Soil and Tillage Research**, [S. l.], v. 105, n. 1, p. 33–43, 2009. DOI: 10.1016/j.still.2009.05.005.

VAN VEEN, J. A.; PAUL, E. A. ORGANIC CARBON DYNAMICS IN GRASSI-AND SOILS. I. BACKGROUND INFORMATION AND COMPUTER SIMULATION. **Canadian Journal of Soil Science**, [S. l.], v. 61, n. 2, p. 185–201, 1981. DOI: <https://doi.org/10.4141/cjss81-024>.

WHISLER, F; ACOCK, B.; BAKER, D.; FYE, R.; HODGES, H.; LAMBERT, J.; LEMMON, H.; MCKINION, J.; REDDY, VANGIMALLA. Crop Simulation Models in Agronomic Systems. **Advances in Agronomy**, [S. l.], v.40, p.141-208, 1986. DOI: [doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60282-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60282-5).

YADAV, Ashiwani; PAL, Nitai; PATRA, Jagannath; YADAV, Monika. Strategic planning and challenges to the deployment of renewable energy technologies in the world scenario: its impact on global sustainable development. **Environment, Development and Sustainability**, [S. l.], v. 22, n. 1, p. 297–315, 2018. DOI: 10.1007/s10668-018-0202-3. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0202-3>.

YANG, Yi; TILMAN, David; FUREY, George; LEHMAN, Clarence. Soil carbon sequestration accelerated by restoration of grassland biodiversity. **Nature Communications**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 1–7, 2019. DOI: 10.1038/s41467-019-08636-w. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-019-08636-w>.

ZANI, Caio F.; BARNEZE, Arlete S.; ROBERTSON, Andy D.; KEITH, Aidan M.; CERRI, Carlos E. P.; MCNAMARA, Niall P.; CERRI, Carlos C. Vinasse application and cessation of burning in sugarcane management can have positive impact on soil carbon stocks. **Peer Journal**, [S. l.], p. 1–30, 2018. DOI: 10.7717/peerj.5398.

4 ARTIGOS

4.1 Artigo 1 - Estoques de carbono e nitrogênio e frações da matéria orgânica do solo em uma cronosequência de uso do solo em área de transição Cerrado-Floresta Estacional Semidecidual

Este artigo foi elaborado conforme as normas da Revista Geoderma Regional.

Resumo

Ao introduzir sistemas que integram vários componentes agrícolas em uma mesma área, como os sistemas agrossilvipastoris, uma das questões ambientais em foco é a capacidade de aumento dos estoques de carbono no solo e potencial diminuição da emissão de gases de efeito estufa (GEE) nesses modelos de produção. Como há poucos estudos sobre a dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS), em sistemas agrossilvipastoris, o objetivo desta pesquisa foi avaliar os estoques de carbono e nitrogênio e as frações da matéria orgânica do solo em uma cronosequência de uso da terra composta por vegetação nativa (VN), pastagem degradada (PAD) e dois sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), em área de transição Cerrado-Floresta Estacional Semidecidual no Estado de Minas Gerais, Brasil. Amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm e 30-40 cm de profundidade, para determinar a densidade do solo, os teores e estoques de carbono (C) e nitrogênio (N), a abundância natural de ^{13}C e o fracionamento químico da matéria orgânica do solo. Os sistemas de ILPF apresentaram aumentos nos estoques de C do solo, variando entre $1,44 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ a $2,17 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e estoques de N entre $0,02 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ a $0,35 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Aumentos dos teores de C ($12,47 \text{ g kg}^{-1}$ a $18,61 \text{ g kg}^{-1}$) e teores de N ($1,63 \text{ g kg}^{-1}$ a $1,88 \text{ g kg}^{-1}$), na camada de 0-20 cm de profundidade das frações húmicas do solo, também, foram observados com a introdução dos sistemas integrados de produção. Observou-se o enriquecimento isotópico de ^{13}C , nas camadas superficiais do solo, promovido pelo cultivo de gramíneas (espécie C_4), indicando que esses sistemas são potencialmente viáveis em acumular carbono no solo e reduzir os impactos ambientais em regiões de transição Cerrado-Floresta Estacional Semidecidual.

Palavras-chave: Semiárido mineiro. Fracionamento isotópico. Matéria orgânica do solo. Pastagem degradada.

Abstract

When introducing systems that integrate several agricultural components in the same area, such as agrosilvopastoral systems, one of the environmental issues in focus is the capacity to increase carbon stocks in the soil and the potential reduction in the emission of greenhouse gases (GHG) in these models of production. As there are few studies on the dynamics of soil organic matter (SOM) in agrosilvopastoral systems, the main of this research was to evaluate the stocks of carbon and nitrogen, and the fractions of soil organic matter in a chronosequence of land use composed by vegetation native (NV), degraded pasture

(DPA) and two crop-livestock-forest (ICLF) integration systems in a transitional Semideciduous Seasonal Cerrado-Forest area in the State of Minas Gerais, Brazil. Soil samples were collected in the 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm and 30-40 cm depth layers to determine soil density, content and stocks of carbon (C) and nitrogen (N), the natural abundance of ^{13}C , and the chemical fractionation of soil organic matter. The ICLF systems presented increases in soil C stocks ranging from $1.44 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ to $2.17 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ and N stocks between $0.02 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ at $0.35 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$. Increases of C contents (12.47 g kg^{-1} to 18.61 g kg^{-1}) and N contents (1.63 g kg^{-1} to 1.88 g kg^{-1}), in the 0-20 layer cm deep, of the humic fractions of the soil were also observed with the introduction of integrated production systems. It was observed isotopic enrichment of ^{13}C in the superficial layers of the soil promoted by the cultivation of grasses (species C_4), indicating that these systems are potentially viable in accumulating carbon in the soil and reducing the environmental impacts in transition regions Semideciduous Seasonal Cerrado-Forest.

Keyword: Semi-arid of Minas Gerais, Isotopic fractionation, Organic soil matter, Degraded pasture.

4.1.1 Introdução

O crescimento da população mundial provoca pressão por maior produção de alimentos, estimulando as mudanças no uso da terra e, conseqüentemente, a diminuição de áreas sob vegetação nativa (Lal, 2019). A conversão de ecossistemas naturais em sistemas agrícolas reduz o carbono orgânico do solo (COS), ocasionando sua perda para a atmosfera e intensificação do efeito estufa. A introdução de árvores em agroecossistemas apresentam grande importância no sequestro de carbono da atmosfera e acúmulo de carbono no solo (Lal, 2018). As mudanças nos tipos de cultivos vegetais propiciam renovação na MOS, em especial, após a adição de gramíneas. Para avaliar a contribuição das espécies vegetais cultivadas, para a formação da MOS, é importante a caracterização da abundância natural de ^{13}C .

Os sistemas agrossilvipastoris podem integrar lavoura, pecuária e floresta em uma mesma área, desde que haja interação e sustentabilidade entre esses componentes. Esse modelo de produção tem o potencial de sequestrar CO_2 atmosférico e acumular mais COS em profundidade que sistemas convencionais agrícolas (Lorenz e Lal, 2014). Além disso, sistemas agrícolas com maior diversidade de espécies florísticas estimulam o crescimento de uma comunidade decompositora heterotrófica mais abundante e diversificada com capacidade para aumentar o COS e contribuir com a mitigação das mudanças climáticas (Buzhdygan et al., 2020).

Algumas pesquisas sugeriram que a mudança de uso do solo de sistemas convencionais, em sistemas com introdução de árvores consorciadas com pastagens, aumentaram o COS do solo superficial e em profundidade (Don et al., 2011; Shi et al., 2013; Tonucci et al., 2017), assim como o nitrogênio total, contribuindo para reduzir a emissão de CO_2 para a atmosfera (Cubbage et al., 2012).

Para reduzir a emissão de gases do efeito estufa (GEE), a mudança de uso de solos, em estágios de degradação para sistemas agrícolas sustentáveis, assume grande relevância, pois aumenta o potencial de captura, armazenamento e sequestro de carbono atmosférico (Minasny et al., 2017; Yang et al., 2019). No Brasil, a região de transição do Cerrado para a Floresta Estacional Semidecidual tem como predominância a adoção de monocultivos e pouco investimento na manutenção da qualidade do solo ao longo do tempo. Por ser uma região com presença de seca prolongada por mais de seis meses,

é de grande benefício a implementação de práticas agrícolas sustentáveis que diversifiquem a produção, em uma mesma área, diminuindo a pressão por áreas de vegetação nativa.

Desta forma, torna-se importante implementar estratégias agrícolas para um uso eficiente do solo e da água que atenda a demanda de produção de alimentos e, ao mesmo tempo, aumente a capacidade de armazenamento de carbono e reduza a emissão de GEE para a atmosfera (Searchinger et al., 2018).

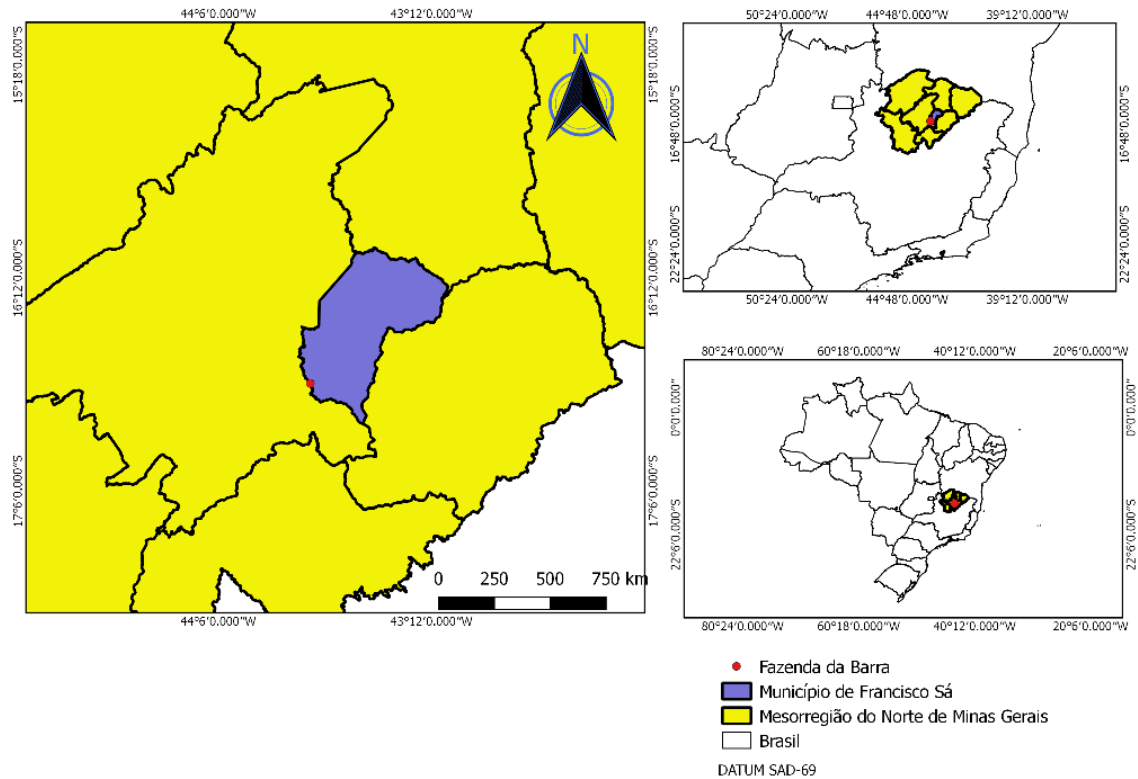
Assim, há poucos estudos sobre a dinâmica do COS, em sistemas agrossilvipastoris sobre as contribuições isotópicas (^{13}C) das espécies que o compõem, e compreensão das transformações, via frações humificadas da matéria orgânica do solo (MOS). A quantificação dos conteúdos e estoques de carbono orgânico do solo (COS) e nitrogênio (NT), constituintes importantes da MOS, permitem inferir o impacto da adoção de diferentes sistemas de uso e manejo da terra. Além disso, o sistema ILPF pode favorecer a estocagem de C e N nas frações humificadas da MOS. E a introdução de gramíneas no sistema agrícola pode aumentar a estocagem de C, nas frações da MOS, além de substituir o C da matéria orgânica nativa.

O objetivo desta pesquisa foi, portanto, avaliar os estoques de carbono e nitrogênio, frações humificadas da matéria orgânica do solo e abundância natural de ^{13}C , em uma cronosequência de uso da terra composta por vegetação nativa (VN), pastagem degradada (PAD) e dois sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), em área de transição Cerrado-Floresta Estacional Semidecidual no Estado de Minas Gerais.

4.1.2 Material e Métodos

A área experimental foi implantada na Fazenda da Barra ($16^{\circ}38'44,02''$ S e $43^{\circ}42'43,77''$ O), localizada no município de Francisco Sá, Norte de Minas Gerais, Brasil e encontra-se em área de transição entre Cerrado e a Floresta Estacional Semidecidual (FIGURA 2).

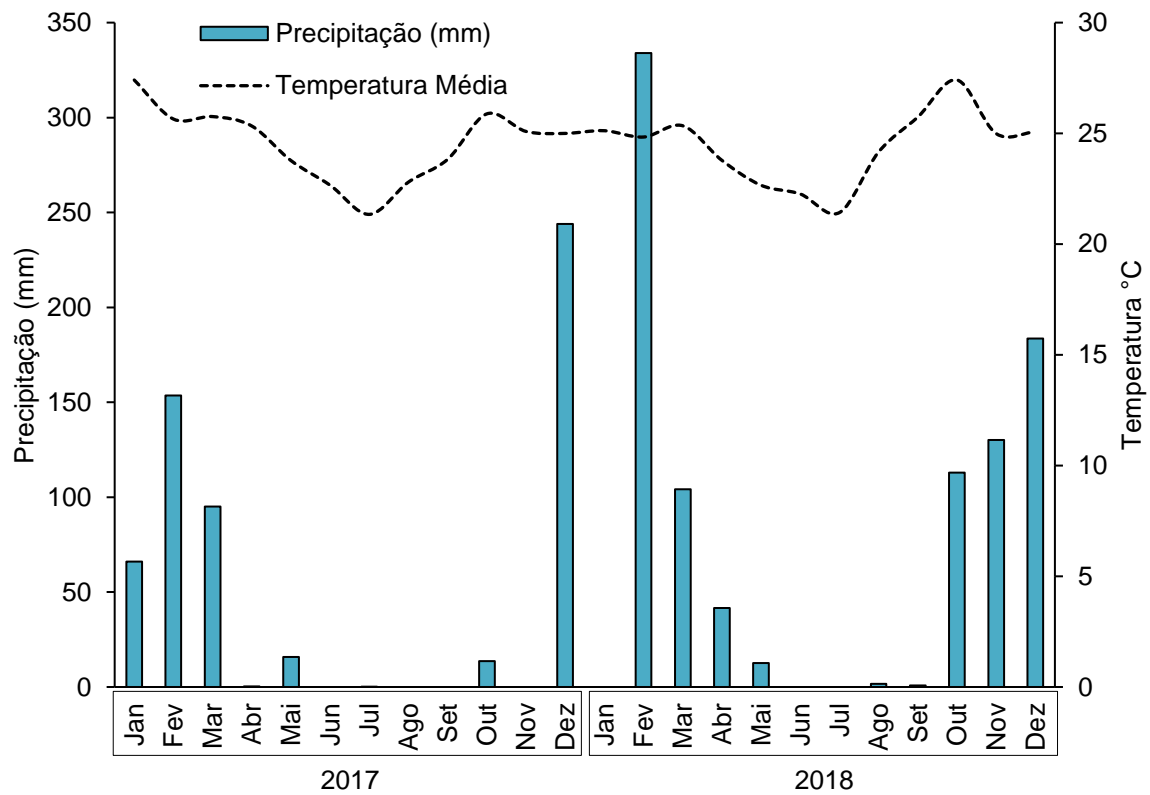
Figura 2 - Localização da área experimental em Francisco Sá-MG, Brasil



Fonte: ALMEIDA, 2018.

A altitude média da área é de 590 metros, e o índice pluviométrico anual varia entre 1.000 e 1.200 mm. O clima, segundo classificação de Köppen, é o Aw, ou seja, clima Tropical de Savana com o regime de chuvas caracterizado por duas estações bem definidas, com temperatura média oscilando entre 20 e 28°C (FIGURA 3).

Figura 3 - Precipitação e temperatura mensais para os anos de 2017 e 2018 da região de Montes Claros, MG, Brasil, próxima ao experimento



O solo da área em estudo é classificado como Cambissolo Háplico eutrófico, textura média (TABELA 1).

Tabela 1 - Caracterização do solo (0-20 cm de profundidade) em uma cronossequência em área de transição do Cerrado no Brasil

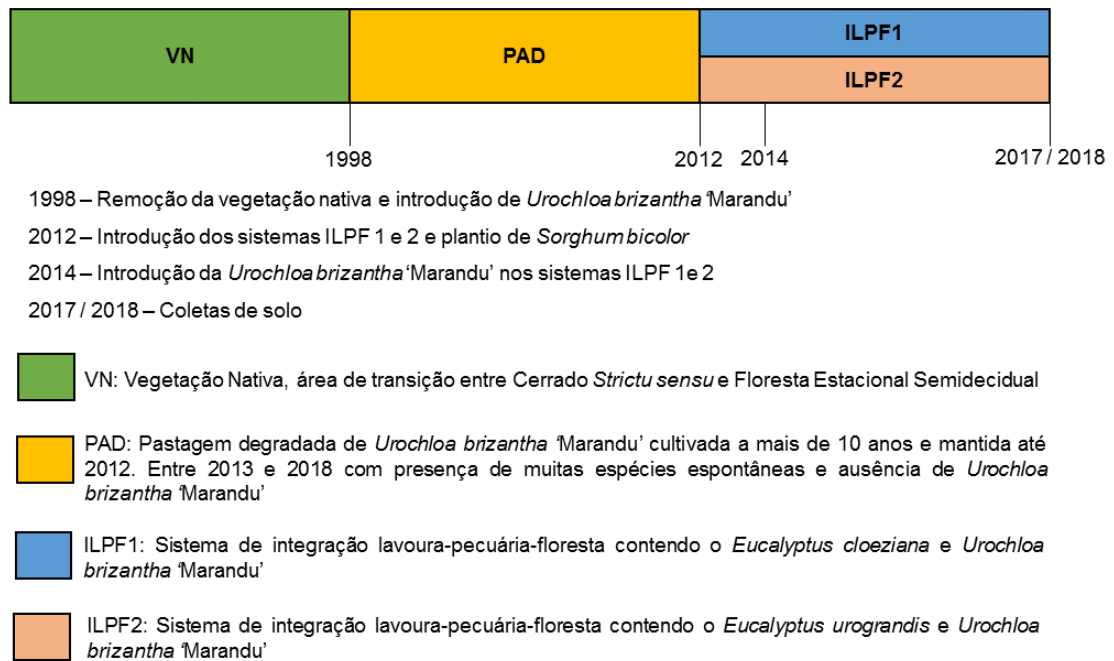
Uso do Solo ¹	Argila	Silte	Areia	Densidade solo	pH	Ca	Mg	K	Al	MO
	-----	(g kg ⁻¹)	-----	-- (g cm ⁻³) --	-----	(cmolc dm ⁻³)	-----			dag kg ⁻¹
VN	280	300	420	1,29	5,4	5,2	2,7	0,7	0,0	4,1
ILPF1	210	270	520	1,37	5,4	4,2	1,4	0,4	0,1	3,2
ILPF2	220	250	530	1,35	5,3	3,8	2,0	0,4	0,1	3,2
PAD	240	240	520	1,38	5,9	2,8	1,6	0,5	0,0	2,9

Nota: ¹VN = Vegetação Nativa; ILPF1 = Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta composta por *Eucalyptus cloeziana* e *Urochloa brizantha* 'Marandu'; ILPF2 = Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta composta por *Eucalyptus urograndis* e *Urochloa brizantha* 'Marandu'; PAD = Pastagem Degradada. Caracterização química realizada de acordo com a metodologia proposta por Embrapa (2017). pH em água; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; K: Potássio; Al: Alumínio trocável. Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Os sistemas de ILPF foram implantados, em outubro de 2012, em que se fez o plantio dos dois materiais genéticos de eucalipto (*Eucalyptus urograndis* e *Eucalyptus cloeziana*) e cultivo de sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor*) nas entrelinhas. Conforme Barbosa (2014), a densidade básica de madeira dos *Eucalyptus urograndis* e *Eucalyptus cloeziana* são 0,52 g cm³ e 0,67 g cm³, respectivamente. Esses genótipos foram escolhidos, em virtude do seu rápido crescimento, da adaptação a períodos secos e potencial de produção de madeira de qualidade, para diversas finalidades, como serraria, construção civil, energia, postes e mourões (Barbosa, 2014). No início do ano de 2014, o sorgo forrageiro foi plantado juntamente com a pastagem, *Urochloa brizantha* cv. Marandu e, após o seu cultivo, a área foi conduzida como sistema silvipastoril (eucalipto e pastagem). As informações sobre recomendação de adubação de plantio e cobertura das espécies utilizadas, nas unidades experimentais, estão disponíveis nos estudos de Barbosa (2014) e Almeida (2018).

A Figura 4 mostra a cronossequência da área experimental com os seguintes tratamentos: vegetação nativa (VN), pastagem degradada (PAD) e dois sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF 1 e ILPF2).

Figura 4 - Cronossequência de uso da terra em área de transição do Cerrado no Brasil



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

4.1.2.1 Amostragem do solo

Os sistemas ILPF1 e ILPF2 foram delimitados (2x3 m) x 14 metros entre renques duplos na orientação Leste-Oeste. As mudas de eucaliptos foram plantadas em sulcos com diâmetro e profundidade de 60 a 80 cm, respectivamente. As coletas foram realizadas, em 2017 e 2018, nos meses de janeiro e março, respectivamente (FIGURA 2). Em cada sistema avaliado foram abertas quatro trincheiras 1x1x0.5 m de diâmetro, e as amostras foram coletadas nas camadas 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40 cm de profundidade. Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, transportadas ao laboratório e armazenadas em geladeira a 4°C para posteriores análises.

No laboratório, as amostras foram passadas por peneiras de 2 mm, sendo retirados os resíduos de plantas e raízes manualmente. A densidade aparente do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico (anéis de aço inoxidável \pm 5 cm de diâmetro) para todas as camadas de profundidade avaliadas (Embrapa, 2017).

4.1.2.2 Determinação dos teores e estoques de carbono e nitrogênio do solo e abundância de ^{13}C

As amostras de solo foram previamente secas ao ar, homogeneizadas, moídas e passadas em peneiras de 0,150 mm e, posteriormente, analisadas por combustão seca, em um analisador elementar unido a um espectrômetro de massas Carlo Erba® Delta Plus, no Centro de Energia Nuclear na Agricultura –CENA em Piracicaba – SP, Brasil, para a medição do C e N total e da relação $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. A abundância

natural de ^{13}C está relacionada à vegetação predominante. Plantas C_3 discriminam mais o $^{13}\text{CO}_2$ e plantas C_4 discriminam menos o $^{13}\text{CO}_2$. Nas espécies C_3 , o fracionamento do carbono ocorre nos dois passos do processo fotossintético: difusão/ dissolução e carboxilação. No segundo passo desse processo, a carboxilação pela enzima ribulose-1,5 bifosfato carboxilase (Rubisco) possui grande afinidade pelo $^{12}\text{CO}_2$ e pouca afinidade pelo $^{13}\text{CO}_2$. Já as plantas C_4 , usam a via fotossintética Hatch-Slack em que a enzima de carboxilação fosfoenolpiruvato (PEP) carboxilase reduz o CO_2 a ácido aspártico ou málico discriminando menos o $^{13}\text{CO}_2$. A composição isotópica foi denotada usando a notação $\delta^{13}\text{C}$, expressa como parte por mil (‰) referenciada ao padrão Pee Dee Belemnite (O'leary, 1988).

Os estoques de C e N dos sistemas ILPF1, ILPF2 e PAD foram calculados, para a mesma massa de solo que a VN, expressas em Mg ha^{-1} , de acordo com metodologia proposta por Ellert e Bettany, 1996; Moraes *et al.* 1996. Desses estoques totais de C, a contribuição das plantas C_3 e C_4 foi calculada com base na equação proposta por Bernoux *et al.* (1998). Com os valores obtidos para os teores de C e N, calculou-se a relação C:N do solo.

A taxa (acúmulo ou perda) anual de carbono e nitrogênio no solo foi estimada com base nas alterações dos estoques de C e N ao longo do tempo, de acordo com a Equação 1:

$$TA = \frac{Ecf - Eci}{t}$$

Sendo:

TA = Taxa de (acúmulo ou perda) anual de C no solo ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$);

Ecf = Estoque de C ou N em um determinado tempo final;

Eci = Estoque de C ou N em um determinado tempo inicial;

t = tempo decorrido em anos.

Com o objetivo de acompanhar o comportamento das variáveis analisadas nas áreas de estudo, os resultados observados foram comparados com o estudo realizado por Almeida *et al.* (2020).

4.1.2.3 Determinação do C e N das frações humificadas da Matéria Orgânica do Solo (MOS)

A extração, o fracionamento das substâncias húmicas (SH) e a determinação dos teores de C e N foram realizados, conforme método da Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas (IHSS), cujo protocolo metodológico encontra-se descrito em Swift (1996). Para a extração e fracionamento, foram pesados 0,5 g de TFSA em tubo de falcon de 50 mL e adicionada uma solução extratora de NaOH a $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ que solubilizou as frações ácido fúlvico (FAF) e ácido húmico (HAF).

A fração humina (HUM) precipitou, após três ciclos de centrifugação e extração, o resíduo sólido foi armazenado em estufa de secagem a 45°C por 48 h. A separação das FAF e FAH ocorreu em meio sulfúrico a (20%) com pH igual a $2,0 \pm 0,1$.

A determinação dos teores de C, nos extratos das frações HUM, FAF e FAH, foi realizada pelo método de oxidação por via úmida (Yeomans e Bremner, 1988), e o teor de N, das mesmas frações, foi obtido pela metodologia adaptada de Bremner e Mulvaney (1982) e Tedesco *et al.*, (1995).

Obtidos os teores de C e N das frações húmicas, foram calculadas as relações entre as frações alcalino solúveis (FAH/FAF) e entre o extrato alcalino (FAH+FAF) e fração húmica (FAH +FAF/HUM), além do Índice de Humificação, para C ($IH=AH/COT \times 100$) e para N ($IH=AH/NT \times 100$).

4.1.2.4 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos aos testes de Lilliefors e Cochran e Bartlett para verificar as distribuições normais e homogeneidade de variâncias, respectivamente. Como as hipóteses de normalidade e homogeneidade foram validadas, optou-se pelo uso do teste t para todas as variáveis avaliadas. Assim, foi aplicado o teste t a 5% de probabilidade, utilizando-se o software R (R Core Team, 2018).

4.1.3 Resultados

Para os teores de carbono e nitrogênio, foram verificadas diferenças estatísticas pelo teste t na camada de 0-5 cm de profundidade entre as áreas estudadas. Para a relação C/N, foi observada diferença estatística nas camadas de 10-20 cm e 20-30 cm de profundidade (TABELA 2).

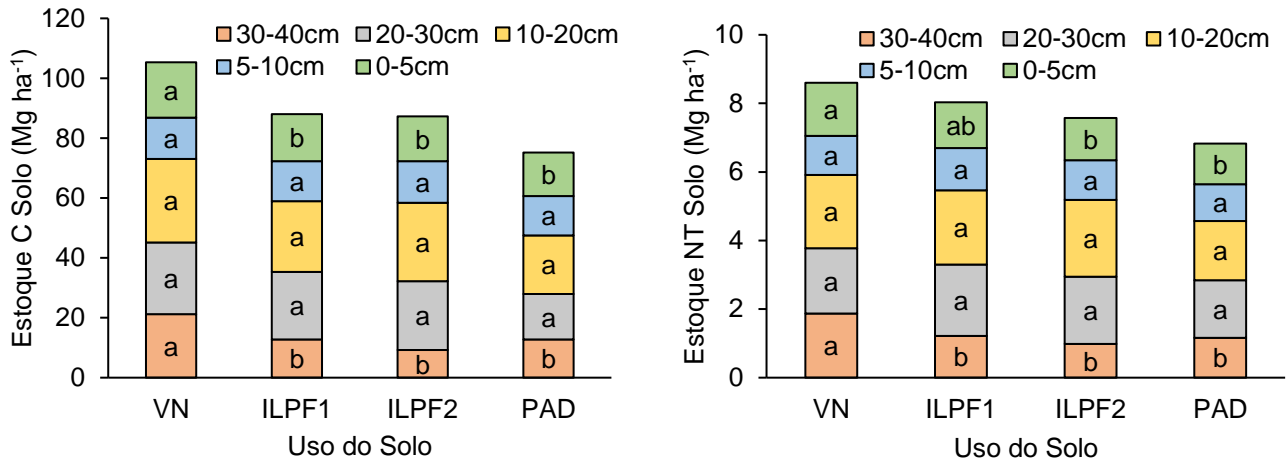
Tabela 2 - Conteúdo de Carbono Orgânico Total (COT) e Nitrogênio Total (NT) e relação carbono/nitrogênio (C/N) entre diferentes usos do solo em área de transição do Cerrado no Brasil

Uso do solo ¹	Profundidade do solo (cm)				
	0-5	5-10	10-20	20-30	30-40
	COT (g kg ⁻¹)				
VN	31,83 a	20,14 a	19,84 a	14,56 a	12,12 a
ILPF1	21,65 b	17,81 a	16,23 a	14,66 a	10,69 a
ILPF2	21,51 b	18,52 a	16,18 a	14,28 a	9,28 a
PAD	21,02 b	17,22 a	12,94 a	12,93 a	10,39 a
	NT (g kg ⁻¹)				
VN	2,55 a	1,66 a	1,52 a	1,20 a	1,09 a
ILPF1	1,84 b	1,64 a	1,48 a	1,35 a	1,03 a
ILPF2	1,78 b	1,54 a	1,39 a	1,22 a	0,93 a
PAD	1,70 b	1,40 a	1,14 a	1,12 a	0,94 a
	C:N				
VN	12,44 a	12,12 a	12,85 a	12,07 a	11,12 a
ILPF1	11,78 a	10,83 a	10,92 b	10,73 b	10,39 a
ILPF2	12,09 a	12,03 a	11,69 b	11,65 a	9,97 a
PAD	12,30 a	12,27 a	11,33 b	11,42 ab	10,99 a

Nota: ¹VN = Vegetação Nativa; ILPF1 = Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta composta por *Eucalyptus cloeziana* e *Urochloa brizantha* 'Marandu'; ILPF2 = Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta composta por *Eucalyptus urograndis* e *Urochloa brizantha* 'Marandu'; PAD = Pastagem Degradada. Para cada profundidade de solo avaliada, as mesmas letras entre os tratamentos não diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade. Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Quanto aos estoques de C e N, foram verificadas diferenças estatísticas entre os sistemas avaliados, nas camadas de 0-5 cm e 30-40 cm de profundidade, observando-se diferença apenas para o estoque de N na camada de 0-5 cm de profundidade (FIGURA 5).

Figura 5 - Estoques de carbono do solo (C) e nitrogênio (N) sob diferentes usos da terra na área de transição do Cerrado no Brasil



Nota: 1VN = Vegetação Nativa; ILPF1 = Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta composta por *Eucalyptus cloeziana* e *Urochloa brizantha* 'Marandu'; ILPF2 = Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta composta por *Eucalyptus urograndis* e *Urochloa brizantha* 'Marandu'; PAD = Pastagem Degradada. Para cada profundidade de solo avaliada, as mesmas letras entre os tratamentos não diferem pelo teste t a 5% de probabilidade. Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Porém, comparando os resultados com aqueles encontrados por Almeida *et al.* (2020), no ano de 2016, observaram-se significativas taxas de acúmulo de C, nos sistemas avaliados, com acúmulo anual de 1,44 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para o ILPF1, 2,17 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para o ILPF2 e 2,8 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para o PAD (TABELA 3).

Tabela 3 - Estoques de carbono e nitrogênio no solo corrigidos em 2016 e 2018 e taxa de acúmulo (TA) de carbono e nitrogênio a 0-40 cm de profundidade (n = 4), sob diferentes usos da terra em área de transição do Cerrado no Brasil

Uso do Solo ¹	2016 (Almeida <i>et al.</i> , 2020)	2018	TA (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)
	Estoque C Solo (Mg ha ⁻¹)*		
VN	104,82aA	105,35 aA	0,26
ILPF1	85,09 bA	87,97 bA	1,44
ILPF2	82,91 bcA	87,25 bA	2,17
PAD	69,60 cA	75,21 cA	2,80
	Estoque N Solo (Mg ha ⁻¹)*		TA (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)
VN	8,08 aA	8,53 aA	0,23
ILPF1	7,33 aA	8,03 aA	0,35
ILPF2	7,55 aA	7,58 abA	0,02
PAD	5,70 bA	6,82 bA	0,56

Nota: *Estoques corrigidos com base na massa equivalente da vegetação nativa. ¹VN = Vegetação Nativa; ILPF1 = Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta composta por *Eucalyptus cloeziana* e *Urochloa brizantha* 'Marandu'; ILPF2 = Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta composta por *Eucalyptus urograndis* e *Urochloa brizantha* 'Marandu'; PAD = Pastagem Degradada. Letras minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade. Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

A mudança de uso do solo de uma pastagem degradada em ILPF aumentou a proporção de C proveniente das espécies C₃ e C₄ introduzidas (TABELA 4).

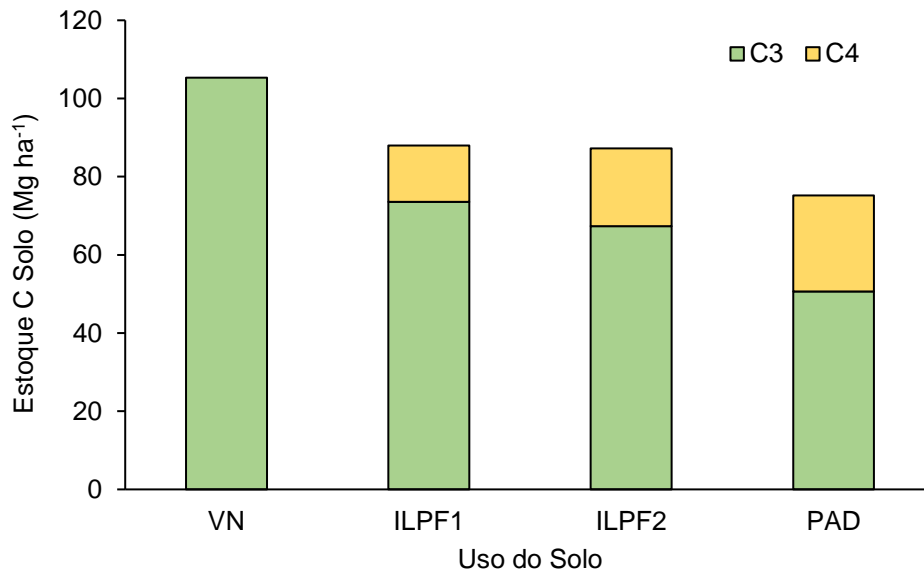
Tabela 4 - Contribuição isotópica de C₃ e C₄ (Mg ha⁻¹ e %) no estoque de carbono do solo corrigido sob diferentes usos do solo em área de transição do Cerrado no Brasil

Uso do Solo ¹	Estoque C Mg ha ⁻¹	$\delta^{13}\text{C}$ ‰	Contribuição		Contribuição		
			C ₃ ----Mg ha ⁻¹ ----	C ₄	C ₃ -----%-----	C ₄	
ILPF1	0 – 5 cm	15,67	-21,66	10,13	5,54	64,64	35,36
	5 – 10 cm	13,31	-22,40	10,01	3,33	75,22	24,78
	10 – 20 cm	23,65	-23,65	20,55	3,10	86,89	13,11
	20 – 30 cm	22,60	-24,00	20,14	2,46	89,11	10,89
	30 – 40 cm	12,74	-24,24	12,70	0,04	99,72	0,28
ILPF2	0 – 5 cm	14,97	-20,21	7,72	7,25	51,55	48,45
	5 – 10 cm	13,85	-21,84	9,68	4,17	69,86	30,14
	10 – 20 cm	26,16	-23,41	22,13	4,03	84,60	15,40
	20 – 30 cm	23,01	-23,37	19,13	3,87	83,17	16,83
	30 – 40 cm	9,26	-23,63	8,65	0,61	93,40	6,60
PAD	0 – 5 cm	14,53	-19,58	6,66	7,87	45,85	54,15
	5 – 10 cm	13,20	-21,14	8,34	4,86	63,20	36,80
	10 – 20 cm	19,58	-22,38	14,65	4,93	74,82	25,18
	20 – 30 cm	15,16	-21,96	10,60	4,56	69,94	30,06
	30 – 40 cm	12,75	-22,44	10,37	2,38	81,31	18,69

Nota: ¹ILPF1 = Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta composta por *Eucalyptus cloeziana* e *Urochloa brizantha* 'Marandu'; ILPF2 = Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta composta por *Eucalyptus urograndis* e *Urochloa brizantha* 'Marandu'; PAD = Pastagem Degradada. Elaborado pela autora, 2020.

A origem do carbono do solo dos sistemas avaliados mostrou que a maior proporção do carbono desses sistemas é oriunda de espécies do ciclo fotossintético C₃, porém os sistemas introduzidos contribuíram com um enriquecimento de ¹³C pela introdução de plantas de ciclo fotossintético C₄ (FIGURA 6).

Figura 6 - Fracionamento isotópico do carbono (C) de espécies C₃ e C₄ sob diferentes usos do solo em área de transição do Cerrado no Brasil



Nota: ¹VN = Vegetação Nativa; ILPF1 = Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta composta por *Eucalyptus cloeziana* e *Urochloa brizantha* 'Marandu'; ILPF2 = Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta composta por *Eucalyptus urograndis* e *Urochloa brizantha* 'Marandu'; PAD = Pastagem Degradada. Fonte: Elaborada pela autora, 2020.

Os valores mais negativos de $\delta^{13}\text{C}$ com o aumento da profundidade indica maior proporção de C remanescente da floresta e introduzido pelas espécies florestais (eucaliptos) presentes nos sistemas ILPF 1 e 2 que pelas culturas anuais de ciclo fotossintético C₄ (sorgo e capim-marandu), nas quais houve maior contribuição na camada superficial do solo. O sistema PAD apresentou maior enriquecimento de ¹³C, na camada superficial do solo, visto que a espécie forrageira capim-marandu permaneceu por mais tempo no sistema até ser substituída por espécies espontâneas (TABELA 4).

Além disso, o sistema ILPF2, que contém o *Eucalyptus urograndis*, apresentou maior contribuição das espécies C₄ (19,93 Mg ha⁻¹), para o C da MOS, nas camadas superficiais em comparação ao ILPF1 (14,47 Mg ha⁻¹), que apresenta o componente arbóreo *Eucalyptus cloeziana*, na camada de 0-40 cm de profundidade (TABELA 4). Isso pode indicar que a espécie forrageira (capim marandu) produziu mais resíduos vegetais no sistema ILPF2. Como também, em ambos os sistemas, ILPF 1 e 2, a contribuição do *Eucalyptus* ocorreu nas camadas mais profundas do solo de 10-20 cm e 20-30 cm de profundidade (TABELA 4 e FIGURA 6).

Quanto ao fracionamento químico da matéria orgânica do solo, a fração ácido húmico foi maior que a fração ácido fúlvico em torno de 12% a 23% em todos os sistemas. Como esperado, a fração humina foi maior que as outras duas frações cerca de 21% a 35% em todos os usos do solo (TABELA 5).

Tabela 5 - Conteúdo de carbono orgânico (CO) e nitrogênio (N) nas frações ácido fúlvico (FAF), ácido húmico (FAH) humina (HUM), relação FAH/FAF, relação (FAH+FAF)/HUM e índice de humificação (C-IH e N-IH) da matéria orgânica do solo (MOS) entre diferentes usos do solo em área de transição do Cerrado no Brasil

Uso do solo ¹	Profundidade do Solo (cm)								
	0-5	5-10	10-20	0-5	5-10	10-20	0-5	5-10	10-20
	CO-FAF (g kg ⁻¹)			N-FAF (g kg ⁻¹)			C:N FAF		
VN	2,98 a	1,98 a	1,52 a	0,37 a	0,29 a	0,21 b	8,34 a	6,85 a	7,29 a
ILPF1	1,80 b	1,55 a	1,48 a	0,29 a	0,40 a	0,24 ab	6,18 a	4,22 a	6,15 a
ILPF2	1,98 b	2,01 a	1,89 a	0,31 a	0,28 a	0,29 a	6,54 a	7,43 a	7,11 a
PAD	2,05 b	1,80 a	1,36 a	0,29 a	0,26 a	0,23 b	7,05 a	7,04 a	6,01 a
	CO-FAH (g kg ⁻¹)			N-FAH (g kg ⁻¹)			C:N FAH		
VN	6,55 a	6,60 a	7,11 a	1,00 a	0,91 a	0,62 a	6,57 b	7,33 b	12,39 a
ILPF1	5,90 a	6,09 a	6,62 a	0,57 bc	0,53 b	0,53 a	10,40 b	11,36 a	13,06 a
ILPF2	4,82 a	3,80 b	3,85 b	0,63 b	0,63 b	0,62 a	7,70 b	6,04 b	6,22 a
PAD	6,40 a	4,09 b	3,90 b	0,44 c	0,42 c	0,42 a	15,43 a	9,62 a	9,27 a
	CO-HUM (g kg ⁻¹)			N-HUM (g kg ⁻¹)			C:N HUM		
VN	20,03 a	16,97 a	8,86 a	0,91 a	0,62 a	0,43 a	22,26 a	27,29 a	20,58 a
ILPF1	16,47 ab	10,40 b	10,50 a	0,59 b	0,53 a	0,51 a	28,14 a	19,66 a	20,41 a
ILPF2	13,65 b	11,46 b	13,07 a	0,59 b	0,50 a	0,43 a	23,46 a	22,98 a	30,77 a
PAD	13,52 b	9,57 b	7,22 a	0,46 b	0,45 a	0,39 a	29,38 a	21,05 a	19,35 a
	C - FAH /FAF			N - FAH /FAF			C - IH		
VN	2,26 a	3,32 b	4,79 a	2,70 a	3,14 a	2,92 a	21,23 a	33,33 a	38,64 a
ILPF1	3,37 a	3,96 a	4,50 a	1,94 b	1,32 c	2,20 a	22,67 a	21,20 a	24,23 a
ILPF2	2,46 a	1,92 c	2,18 b	2,05 ab	2,29 b	2,11 a	27,39 a	34,72 a	40,99 a
PAD	3,11 a	2,29 c	3,39 ab	1,50 b	1,63 c	1,86 a	30,87 a	23,93 a	30,23 a
	C - (FAH +FAF)/HUM			N - (FAH +FAF)/HUM			N - IH		
VN	0,48 a	0,52 a	1,03 a	1,51 a	1,92 a	1,90 a	39,64 a	54,82 a	41,98 a
ILPF1	0,47 a	0,75 a	0,79 a	1,46 a	1,79 a	1,52 a	30,95 bc	32,57 c	36,48 a
ILPF2	0,50 a	0,51 a	0,47 a	1,60 a	1,80 a	2,09 a	35,60 ab	41,37 b	45,46 a
PAD	0,68 a	0,68 a	0,84 a	1,60 a	1,52 a	1,68 a	25,77 c	30,07 c	36,95 a

Nota: ¹ VN = Vegetação Nativa; ILPF1 = Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta composta por *Eucalyptus cloeziana* e *Urochloa brizantha* 'Marandu'; ILPF2 = Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta composta por *Eucalyptus urograndis* e *Urochloa brizantha* 'Marandu'; PAD = Pastagem Degradada. Para cada profundidade de solo avaliada, as mesmas letras entre os tratamentos não diferem entre si teste t a 5% de probabilidade. Elaborada pela autora, 2020.

Verificou-se aumento dos teores de carbono e nitrogênio da fração humina com a mudança nas práticas de manejo (conversão dos sistemas). O somatório de 0-20 cm de profundidade para o CO-HUM mostrou que a PAD apresentou valor de 30,3 g kg⁻¹, enquanto os ILPF 1 e 2 apresentaram 37,3 g kg⁻¹ e

38,2 g kg⁻¹, respectivamente, foram observadas diferenças estatísticas entre os sistemas nas camadas 0-5 cm e 5-10 cm de profundidade. Para o N-HUM, o somatório de 0-20 cm de profundidade mostrou que a PAD apresentou valor de 1,3 g kg⁻¹, ao passo que os sistemas ILPF 1 e 2 observaram valores de 1,63 g kg⁻¹ e 1,52 g kg⁻¹, além de ser observada diferença estatística na camada 0-5 cm de profundidade (TABELA 5).

Para os teores de carbono e nitrogênio da fração ácido húmico na camada de 0-20 cm de profundidade, foi observado, respectivamente, aumento dos valores com a mudança do uso do solo do sistema PAD de 14,34 g kg⁻¹ e 1,28 g kg⁻¹ para o sistema ILPF1 18,61 g kg⁻¹ e 1,63 g kg⁻¹. Já para o sistema ILPF2 foram verificados menores valores para o CO-FAH com a mudança de uso do solo de 12,47 g kg⁻¹ e maiores valores para o N-FAH de 1,88 g kg⁻¹ (TABELA 5).

Para a relação C - FAH/FAF e N - FAH /FAF entre as frações húmicas do solo, foram encontrados, em todos os sistemas, valores acima de 1. Isso sugere que a matéria orgânica do solo está sendo humificada por processos de polimerização com possíveis transformações de ácidos fúlvicos em ácidos húmicos, culminando em maior estabilidade no solo. Confirma-se esse fato com os resultados da relação C-(FAH+FAF)/HUM, que apresentou valores abaixo de 1, indicando maior proporção de carbono na fração húmica em todos os tratamentos, exceto para a VN 10-20 cm de profundidade (TABELA 5). No entanto, para a relação N- (FAH+FAF)/HUM foram observados valores acima de 1, sinalizando maior porção de nitrogênio nas frações solúveis do solo em todos os sistemas.

De acordo com o índice de humificação, para o carbono, não foram observadas diferenças estatísticas entre os sistemas, porém, para o nitrogênio, nas profundidades de 0-5 cm e 5-10 cm, verificam-se diferenças entre os sistemas. Com pouco tempo de implantação dos sistemas ILPFs, já são verificadas diferenças estatísticas da pastagem degradada.

Não foram observadas diferenças estatísticas na relação C:N das frações ácido fúlvico e fração húmica entre os sistemas estudados, porém houve diferenças estatísticas para a fração ácido húmico (TABELA 5). Observou-se que quanto maior for a transformação da matéria orgânica do solo menor é a relação C:N. Isso é verificado nas frações FAF e FAH que apresentaram uma relação C:N próxima a 9:1, atingindo a mesma C:N média dos microrganismos do solo, assim, nessas condições, a MOS fica estabilizada por apresentar relação C:N similar aos microrganismos.

No geral, a relação C:N dos ácidos fúlvicos foram menores que dos ácidos húmicos e a relação C:N da húmica foi maior que ambas as duas frações, mostrando a importância das substâncias húmicas na proteção química do carbono em frações mais estáveis no solo.

4.1.4 Discussão

De acordo com os resultados obtidos, observaram-se diferenças nas áreas de estudo, que mostra que a mudança de uso do solo de áreas de pastagens degradadas para sistemas sustentáveis como os ILPFs são uma opção viável para o aumento dos estoques de COS e melhoria dos atributos do solo. Conceição et al. (2017), comparando monocultivo de eucalipto, plantio direto de soja seguido de milho e capim-marandu e o sistema de ILPF também encontraram resultados semelhantes ao presente estudo, indicando que o ILPF pode ser promissor em aumentar o carbono no solo, por causa da presença do componente arbóreo.

O mesmo foi observado por López-Santiago *et al.* (2019) ao mostrarem que o sistema silvipastoril, contendo *Leucaena leucocephala* cv. Cunningham e *Panicum. maximum* cv. Tanzania, apresentou estoque de C de 91,6 Mg ha⁻¹ não diferindo significativamente da vegetação nativa que apresentou estoque de C ao solo de 98,3 Mg ha⁻¹.

As maiores taxas de acúmulo de C no solo ocorrem em climas tropicais e em sistemas silvipastoris com taxas anuais de acúmulo em torno de 2,23 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ (Feliciano *et al.*, 2018), valor que corrobora com o presente estudo. Além disso, o maior acúmulo de C no solo ocorre quando áreas degradadas são convertidas em sistemas integrados contendo árvores (Feliciano *et al.*, 2018).

De acordo com os resultados para a abundância de ¹³C nos sistemas avaliados, observou-se maior proporção de C do solo oriundo de espécies C₃ e houve diminuição da proporção de espécies C₄ em profundidade. Esse resultado pode ser atribuído ao tempo de ocupação do solo, como pastagem degradada, com presença de espécies espontâneas, cuja maioria são espécies C₃ e, por essa razão, não há um sinal puro de espécies C₄, antes de serem introduzidos os sistemas ILPFs. Como também pode estar relacionado à taxa de decomposição do capim marandu que, segundo Figueiredo *et al.* (2018), é mais alta no verão, quando há maior temperatura e precipitação.

Oliveira *et al.* (2017) observaram que a assinatura isotópica da matéria orgânica do solo dos ILPFs estudados foi característico de espécies C₄ até 0,40 m, ocorrendo diluição do isótopo ¹³C, com o aumento da profundidade, tornando a assinatura isotópica comparável à da área de vegetação nativa. Sant-Anna *et al.* (2017), ao substituir uma área de Cerrado *Strictu sensu*, em um sistema integrado com pastagens e culturas agrícolas, constataram maior contribuição de ¹³C na camada superficial do solo e maior discriminação do ¹³C com o aumento da profundidade.

Contudo Tonucci *et al.* (2017) verificaram adição do ¹³C com o aumento da profundidade do solo, em razão da presença de lignina mais enriquecida em ¹³C, como também ao histórico de manejo do sistema que, antes da introdução da pastagem marandu, houve sucessão de culturas C₃ na camada arável do solo.

Conforme os resultados, os sistemas ILPF 1 e 2 apresentaram maior contribuição das espécies C₄ (*U. brizantha*), para o C da MOS nas camadas superficiais, enquanto as espécies de *Eucalyptus* (C₃) contribuíram, nas camadas mais profundas, associado ao C remanescente da vegetação nativa. Isso foi verificado por Sarto *et al.* (2020), mostrando maior contribuição do C oriundo de espécies C₃ (*Eucalyptus*) em profundidade e em camadas superficiais predominância do C originário de espécies C₄ (*U. brizantha*). Embora haja pouca informação sobre a importância dos sistemas ILPFs no acúmulo de C no solo, em regiões tropicais, os resultados deste estudo comprovam que a integração de espécies arbóreas e pastagens tem o potencial de aumentar os estoques de C e N do solo.

Além disso, nossos resultados comprovam aumento das frações húmicas do solo com a mudança de uso do solo de PAD para sistema ILPF. As áreas em estudo apresentaram resultados diferentes quanto aos teores de C e N nas frações húmicas da MOS. Na fração solúvel, foram observados maiores teores de C de ácido húmico, o que pode indicar transformação da MOS em frações mais estáveis no solo, contribuindo com a proteção química do C no solo. Gmach *et al.* (2018) encontraram valores aproximados aos deste estudo e maiores teores de carbono, para as frações ácidos húmicos, em detrimento aos ácidos fúlvicos em sistemas de monocultivo de pastagens de capim marandu e *Eucalyptus urophila*. Ambas as

frações são importantes indicadores da qualidade do solo, pois refletem as práticas de manejo e uso do solo adotados aos sistemas agrícolas ao longo do tempo.

Como esperado, maiores valores das frações húmicas foram encontrados na VN, que, de acordo com Kotzé et al. (2016), por apresentar ausência de perturbação do solo, a MOS sofrerá menos oxidação que em sistemas com revolvimento do solo, reduzindo as perdas de C e N para a atmosfera. Alguns autores sugerem que solos menos revolvidos, com maior presença de agregados do solo, acumulam matéria orgânica, em virtude da pouca ruptura dos agregados pelo preparo convencional do solo, formando uma estrutura que proporciona proteção física da MOS (Seddaiu et al., 2013).

No presente estudo, foram encontrados valores para a relação C – (FAH+FAF)/HUM abaixo de 1, o que indica presença predominante de humina e, para o N da mesma relação, valores acima de 1, sinalizando que a maior parte deste nutriente se encontra nas frações solúveis do solo. O mesmo foi observado por Guimarães et al. (2013) para a relação C – (FAH+FAF)/HUM, que discutem sobre a importância desta variável, uma vez que fornece informações sobre a perda de matéria orgânica pelo perfil do solo.

Conforme os resultados, os sistemas ILPFs possuem a capacidade de preservar o C, em frações mais estáveis do solo, como consequência de um aporte maior de material orgânico, tornando-os importantes estabilizadores de C e contribuindo para a mitigação às mudanças climáticas. Assim, estudos realizados por Figueiredo et al. (2018) verificaram que o sistema de monocultivo acumulou menos carbono nas frações húmicas do solo, quando comparado a sistemas conservacionistas, visto que este último tem a capacidade de preservar o carbono, em frações mais estáveis da MOS, por não haver revolvimento do solo e exposição do carbono protegido nos macro e microagregados do solo.

4.1.5 Conclusão

Os sistemas integrados compostos por espécies arbóreas e pastagens aumentaram o COS, apresentado taxas anuais de acúmulo de 1,44 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para o ILPF1 e de 2,17 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para o ILPF 2.

Observou-se aumento dos teores de C (37,3 g kg⁻¹ para ILPF1 e 38,2 g kg⁻¹ para ILPF2) e N (1,63 g kg⁻¹ para ILPF1 e 1,52 g kg⁻¹ para ILPF2) da fração humina e C (18,61 g kg⁻¹ para ILPF1 e 12,47 g kg⁻¹ para ILPF2) e N (1,63 g kg⁻¹ para ILPF1 e 1,52 g kg⁻¹ para ILPF2) da fração ácido húmico com a mudança de uso do solo na camada de 0-20 cm de profundidade.

Foi verificada maior contribuição do C da MOS das espécies da vegetação nativa (C₃) e pelas espécies de *Eucalyptus* (C₃), em camadas mais profundas (-24,24 ‰) e maior contribuição da espécies *U. brizantha* (C₄), em camadas superficiais (-20,21 ‰).

4.1.6 Referências

- Almeida, L.L. de S., Frazão, L.A., Lessa, T.A.M., Fernandes, L.A., Veloso, Á.L. de C., Lana, A.M.Q., de Souza, I.A., Pegoraro, R.F., Ferreira, E.A., 2020. Soil carbon and nitrogen stocks and the quality of soil organic matter under silvopastoral systems in the Brazilian Cerrado. *Soil Tillage Res.* 205. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104785>
- Almeida, L.L.S., 2018. Qualidade da matéria orgânica do solo e estoques de carbono e nitrogênio em sistemas integrados de produção no Norte de Minas Gerais. Diss. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Barbosa, D. L. A. Crescimento inicial de eucalipto em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Agrárias. Trabalho de Conclusão de Curso – Monografia. 2014.
- Bernoux, M; Cerri, CC; Neill, C; Moraes, JFL De. 1998. The use of stable carbon isotopes for estimating soil organic matter turnover rates. *Geoderma* 82, 43–58.
- Bremner, JM; Mulvaney, CS. 1982. Nitrogen total. *Methods of soil analysis: Part 2, Chemical and Microbiological Properties. Agronomy Monograph, Soil Science Society-America* 9, p.595-624. <https://dl.sciencesocieties.org/publications/books/abstracts/agronomymonogra/methodsofsoilan/2/595/preview/pdf>.
- Conceição, MCG da S; Matos, E; Bidone, ED; Rodrigues, R de AR; Cordeiro, RC. 2017. Changes in Soil Carbon Stocks under Integrated Crop-Livestock-Forest System in the Brazilian Amazon Region. *Agricultural Sciences* 08, 904–913. doi:10.4236/as.2017.89066.
- Cubbage, F; Balmelli, G; Bussoni, A; Noellemeyer, E; Pachas, AN; Fassola, H; Colcombet, L; Rossner, B; Frey, G; Dube, F; Silva, ML; Stevenson, H; Hamilton, J; Hubbard, W. 2012. Comparing silvopastoral systems and prospects in eight regions of the world. *Agroforestry Systems* 86, 303–314. doi:10.1007/s10457-012-9482-z.
- Don, A; Schumacher, J; Freibauer, A. 2011. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks - a meta-analysis. *Global Change Biology* 17, 1658–1670. doi:10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x.
- Ellert, B.H.; Bettany, J.R. Calculation of a organic matter and nutrients stored in soil under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science, Ottawa*, v.75, p.529-538, 1996.
- Embrapa. 1997. Manual de Métodos de Análise de Solos / Centro Nacional de Pesquisa de Solo. EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). 212p.
- Embrapa (2017) Manual de métodos de análise de solo. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, pp 574. ISBN 978-85-7035-771-7
- Feliciano, D; Ledo, A; Hillier, J; Nayak, DR. 2018. Which agroforestry options give the greatest soil and above ground carbon benefits in different world regions? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 254, 117–129. doi:10.1016/j.agee.2017.11.032.
- Figueiredo, AF; Augusto, FG; Coletta, LD; Duarte-Neto, PJ; Mazzi, EA; Martinelli, LA. 2018a. Comparison of microbial processing of *Brachiaria brizantha*, a C4 invasive species and a rainforest species in tropical streams of the Atlantic Forest of south-eastern Brazil. *Marine and Freshwater Research* 69, 1397–1407. doi:10.1071/MF17080.
- Figueiredo, CC; Oliveira, AD; Santos, IL; Ferreira, EAB; Malaquias, JV; Sá, MAC; Carvalho, AM; Santos, JDG. 2018b. Relationships between soil organic matter pools and nitrous oxide emissions of agroecosystems in the Brazilian Cerrado. *Science of the Total Environment* 618, 1572–1582. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.09.333.

- Gmach, MR; Dias, BO; Silva, CA; Nóbrega, JCA; Lustosa-Filho, JF; Siqueira-Neto, M. 2018. Soil organic matter dynamics and land-use change on Oxisols in the Cerrado, Brazil. *Geoderma Regional* 14, e00178. doi:10.1016/j.geodrs.2018.e00178.
- Guimarães, DV; Gonzaga, MIS; da Silva, TO; da Silva, TL; da Silva, Dias N; Matias, MIS. 2013. Soil organic matter pools and carbon fractions in soil under different land uses. *Soil and Tillage Research* 126, 177–182. doi:10.1016/j.still.2012.07.010.
- Inmet. 2019. Instituto Nacional De Meteorologia. Clima, Estação e Dados, Dados Históricos. <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>.
- Kotzé, E; Loke, PF; Akhosi-Setaka, MC; Du Preez, CC. 2016. Land use change affecting soil humic substances in three semi-arid agro-ecosystems in South Africa. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 216, 194–202. doi:10.1016/j.agee.2015.10.007.
- Lal, R. 2018. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. *Global Change Biology* 24, 3285–3301. doi:10.1111/gcb.14054.
- Lal, R. 2019. Promoting “ 4 Per Thousand ” and “ Adapting African Agriculture ” by south- south cooperation : Conservation agriculture and sustainable intensification. *Soil & Tillage Research* 188, 27–34. doi:https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.015.
- López-Santiago, J; Casanova-Lugo, F; Villanueva-López, G; Díaz-Echeverría, F; Solorio-Sánchez, F; Martínez-Zurimendi, P; Aryal, D; Chay-Canul, A. 2019. Carbon storage in a silvopastoral system compared to that in a deciduous dry forest in Michoacán, Mexico. *Agroforestry Systems* 93, 199–211. doi:10.1007/s10457-018-0259-x.
- Lorenz, K; Lal, R. 2014. Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 34, 443–454. doi:10.1007/s13593-014-0212-y.
- Minasny, B; Malone, BP; McBratney, AB; Angers, DA; Arrouays, D; Chambers, A; Chaplot, V; Chen, ZS; Cheng, K; Das, BS; Field, DJ; Gimona, A; Hedley, CB; Hong, SY; Mandal, B; Marchant, BP; Martin, M; McConkey, BG; Mulder, VL; O'Rourke, S; Richer-de-Forges, AC; Odeh, I; Padarian, J; Paustian, K; Pan, G; Poggio, L; Savin, I; Stolbovoy, V; Stockmann, U; Sulaeman, Y; Tsui, CC; Vågen, TG; van Wesemael, B; Winowiecki, L. 2017. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* 292, 59–86. doi:10.1016/j.geoderma.2017.01.002.
- Moraes, JFL; Volkoff, B; Cerri, CC; Bernoux, M. 1996. Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. *Geoderma* 70, 63–81. doi:10.1016/0016-7061(95)00072-0.
- O'leary, MH. 1988. Carbon Isotopes Photosyn Fractionation techniques may reveal new aspects of carbon dynamics in plants. *BioScience* 38, 328–336.
- Oliveira, J de M; Madari, BE; Carvalho, MT de M; Assis, PCR; Silveira, ALR; Lima, ML; Wruck, FJ; Medeiros, JC; Machado, PLO de A. 2017. Integrated farming systems for improving soil carbon balance in the southern Amazon of Brazil. *Regional Environmental Change* 18, 105–116. doi:10.1007/s10113-017-1146-0.
- R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Sant-Anna, SAC de; Jantalia, CP; Sá, JM; Vilela, L; Marchão, RL; Alves, BJR; Urquiaga, S; Boddey, RM. 2017. Changes in soil organic carbon during 22 years of pastures, cropping or integrated crop/livestock systems in the Brazilian Cerrado. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 108, 101–120. doi:10.1007/s10705-016-9812-z.
- Sarto, MVM, Borges, WLB, Sarto, JRW *et al.* Estoque profundo de carbono no solo, origem e interação de raízes em um sistema tropical integrado lavoura-pecuária. *Agroforest Systems*, 94, 1865–1877 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00505-6>

- Searchinger, TD; Wiersenius, S; Beringer, T; Dumas, P. 2018. Assessing the efficiency of changes in land use for mitigating climate change. *Nature* 564, 249–253. doi:10.1038/s41586-018-0757-z.
- Seddaiu, G; Porcu, G; Ledda, L; Roggero, PP; Agnelli, A; Corti, G. 2013. Soil organic matter content and composition as influenced by soil management in a semi-arid Mediterranean agro-silvo-pastoral system. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 167, 1–11. doi:10.1016/j.agee.2013.01.002.
- Shi, S; Zhang, W; Zhang, P; Yu, Y; Ding, F. 2013. A synthesis of change in deep soil organic carbon stores with afforestation of agricultural soils. *Forest Ecology and Management* 296, 53–63. doi:10.1016/j.foreco.2013.01.026.
- Swift, RS. 1996. Organic matter characterisation. In: Sparks, DL.; Page, AL.; Helmke, PA.; Loeppert, RH.; Soltanpour, PN.; Tabatabai, MA.; Johnston, CT.; Sumner, ME. (Eds.), *Soil Science Socie. "Methods Soil Anal. Part 3 – Chem. Methods."*
- Tedesco, MJ; Gianello, C; Bissani, CA; Bohnen, H; Volkweiss, SJ. 1995. Análise de solo, plantas e outros materiais. (Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul., Ed.). (Porto Alegre)
- Tonucci, RG; Nair, VD; Ramachandran Nair, PK; Garcia, R. 2017. Grass vs. tree origin of soil organic carbon under different land-use systems in the Brazilian Cerrado. *Plant and Soil* 419, 281–292. doi:10.1007/s11104-017-3347-1.
- Yang, Y; Tilman, D; Furey, G; Lehman, C. 2019. Soil carbon sequestration accelerated by restoration of grassland biodiversity. *Nature Communications* 10, 1–7. doi:10.1038/s41467-019-08636-w.
- Yeomans, JC; Bremner, JM. 1988. Communications in Soil Science and Plant Analysis A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 19, 1467–1476.

4.2 Artigo 2 - Mudanças nos estoques de carbono e nitrogênio do solo sob sistema agrossilvipastoril e pastagem bem manejada no Cerrado da mesorregião Central de Minas Gerais

Este artigo foi elaborado conforme as normas da Revista Rangeland Ecology & Management (Aceito para publicação).

Resumo

Os sistemas de integração composto por agricultura, pecuária e produção florestal em uma mesma área são modelos sustentáveis que podem contribuir com o aporte de carbono (C) e nitrogênio (N) no solo ao longo dos anos. Desta forma, o objetivo deste estudo foi avaliar as mudanças nos estoques de C e N do solo em uma cronosequência de uso do solo com vegetação nativa (VN), pastagem degradada (PAD), pastagem bem manejada (MAR) e sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) no Cerrado mineiro. Amostras de solo foram coletadas, em 2017 e 2018, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm de profundidade. Os teores e estoques de C e N, a abundância natural de ^{13}C , assim como o C das frações químicas da matéria orgânica do solo (MOS) foram avaliados. Os sistemas ILPF e MAR promoveram a recuperação dos estoques de C e N do solo, na profundidade de 0-30 cm, em comparação à PAD. A mudança do uso do solo contribuiu com aumentos nos teores de C da fração ácido húmico e humina, em todas as profundidades, assim como para o enriquecimento de ^{13}C no perfil de solo. Os estoques de C do solo no sistema ILPF foi oriundo principalmente das espécies C_4 na profundidade de 0-30 cm ($47,63 \text{ Mg ha}^{-1}$). Nossos resultados confirmaram que houve melhorias nos estoques de C, após a conversão de pastagens de baixa produtividade, em sistemas agrossilvipastoris no Cerrado brasileiro.

Palavras-chave: Abundância de ^{13}C ; Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta; Matéria orgânica do solo; Qualidade do solo.

Abstract

The integration systems composed by agriculture, livestock and forest production in the same area are sustainable models that can contribute to the supply of carbon (C) and nitrogen (N) in the soil over the years. Thus, the main of this study was to evaluate the changes in the C and N stocks of the soil in a chronosequence of land use with native vegetation (VN), degraded pasture (DPA), well-managed pasture (MAR) and integration system crop-forest-livestock (ICLF) in the Cerrado of Minas Gerais. Soil samples were collected in 2017 and 2018 in layers of 0-5, 5-10, 10-20 and 20-30 cm deep. The contents and stocks of C and N, the natural abundance of ^{13}C , as well as the C of the chemical fractions of the soil organic matter (SOM) were evaluated. The ICLF and MAR systems promoted the recovery of soil C and N stocks at a depth of 0-30 cm compared to DPA. The change in land use contributed to increases in the C content of the humic acid and humine fraction at all depths, as well as to the enrichment of ^{13}C in the soil profile. The soil C stocks in the ICLF system came mainly from C_4 species at a depth of 0-30 cm (47.63 Mg ha^{-1}). Our results confirmed that there were improvements in the C stocks after the conversion of low productivity pastures into agrosilvopastoral systems in the Brazilian Cerrado.

Key words: ^{13}C abundance. Crop-livestock-forest integration system. Soil organic matter. Soil quality.

4.2.1 Introdução

O uso do solo é considerado prática de manejo que interfere nas condições climáticas do planeta, por alterar o regime de precipitação pluviométrica e a temperatura média, com impactos significativos nos recursos do solo, em decorrência da possibilidade de emissão de gases de efeito estufa (GEE). Por sua vez, aumentos na temperatura média do planeta e umidade implicam em maiores taxas de decomposição do carbono do solo (Montanarella et al. 2016).

Estudo recente realizado por Sanderman et al. (2017) mostrou que o Brasil está entre os 10 maiores países emissores de CO_2 para a atmosfera. Os autores apresentaram que o uso e a mudança da cobertura do solo, entre todas as atividades antropogênicas históricas mundiais, resultaram em perdas de carbono em torno de 133 milhões de toneladas de solo, principalmente, quando áreas de vegetação nativa foram convertidas em pastagens. Essas áreas, pela ausência de manejo adequado do solo, tornaram-se áreas degradadas, acarretando um forte fator para a perda de carbono do solo.

A adoção de um manejo agrícola, que visa a uma ampla gama de bens e serviços com maior diversidade de plantas, emite menos dióxido de carbono (CO_2) para a atmosfera, além de estimular a proliferação de uma comunidade decompositora heterotrófica diversificada. Isso implica na manutenção da biodiversidade, aumento do COS e contribuição para a mitigação das mudanças climáticas (Buzhdygan et al. 2020).

Desta forma, o sistema agrossilvipastoril (ILPF) é uma estratégia de produção que integra lavoura, pecuária e floresta dentro de uma mesma área, que busca potencializar o uso da terra, elevar a produtividade, diversificar a produção em uma mesma área e manter a sustentabilidade agrícola (Balbino et al. 2011).

Assim, a quantificação dos teores e estoques de carbono orgânico do solo (COS) e nitrogênio (NT), constituintes importantes da MOS, permite inferir o impacto da adoção de diferentes sistemas de uso e manejo da terra (Franzluebbers, 2002; Baldotto et al. 2015). Além disso, o sistema ILPF pode favorecer a estocagem de C e N nas frações humificadas da MOS, como também a introdução de gramíneas (espécie C_4) no sistema agrícola pode aumentar a estocagem de C nas frações da MOS e substituir o C da matéria orgânica nativa.

Vários estudos relataram a importância dos sistemas integrados de produção para a melhoria da qualidade do solo (Lorenz e Lal 2014; Assis et al. 2015; Baldotto et al. 2015). No entanto, dada a dinâmica e complexidade do manejo do solo gerada pela integração de diferentes componentes da produção, é necessário realizar pesquisas regionalizadas, focadas especificamente nas diferentes etapas do desenvolvimento desses sistemas (Balbino et al. 2011; Feliciano et al. 2018).

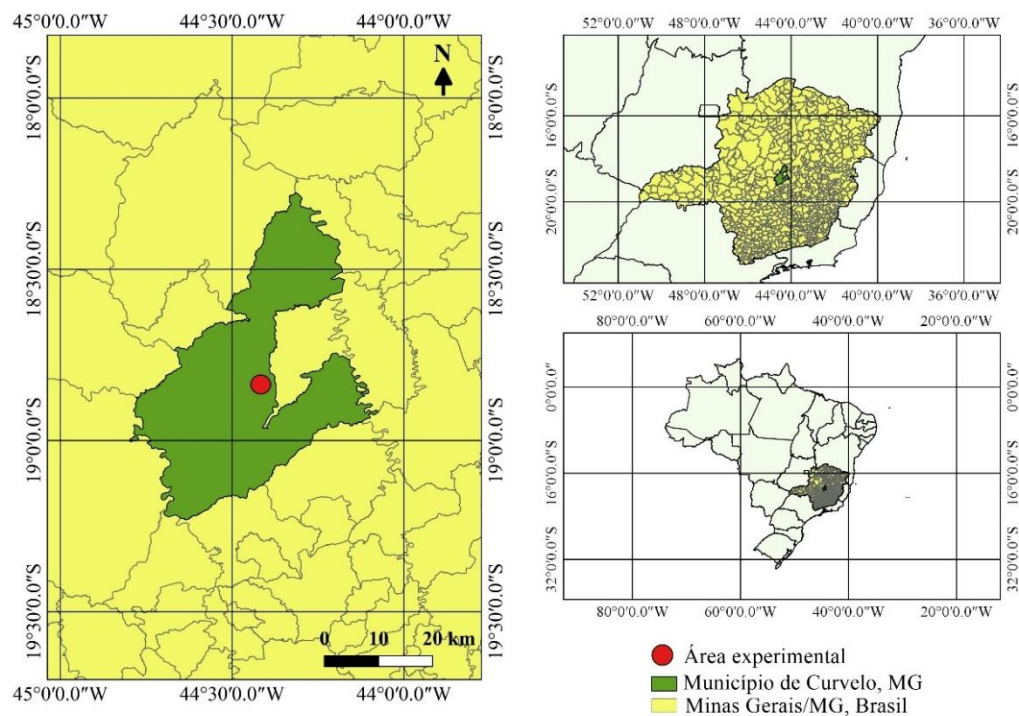
Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar os conteúdos e estoques de C e N, a abundância natural de ^{13}C para determinar a contribuição de espécies C_3 e C_4 no aporte de C do solo, assim como avaliar o conteúdo de C e N nas frações químicas da MOS em uma cronosequência de intensificação de uso da terra no Cerrado mineiro.

4.2.2 Material e métodos

4.2.2.1 Local do estudo e estabelecimento do experimento

A área experimental está localizada na Fazenda Experimental de Moura ($18^{\circ}44'52,03''\text{S}$ e $44^{\circ}6'53,56''\text{W}$) da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), no município de Curvelo, Minas Gerais, Brasil (FIGURA 7).

Figura 7 - Localização da área de estudo no município de Curvelo-MG

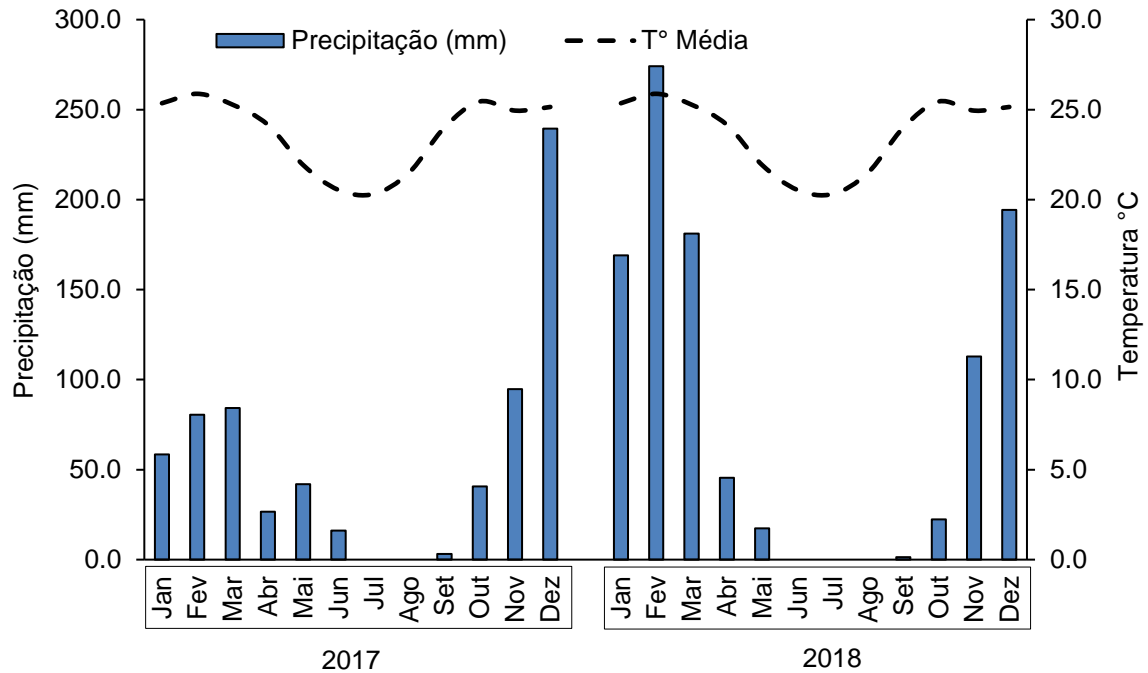


Fonte: FREITAS, 2016.

A altitude média da área é de aproximadamente 644 m, com topografia plana e vegetação característica do bioma Cerrado e fitofisionomia Cerradão.

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é Aw, correspondendo a um clima de savana tropical, com chuvas concentradas no verão (outubro a abril), enquanto o inverno consiste em um período seco (maio a setembro). A precipitação média anual, Figura 8, no município nos últimos 15 anos, foi de 1.064 mm, com temperatura média de 22°C (INMET, 2019).

Figura 8 - Precipitação pluviométrica e temperatura média no município de Curvelo/MG nos anos 2017 e 2018



Fonte: INMET, 2019.

Toda a área experimental consiste em pastagem de capim-braquiária (*Urochloa decumbens* Stapf) (PAD), que por 20 anos foi utilizada sem práticas definidas de manejo, como manutenção, ressemeadura e adubação de pastagens, além de não possuir taxa de lotação definida, já que os animais pastejavam principalmente na época chuvosa. O local foi caracterizado por solo exposto e presença de plantas daninhas.

O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico com textura argilosa, com composição granulométrica nas profundidades de 0-30 cm de 94,8 g kg⁻¹, 249,2 g kg⁻¹ e 656,0 g kg⁻¹ para areia, silte e argila, respectivamente (Embrapa, 2017). Conforme Alvarez *et al.* (1999), a classificação deste solo apresentou baixo valor de pH de 5,32, valores médios de Al³⁺ de 0,67 cmolc dm⁻³, soma de bases de 2,30 cmolc dm⁻³, acidez potencial de 2,88 cmolc dm⁻³, capacidade de troca de cátions efetiva de 2,97 cmolc dm⁻³, saturação por base de 41,08%. Uma vez que o solo apresentou baixos índices de pH e saturação por bases, o calcário foi aplicado, aproximadamente 90 dias antes da implementação dos tratamentos, utilizando como referência a caracterização química do solo obtida anteriormente. Após a aplicação do calcário, o preparo convencional do solo foi realizado com aração e gradagem até 30 cm de profundidade. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com quatro usos da terra (tratamentos) descritos na Figura 9.

Figura 9 - Cronossequência de uso da terra em área de Cerradão localizada no município de Curvelo/MG



1995 – Remoção da Vegetação Nativa e introdução de *Urochloa decumbens*, mantida por 20 anos sem manejo adequado
 2015 – Introdução de *Urochloa brizantha* 'Marandu' em sistema de monocultivo e consorciado com *Eucalyptus urograndis*
 2017 / 2018 – Coletas de solo

- VN: Vegetação nativa, bioma Cerrado - fitofisionomia Cerradão
- PAD: Pastagem degradada de *Urochloa decumbens*
- MAR: Monocultivo de *Urochloa brizantha* 'Marandu' bem manejada
- ILPF: Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta composto por *Eucalyptus urograndis* e *Urochloa brizantha* 'Marandu'

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

A unidade agrosilvipastoril (ILPF) foi instalada em dezembro de 2014, em áreas previamente cultivadas por duas décadas sem pastagem manejada (PAD). Foram utilizadas mudas de Clone 144 de *Eucalyptus urograndis*, com três meses de idade, (um híbrido de *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*). O transplântio foi realizado simultaneamente com a semeadura de milho (SHS híbrido 7920) e forragem (*Urochloa brizantha* cv. Marandu). No plantio de eucalipto, adotou-se um espaçamento de 12 x 3 m, com uma faixa de 1,5 m que separa o milho consorciado e as mudas de forragem.

O milho foi plantado a 1,5 m de distância da árvore entre as linhas de eucalipto. A pastagem de marandu foi consorciada com milho somente no primeiro ano de cultivo, após o qual somente a pastagem permaneceu entre as linhas originais. As informações sobre recomendação de adubação de plantio e cobertura das espécies utilizadas nas unidades experimentais estão disponíveis no estudo de Freitas (2016).

A unidade experimental de capim marandu (MAR) foi instalada, em dezembro de 2014, em áreas previamente cultivadas por duas décadas sem pastagem manejada (PAD), utilizando as mesmas recomendações de plantio e tratamentos de cultivo descritos para a *Urochloa brizantha* cv. Marandu no sistema ILPF. Informações adicionais sobre recomendação de adubação deste sistema também estão disponíveis no estudo de Freitas (2016). As gramíneas forrageiras *Urochloa brizantha* cv. Marandu e *Urochloa decumbens* têm potencial de produção de matéria seca de até 23 e 15 t ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente (Alvim et al. 2002).

A área de pastagem (PAD) consistia em pastagem de capim-braquiária (*Urochloa decumbens* Stapf) e era utilizada anteriormente por gado leiteiro e bovino de corte e deixada sem manejo definido e sem adubação de manutenção por 20 anos, apresentando, assim, pastagem caracterizada por baixa produtividade, solo exposto e infestação de plantas daninhas.

A área de vegetação nativa (VN), classificada como “Cerradão”, fica adjacente às unidades experimentais. Em pesquisa anterior, Otoni et al. (2013), verificaram que o sistema VN não havia sofrido intervenção antropogênica e, portanto foi usado como tratamento de controle. Segundo a caracterização desses autores, a área de cerrado estudada possui indivíduos tortuosos com aspectos xeromórficos e indivíduos eretos. Espécies com altura máxima de até 12 m e altura média de 4,5 m foram observadas na área, com a formação de extratos bem definidos em determinados locais. As principais espécies arbóreas observadas na área foram *Magonia pubescens*, *Qualea grandiflora*, *Tachigali subvelutina*, *Terminalia argentea*, *Qualea parviflora*, *Kielmeyera coriacea* e *Protium heptaphyllum*, representando 1.221 indivíduos dos 2.424 identificados em uma área amostral de 1 ha.

4.2.2.2 Amostragem e preparação de amostras de solo

A amostragem do solo foi realizada, em janeiro de 2017 e março de 2018, 25 e 40 meses, respectivamente, após a implantação dos sistemas MAR e ILPF e 25 meses após a última fertilização nessas áreas. Um ciclo de cultivo de milho no ILPF ocorreu antes da amostragem do solo em 2016. As amostras compostas do solo foram coletadas aleatoriamente em quatro minitrincheiras 1x1x0.5 m de diâmetro por tratamento, nas camadas de profundidade de 0–5, 5–10, 10–20 e 20–30 cm. A densidade aparente do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico (anéis de aço inoxidável \pm 5cm de diâmetro) para todas as camadas de profundidade avaliadas (Embrapa, 2017).

Após a coleta, as amostras de solo foram secas ao ar; as raízes foram removidas das amostras e depois passadas por peneiras de 2 mm para avaliar as frações húmicas da MOS. Após esse processamento inicial, as amostras foram trituradas e passadas por peneiras de 0,150 mm para determinar os teores de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) e proporções isotópicas $^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$.

4.2.2.3 Determinação dos teores e estoques de C e N e abundância natural de ^{13}C

As amostras de solo foram previamente secas ao ar, homogeneizadas, moídas e passadas em peneiras de 0,150 mm e, posteriormente, 0,2 g de amostra de solo foram encapsuladas em cápsula de estanho e analisadas por combustão seca, em um analisador elementar unido a um espectrômetro de massas Carlo Erba® Delta Plus, no Centro de Energia Nuclear na Agricultura –CENA em Piracicaba – SP, Brasil, para a determinação do C e N total e da relação $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. A composição isotópica foi denotada, usando a notação $\delta^{13}\text{C}$ expressa como parte por mil (‰) referenciada ao padrão Pee Dee Belemnite (O’leary, 1988).

Os estoques de C e N dos sistemas ILPF, MAR e PAD foram calculados, para a mesma massa de solo que a VN, de acordo com metodologia proposta por Ellert e Bettany, (1996); Moraes et al. (1996). Desses estoques totais de C, a contribuição das plantas C_3 e C_4 foi calculada com base na equação proposta por Bernoux et al. (1998). Com os valores obtidos para os teores de C e N, calculou-se a relação C:N do solo.

A taxa (acúmulo ou perda) anual de carbono e nitrogênio no solo foi estimada, com base nas alterações dos estoques de C e N, ao longo do tempo, de acordo com a Equação 2:

$$TA = \frac{E_{cf} - E_{ci}}{t}$$

Sendo:

TA= Taxa de (acúmulo ou perda) anual de C ou N no solo ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$)

E_{cf} = Estoque de C ou N em um determinado tempo final

E_{ci} = Estoque de C ou N em um determinado tempo inicial

t = tempo decorrido em anos

Com o objetivo de acompanhar o comportamento das variáveis analisadas nas áreas de estudo, os resultados observados foram comparados com o estudo realizado por Freitas (2016).

4.2.2.4 Determinação do C e N das frações humificadas da Matéria Orgânica do Solo (MOS)

A extração, o fracionamento das substâncias húmicas (SH) e a determinação dos teores de C e N foram realizados, conforme método da Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas (IHSS), cujo protocolo metodológico encontra-se descrito em Swift 1996. Para a extração e fracionamento, foram pesados 0,5 g de TFSA em tubo de falcon de 50 ml e adicionada uma solução extratora de NaOH a $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ que solubilizou as frações ácido fúlvico (FAF) e ácido húmico (FAH). A fração humina (HUM) precipitou, após três ciclos de centrifugação e extração, o resíduo sólido foi armazenado em estufa de secagem a 45°C por 48 h. A separação das frações FAF e FAH ocorreram em meio sulfúrico a (20%) com pH igual a $2,0 \pm 0,1$. A FAF é solúvel em pH ácido e básico, enquanto a FAH é solúvel em pH básico e pouco solúvel em pH ácido.

A determinação dos teores de C, nos extratos das frações HUM, FAF e FAH, foi realizada pelo método de oxidação por via úmida (Yeomans e Bremner 1988), e o teor de N, das mesmas frações, foi obtido pela metodologia adaptada de Bremner e Mulvaney (1982) e Tedesco et al. (1995). Obtidos os teores de C e N das frações húmicas, foram calculadas as relações entre as frações alcalino solúveis (FAH / FAF) e entre o extrato alcalino (FAH + FAF) e fração humina (FAH+FAF/HUM), além do Índice de Humificação, para C ($\text{IH}=\text{AH}/\text{COT} \times 100$) e para N ($\text{IH}=\text{AH}/\text{NT} \times 100$).

4.2.2.5 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos aos testes de Lilliefors e Cochran e Bartlett para verificar as distribuições normais e homogeneidade de variâncias, respectivamente. Como as hipóteses de normalidade e homogeneidade não foram validadas, optou-se pelo uso de estatística não paramétrica para todas as variáveis avaliadas. Assim, foi aplicado o teste Kruskal-Wallis ($p < 0.05$), utilizando-se o software R (R Core Team 2018).

4.2.3 Resultados

Os resultados dos teores de carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (NT), relação C/N e densidade aparente do solo estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Teores de carbono orgânico total do solo (COT), nitrogênio total (NT), relação carbono / nitrogênio (C/N) e densidade aparente do solo (Ds) em diferentes sistemas de uso da terra em área de Cerradão localizada no município de Curvelo/MG

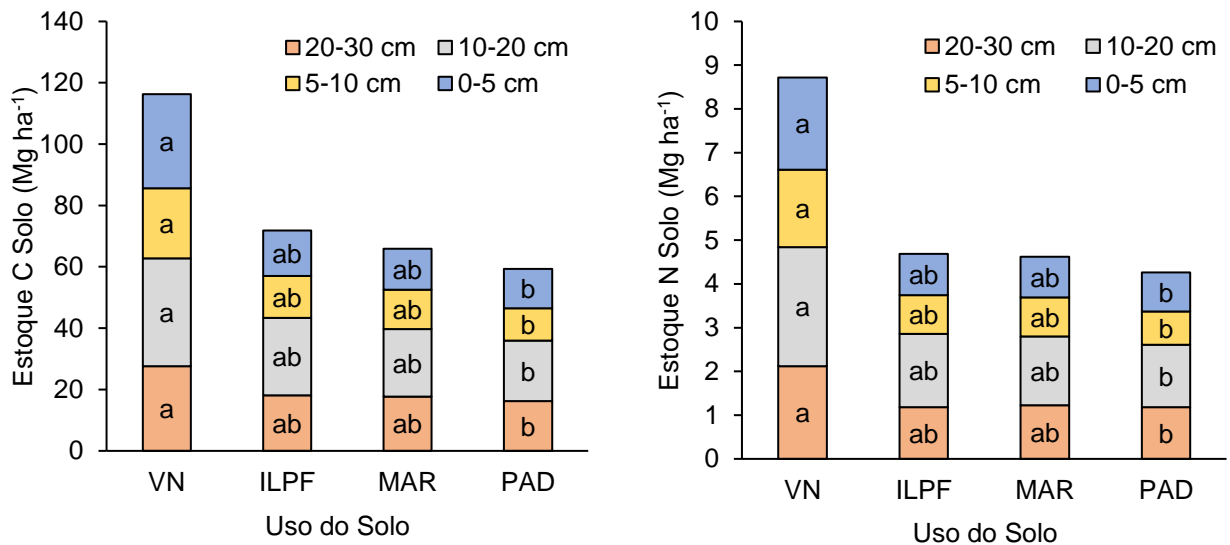
Sistemas ¹	Profundidade do solo (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-30
COT (g kg ⁻¹)				
PAD	21,20 ± 1,46 b*	17,09 ± 0,8 b	15,69 ± 0,58 b	13,69 ± 0,82 b
MAR	26,04 ± 1,36 ab	23,67 ± 2,54 ab	18,71 ± 1,39 ab	14,93 ± 1,38 ab
ILPF	27,79 ± 4,47 ab	22,93 ± 1,97 ab	19,66 ± 1,33 ab	15,29 ± 1,27 ab
VN	59,91 ± 7,28 a	39,86 ± 4,64 a	32,32 ± 4,07 a	23,37 ± 2,84 a
NT (g kg ⁻¹)				
PAD	1,50 ± 0,10 b	1,23 ± 0,05 b	1,13 ± 0,05 b	0,99 ± 0,05 b
MAR	1,83 ± 0,07 ab	1,63 ± 0,16 ab	1,34 ± 0,10 ab	1,03 ± 0,05 ab
ILPF	1,77 ± 0,29 ab	1,49 ± 0,10 ab	1,30 ± 0,09 ab	1,00 ± 0,06 ab
VN	4,13 ± 0,59 a	3,08 ± 0,42 a	2,51 ± 0,35 a	1,79 ± 0,22 a
C/N				
PAD	14,18 ± 0,10 a	13,90 ± 0,08 ab	13,84 ± 0,39 ab	13,75 ± 0,23 ab
MAR	14,20 ± 0,23 a	14,51 ± 0,12 ab	13,97 ± 0,29 ab	14,41 ± 0,74 ab
ILPF	15,69 ± 0,37 a	15,39 ± 0,49 a	15,06 ± 0,11 a	15,33 ± 0,38 a
VN	14,55 ± 0,54 a	12,99 ± 0,72 b	12,94 ± 0,78 b	13,05 ± 0,56 b
Ds (g cm ⁻³)				
PAD	1,14 ± 0,05* a	1,16 ± 0,02 a	1,23 ± 0,02 a	1,19 ± 0,05 a
MAR	0,82 ± 0,13 ab	1,05 ± 0,11 ab	1,11 ± 0,09 a	1,15 ± 0,03 a
ILPF	0,84 ± 0,02 ab	1,03 ± 0,05 ab	1,11 ± 0,06 a	1,15 ± 0,09 a
VN	0,80 ± 0,07 b	1,02 ± 0,15 b	1,08 ± 0,07 a	1,19 ± 0,07 a

Nota: ¹Sistemas: PAD = Pastagem degradada de *Urochloa decumbens*; MAR = Monocultivo de *Urochloa brizantha* cv. Marandu; ILPF = Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta; VN = Vegetação Nativa. *Os valores representam a média (n =4) ± desvio-padrão. Médias seguidas pela mesma letra na coluna, para cada variável avaliada, não diferem entre si pelo teste Kruskal-Wallis (p < 0,05). Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

O teor de C e N dos sistemas MAR e ILPF foram semelhantes aos do solo da VN (TABELA 6). Como há maior deposição de material orgânico nesses sistemas, em virtude do manejo adequado do solo, ocorrem melhorias na qualidade do solo ao longo dos anos. No entanto, no sistema PAD, obtiveram-se os menores teores de C e N, para todas as profundidades, uma vez que ocorre, neste sistema, redução de material orgânico transferido para o solo, ao longo do tempo, por ausência de manejo adequado. A relação C/N variou de 12,94 (VN) a 15,69 (ILPF) nos usos do solo (TABELA 6). Como esperado, na VN o menor valor pode ser atribuído à maior diversidade vegetal em relação às áreas cultivadas (TABELA 6).

Foram encontrados padrões semelhantes para os estoques de C e N entre os sistemas avaliados (FIGURA 10).

Figura 10 - Estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) em diferentes usos do solo em área de Cerradão localizada no município de Curvelo/MG



Nota: Para cada profundidade de solo avaliada, os tratamentos com letras iguais não diferem pelo teste Kruskal-Wallis ($p < 0,05$). VN = Vegetação Nativa; ILPF = Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta; MAR = Monocultivo de *Urochloa brizantha* cv. Marandu; PAD = Pastagem degradada de *Urochloa decumbens*. Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

O estoque de C e N, na camada de 0-30 cm de profundidade, Figura 10, mostra menores valores para o sistema PAD (59,27 Mg ha⁻¹ e 4,27 Mg ha⁻¹), em todas as profundidades, ao passo que maiores valores foram encontrados no sistema VN (116,23 Mg ha⁻¹ e 8,72 Mg ha⁻¹). Com a mudança de uso do solo, foi possível verificar aumentos dos estoques de C e N, nos sistemas MAR (65,85 Mg ha⁻¹ e 4,62 Mg ha⁻¹) e ILPF (71,84 Mg ha⁻¹ e 4,69 Mg ha⁻¹), porém não foi verificada diferença estatística desses sistemas com o sistema PAD.

Desta forma, comparando dados de estoque de C e N encontrados por Freitas (2016) com dados deste estudo, observou-se um efeito de condição ambiental favorável para o acúmulo de C. Como também a introdução de boas práticas de manejo, nos sistemas ILPF e MAR, contribuíram para aumentar os estoques de C do solo, entre 2016 e 2018, contudo não foi observada diferença estatística entre esses anos (TABELA 7).

Tabela 7 - Estoques corrigidos de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo (0 - 30 cm de profundidade) em 2016 e 2018 e taxa de acúmulo (TA) de C e N em diferentes sistemas de uso da terra, em área de Cerradão localizada no município de Curvelo/MG

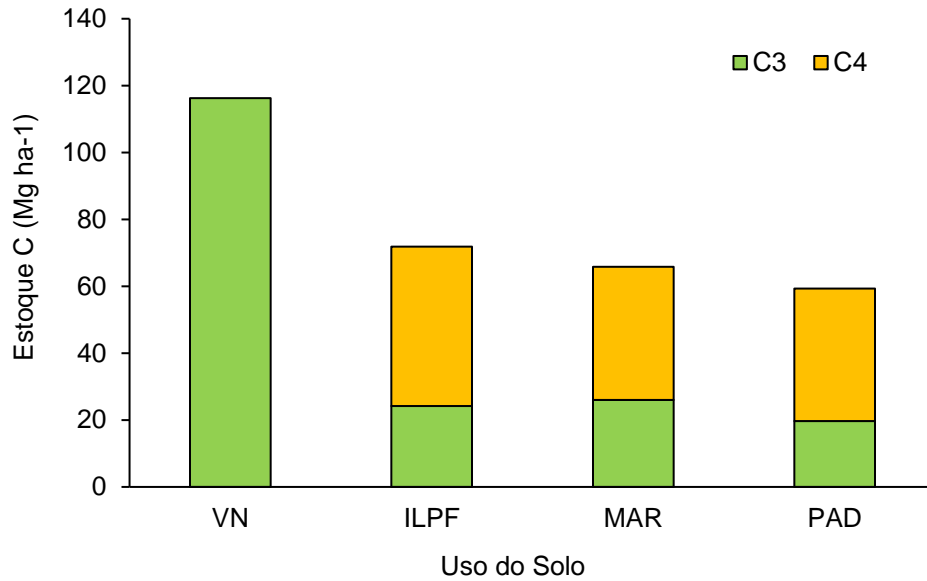
Sistemas ¹	2016 (Freitas, 2016)		2018	TA (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)
	Estoques C (Mg ha ⁻¹)			
PAD	56,94* bA		59,27 bA	1,17
MAR	65,21abA		65,85 abA	0,32
ILPF	68,40 abA		71,84 abA	1,72
VN	102,25 aA		116,23 aA	6,99
Sistemas ¹	2016 (Freitas, 2016)		2018	TA (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)
	Estoques N (Mg ha ⁻¹)			
PAD	3,84 bA		4,27 bA	0,22
MAR	4,17 bA		4,62 abA	0,23
ILPF	4,26 bA		4,69 abA	0,22
VN	7,11 aA		8,72 aA	0,81

Nota: ¹Sistemas: PAD = Pastagem degradada de *Urochloa decumbens*; MAR = Monocultivo de *Urochloa brizantha* cv. Marandu; ILPF = Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta; VN = Vegetação Nativa.*Os valores representam a média (n =4). Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Kruskal-Wallis (p < 0,05). Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Verificaram-se aumentos consideráveis, na taxa de acúmulo de carbono, ao ano, com incrementos anuais de 1,72 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para o ILPF e de 0,32 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para o MAR. Essa diferença na taxa de acúmulo anual de C pode ser explicada pela maior diversidade presente no sistema ILPF com a presença de árvores consorciadas com o capim marandu. Assim, torna-se importante o monitoramento contínuo dessas áreas para definir com precisão o potencial de acúmulo de C ao longo do tempo.

A mudança de uso do solo de VN em PAD e, em seguida, em sistemas ILPF e MAR, colaborou para o enriquecimento de ¹³C no solo (FIGURA 11).

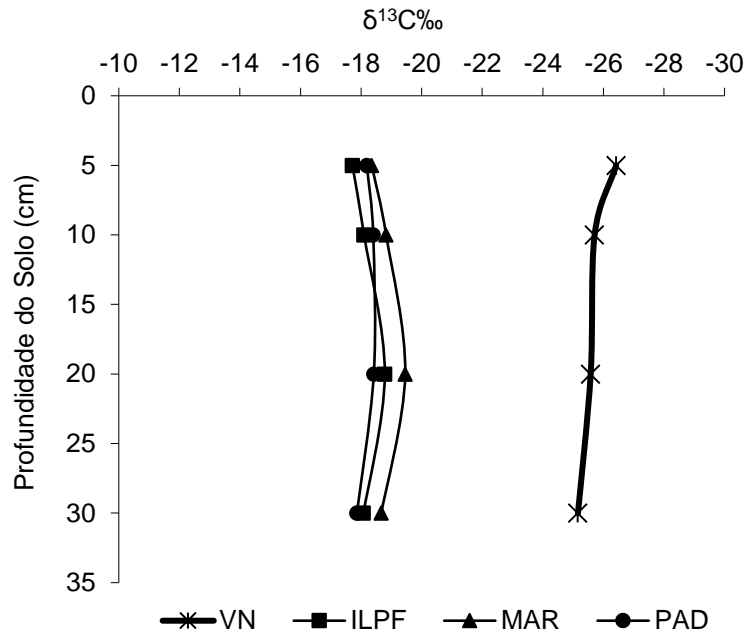
Figura 11 - Estoques de carbono (C) do solo provenientes da vegetação nativa (espécies C₃) e introduzido pela pastagem (espécie C₄) e pelo *Eucalyptus urograndis* (espécie C₃) nos diferentes sistemas de uso do solo em área de Cerradão localizada no município de Curvelo/MG



Nota: VN = Vegetação Nativa; ILPF = Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta; MAR = Monocultivo de *Urochloa brizantha* cv. Marandu; PAD = Pastagem degradada de *Urochloa decumbens*. Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Os valores menos negativos de $\delta^{13}\text{C}$ denota maior proporção de C introduzido por espécies C₄ nos sistemas (FIGURA 12).

Figura 12 - Variação natural de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) nos diferentes sistemas de uso do solo em área de Cerradão em Curvelo/MG



Nota: VN = Vegetação Nativa; ILPF = Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta; MAR = Monocultivo de *Urochloa brizantha* cv. Marandu; PAD = Pastagem degradada de *Urochloa decumbens*. Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Esse resultado se deve à introdução de gramíneas forrageiras com ciclo fotossintético C_4 e maior abundância natural de ^{13}C em comparação com plantas do ciclo fotossintético C_3 . Foi encontrado aumento nos estoques de C_3 e C_4 do solo, após a mudança de uso do solo do sistema PAD em MAR e ILPF, em todas as profundidades (TABELA 8).

O sistema ILPF apresentou maior contribuição das espécies C_4 , nos estoques de C do solo, na camada de 0-30 cm de profundidade ($47,63 \text{ Mg ha}^{-1}$), em relação ao MAR ($39,83 \text{ Mg ha}^{-1}$), com uma diferença de $7,80 \text{ Mg ha}^{-1}$ (TABELA 8).

Tabela 8 - Abundância natural de ^{13}C e carbono derivado das espécies C_3 e C_4 nos diferentes sistemas de uso da terra em área de Cerradão localizada no município de Curvelo/MG

¹ Sistemas	Profundidade solo cm	Estoque C Mg ha ⁻¹	$\delta^{13}\text{C}$ ‰	C_3 ----Mg ha ⁻¹ ----	C_4	C_3 -----%-----	C_4
ILPF	0 – 5	14,87	-17,71	4,01	10,86	26,95	73,05
	5 – 10	13,65	-18,10	4,38	9,27	32,09	67,91
	10 – 20	25,19	-18,78	9,74	15,45	38,67	61,33
	20 – 30	18,13	-18,08	6,09	12,05	33,56	66,44
MAR	0 – 5	13,27	-18,35	4,29	8,98	32,31	67,69
	5 – 10	12,90	-18,83	4,98	7,93	38,58	61,42
	10 – 20	21,97	-19,46	9,83	12,14	44,76	55,24
	20 – 30	17,70	-18,67	6,92	10,78	39,09	60,91
PAD	0 – 5	12,74	-18,19	3,95	8,80	30,97	69,03
	5 – 10	10,54	-18,40	3,67	6,87	34,82	65,18
	10 – 20	19,76	-18,42	7,00	12,76	35,42	64,58
	20 – 30	16,23	-17,86	5,12	11,11	31,54	68,46

Nota: ¹Sistemas: PAD = Pastagem degradada de *Urochloa decumbens*; MAR = Monocultivo de *Urochloa brizantha* cv. Marandu; ILPF = Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta; VN = Vegetação Nativa. Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Quanto ao teor de C e N associado às frações húmicas da MOS, não foi observada diferença com a mudança de uso do solo do sistema PAD para os sistemas ILPF e MAR (TABELA 9). A soma da fração ácido húmico, na camada de 0-20 cm de profundidade, variou de 7,25 a 18,26 g kg⁻¹ e foi numericamente maior que a fração ácido fúlvico, com valores oscilando entre 6,3 a 9,4 g kg⁻¹, entre os sistemas. Os teores de C da fração humina foram maiores, em relação às outras duas frações solúveis (FAH e FAF), com valores oscilando entre 36,9 e 77,8 g kg⁻¹ na camada de 0-20 cm profundidade (TABELA 9).

Tabela 9 - Teores de carbono orgânico (CO) e nitrogênio (N) das frações ácido fúlvico (FAF), ácido húmico (FAH), humina (HUM), relação C:N das frações, relação FAH/FAF, relação (FAH+FAF)/HUM e índice de humificação (C-IH e N-IH) da matéria orgânica do solo (MOS), em diferentes sistemas de uso da terra, em área de Cerradão localizada no município de Curvelo/MG

¹Sistemas	Profundidade do Solo (cm)								
	0-5	5-10	10-20	0-5	5-10	10-20	0-5	5-10	10-20
	CO-FAF (g kg ⁻¹)			N-FAF (g kg ⁻¹)			C:N FAF		
PAD	3,00 ab*	1,98 a	1,71 a	0,45 ab	0,39 ab	0,36 a	6,62 a	5,07 a	4,91 a
MAR	2,86 ab	2,91 a	2,68 a	0,38 ab	0,45 ab	0,29 a	7,57 a	6,41 a	9,22 a
ILPF	2,49 b	1,98 a	1,85 a	0,30 b	0,32 b	0,39 a	9,95 a	6,13 a	4,89 a
VN	4,84 a	2,58 a	1,94 a	0,84 a	0,65 a	0,42 a	5,77 a	4,05 a	4,76 a
	CO-FAH (g kg ⁻¹)			N-FAH (g kg ⁻¹)			C:N FAH		
PAD	2,68 b	2,53 b	2,05 b	0,55 ab	0,49 ab	0,19 b	5,07 b	5,28 b	10,53 a
MAR	4,64 ab	4,35 ab	3,72 ab	0,55 ab	0,52 ab	0,55 ab	8,48 ab	8,55 ab	6,93 a
ILPF	4,30 ab	3,96 ab	3,29 ab	0,39 b	0,45 b	0,45 ab	13,09 a	9,02 a	7,81 a
VN	6,82 a	5,94 a	5,80 a	0,84 a	0,78 a	0,65 a	8,14 ab	7,67 ab	8,97 a
	CO-HUM (g kg ⁻¹)			N-HUM (g kg ⁻¹)			C:N HUM		
PAD	14,32 b	12,32 b	10,27 b	0,88 b	0,79 b	0,58 b	16,42 a	15,64 ab	17,90 ab
MAR	17,55 ab	17,69 ab	14,28 ab	1,07 ab	0,90 ab	0,84 ab	16,54 a	19,58 a	17,04 ab
ILPF	19,83 ab	17,11 ab	15,28 ab	1,52 ab	1,28 ab	0,50 b	13,14 a	13,39 ab	31,40 a
VN	37,30 a	22,57 a	17,90 a	2,73 a	1,78 a	1,16 a	13,67 a	12,71 b	15,63 b
	C - FAH /FAF			N - FAH /FAF			C - IH (%)		
PAD	0,90 b	1,40 a	1,21 b	1,21 a	1,30 a	0,56 b	12,61 ab	14,86 a	13,07 b
MAR	1,73 ab	1,66 a	1,75 ab	1,50 a	1,14 a	2,07 a	17,90 a	18,48 a	19,93 a
ILPF	1,80 a	2,23 a	1,78 ab	1,40 a	1,40 a	1,23 ab	15,79 ab	17,40 a	16,74 ab
VN	1,43 ab	2,34 a	3,11 a	1,00 a	1,21 a	1,56 ab	11,46 b	15,12 a	18,16 ab
	C - (FAH +FAF)/HUM			N - (FAH +FAF)/HUM			N - IH (%)		
PAD	0,40 a	0,37 a	0,37 a	1,14 a	1,11 a	0,96 ab	37,20 a	39,40 a	17,15 b
MAR	0,43 a	0,41 a	0,45 a	0,88 ab	1,08 a	1,01 ab	30,12 a	32,18 ab	40,82 a
ILPF	0,34 a	0,35 a	0,33 a	0,44 b	0,61 b	1,72 b	23,43 a	30,58 ab	34,81 ab
VN	0,32 a	0,38 a	0,44 a	0,62 ab	0,80 ab	0,93 a	20,43 a	25,55 b	26,10 ab

Nota: ¹Sistemas: PAD = Pastagem degradada de *Urochloa decumbens*; MAR = Monocultivo de *Urochloa brizantha* cv. Marandu; ILPF = Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta; VN = Vegetação Nativa. *Os valores representam a média (n =4). Médias seguidas pela mesma letra na mesma coluna, para cada variável avaliada, não diferem entre si pelo teste Kruskal-Wallis (p < 0,05). Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Entre os sistemas, a VN obteve os maiores valores de C, nas frações húmicas do solo, seguidas dos sistemas ILPF e MAR. Observou-se redução das frações húmicas do solo, ao converter VN em PAD e aumento com a mudança de uso do solo de PAD para os sistemas ILPF e MAR. Isso é justificado pela maior presença de material orgânico oferecido, pela serapilheira das árvores e raízes do capim-marandu, aos microrganismos e associação de boas práticas de manejo do solo.

Para a relação C/N (TABELA 9), foram observados valores da fração humina entre 12,71 e 31,40, já para a fração ácido húmico, os valores variaram de 5,07 a 13,09, enquanto, para a fração ácido fúlvico, os valores oscilaram entre 4,04 a 9,95. Desta forma, percebeu-se diminuição da relação C/N, nas frações solúveis do solo, o que pode significar estabilização da MOS por apresentar relação C/N próximas aos microrganismos (9:1), além de facilitar a disponibilização de nutrientes, como o nitrogênio, aos microrganismos e ao solo.

No geral, para a relação C - FAH/FAF e N - FAH /FAF, foram constatados valores acima de 1 para todos os sistemas estudados, o que sugere que a matéria orgânica do solo está sendo humificada por processos de polimerização com possíveis transformações de ácidos fúlvicos em ácidos húmicos, culminando em maior estabilidade no solo e ou lixiviação e decomposição da fração ácido fúlvico no solo. Isso é ratificado com os resultados da relação C e N-(HAF+FAF)/HUM, que apresentaram valores menores que 1, indicando maior proporção de C e N na fração humina, exceto para o N do sistema PAD e MAR (5 – 10 e 10 – 20 cm) e ILPF (10 – 20 cm), (TABELA 9).

Em relação ao C do índice de humificação (IH) da MOS, observou-se maior valor para o sistema MAR (56,31%) na camada de 0-20 cm de profundidade, o que pode estar relacionado à presença abundante de raízes do capim-marandu, uma vez que, após senescência, as raízes se tornam resíduos vegetais e ativam a biomassa decompositora (TABELA 9). Não houve diferenças estatísticas entre os sistemas VN, MAR e ILPF. No geral, observa-se aumento do IH com a introdução dos sistemas MAR e ILPF, o que denota maior recalcitrância da MOS nesses sistemas. Nota-se o aumento das fração ácido húmico, nesses sistemas, mostrando a importância de boas práticas de manejo do solo.

4.3.4 Discussão

A mudança de uso do solo de pastagem degradada e introdução dos sistemas integração lavoura-pecuária-floresta e monocultivo de Marandu, conduzidos com boas práticas de manejo, melhoraram a qualidade do solo, resultando em aumento dos estoques de carbono e nitrogênio dentro do bioma Cerrado.

De acordo com os resultados, a mudança de uso do solo de PAD em sistemas ILPF e MAR aumentaram os teores de C e N do solo (TABELA 6). Figueiredo *et al.* (2017) mostraram que a mudança de uso do solo de pastagem degradada em sistema ILPF, além de fornecer melhorias de pastagens, podem também contribuir para a redução das emissões de GEE e fornecer entradas de C ao solo.

Os sistemas ILPF e MAR promoveram aumentos nos estoques de C e N do solo ao longo do tempo. Segundo Giusti *et al.* (2019), sistemas agroflorestais, se manejados adequadamente, podem emitir menos GEE que os sistemas convencionais de uso do solo, contribuindo com a mitigação das mudanças climáticas.

Os resultados mostraram que os sistemas ILPF e MAR proporcionaram incrementos nos estoques de C e N no solo (FIGURA 11). Conforme Santana *et al.* (2016), a mudança de uso do solo de áreas

degradadas em sistema silvipastoril promove melhorias dos atributos físicos e químicos do solo, indicando o potencial desses sistemas em recuperar áreas de pastagens degradadas.

Da mesma forma, Aryal et al. (2019) verificaram que sistemas silvipastoris têm grandes potenciais de armazenamento de carbono acima e abaixo do solo e sua atividade é importante para reduzir as emissões de GEE.

A taxa de acúmulo de carbono (TABELA 7) mostrou que houve aumento do estoque de C do solo no sistema ILPF. Isso pode ser atribuído, principalmente, à maior biodiversidade florística resultante da integração da cultura anual de milho e posterior implantação do capim-marandu e eucalipto.

Conforme relatado por Tonucci et al. (2017), a introdução de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no bioma Cerrado aumenta o estoque de carbono com a presença de diferentes componentes que aumentam o volume radicular e promovem maior produção de biomassa vegetal. Outros estudos sugeriram que a mudança de uso do solo de sistemas convencionais, em sistemas conservacionistas, usando espécies arbóreas contribuíram com aumentos nos estoques de C (Don et al. 2011; Shi et al. 2013), além de preservar o C e N do solo e reduzir as emissões de CO₂ para a atmosfera (Cubbage et al. 2012).

De acordo com os resultados de abundância natural de ¹³C nos sistemas avaliados, observou-se maior proporção de C introduzido por espécies C₄ nos sistemas avaliados (TABELA 8). Isso ocorreu em virtude do tempo de ocupação do solo com pastagem sem manejo de *Urochloa decumbens* antes de serem introduzidos os sistemas ILPF e MAR.

Segundo Oliveira et al. (2018), o maior enriquecimento de ¹³C, na camada superficial do solo no sistema ILPF, foi observado, em razão do estabelecimento do capim-marandu (espécie C₄), sendo mais pronunciado na posição central do arranjo do sistema e afastando-se das árvores.

Conforme observado no presente estudo, Santos et al. (2019) também observaram um aumento na abundância de ¹³C, após a mudança de uso do solo de uma floresta de Mata Atlântica, em pastagem de *Urochloa brizantha* cultivar marandu.

Os resultados indicaram que o sistema ILPF contribuiu para o incremento nos estoques de C do solo, em virtude de cultivo sucessivo da espécie C₄. Isso pode ser explicado também pelo efeito de sombra das árvores presentes no sistema ILPF que proporcionaram ambiente favorável ao crescimento radicular e incorporação de carbono ao solo pelos microrganismos decompositores.

Resultados semelhantes foram encontrados por Tonucci et al. (2017), após mudança de uso do solo de monocultivo de espécie C₃ (arroz e soja) em ILPF com capim-marandu como componente forrageiro. Sant-Anna et al. (2017), ao substituir uma área de Cerrado *Strictu sensu*, em um sistema integrado com pastagens e culturas agrícolas, também constataram que houve um enriquecimento de ¹³C, na camada superficial do solo, com diminuição dos valores com o aumento da profundidade.

A adoção de boas práticas de manejo do solo aos sistemas ILPF e MAR possibilitou aumentos dos teores de C e N, nas frações húmicas da MOS, não apresentando diferença da VN (TABELA 9). Isso pode ser explicado pela ausência de revolvimento do solo desses sistemas e maior deposição de resíduos de plantas (eucalipto e pastagem marandu) ao solo, o que favoreceu a respiração do solo e o consumo de C do resíduo. Parte do C é mineralizado pela biomassa microbiana, enquanto formas de C mais estáveis (ácido húmico), ligadas à fração mineral do solo, permanece protegida em agregados do solo (Gmach et al. 2018).

Além disso, o aumento dos teores de C e N das frações húmicas dos sistemas ILPF e MAR podem indicar maior estabilidade desses elementos na MOS e redução do C-CO₂ para a atmosfera, contribuindo com a sustentabilidade do solo (Pegoraro et al. 2018).

Em relação ao índice de humificação (IH), foi observado maior percentual na profundidade de 0 – 20 cm no sistema MAR (56.31%), seguido do sistema ILPF (49.95%), (TABELA 9). A introdução desses sistemas apoiado por boas práticas de manejo melhoram a retenção de água no solo, protegem o solo da irradiação solar direta, além de diminuir a temperatura na superfície do solo, os quais atuam para reduzir a taxa de mineralização do MOS nativa. O IH reflete o grau de humificação da MOS, valores maiores correspondem a uma proporção maior de estruturas estáveis na MOS que contribuem para a manutenção das características físicas, químicas e biológicas do solo (Guimarães et al. 2013; Romero et al. 2014).

No presente estudo, a maior parte do C das frações húmicas foi encontrado na fração humina em todos os sistemas e maiores valores na VN (TABELA 9). Esse sistema apresenta contínua adição de material orgânico e ausência de revolvimento do solo, o que confere proteção contra a oxidação do C presente na MOS (Kotzé et al. 2016).

Não foram verificadas diferenças estatísticas entre VN, ILPF e MAR, o que evidencia a contribuição desses sistemas em acumular carbono, em frações mais estáveis do solo, já que o manejo melhora a retenção de água no solo, protege o solo da irradiação solar direta e reduz a temperatura do solo, reduz a taxa de mineralização da MOS nativa e contribui com a mitigação das mudanças climáticas.

A relação entre os ácidos húmicos e fúlvicos (FAH/FAF) representa a mobilidade do C presente na MOS solúvel e mais estável (TABELA 9). Desta forma, alterações nesta relação podem indicar transformação da qualidade química e perda da MOS, causada pela mudança de uso e cobertura do solo, por meio da exposição da MOS protegida nos agregados do solo a agentes oxidantes (Rosa et al. 2017; Gmach et al. 2018). Os resultados demonstraram predominância de ácidos húmicos na fração solúvel (TABELA 9), indicando redução e ou perda por mineralização ou lixiviação dos ácidos fúlvicos (fração mais lábil) nos sistemas ILPF e MAR (Caetano et al. 2013; Segnini et al. 2013).

A predominância da fração humina em comparação à fração solúvel do solo foi observada na relação (FAH+FAF)/HUM com valores abaixo de 1 (TABELA 9), o que está em conformidade ao observado na literatura, para solos com maiores teores de argila, como os Latossolos, em que há maior deposição e predominância da fração humina em todo perfil do solo (Bezerra et al. 2013; Caetano et al. 2013; Campos et al. 2013; Guareschi et al. 2013; Rosset et al. 2016; Zaninetti et al. 2016; Rosa et al. 2017).

4.2.5 Conclusão

A adoção de sistemas agrossilvipastoris e introdução de pastagem bem manejada promoveram aumento nos teores e estoques de COS e NT.

Os sistemas ILPF e MAR contribuíram com a estocagem de C e N nas frações humificadas da MOS.

A introdução da espécie *Eucalyptus urograndis* e *Urochloa brizantha* cv. Marandu promoveram aumentos nos estoques de C do solo oriundo de espécies C₃ e C₄.

4.2.6 Referências

- Alvarez V, Novaes R, Barros N, Cantarutti R, Lopes A (1999) Interpretação dos resultados das análises de solos. "Ribeiro, A.C., Guimarães, P.T.G., Alvarez V. Recomendação para o uso corretivo e Fertil. em Minas Gerais." pp. 25–32. (Viçosa)
- Alvim MJ, Botrel M de A, Xavier DF (2002) As principais espécies de Brachiaria utilizada no país. EMBRAPA Gado de Leite. *Ministério da Agric. Pecuária e Abast. - Comun. Técnico* 22 3–6. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/65321/1/COT-22-As-principais-especies-de.pdf>.
- Aryal D, Gómez-González R, Hernández-Nuriasmú R, Morales-Ruiz D (2019) Carbon stocks and tree diversity in scattered tree silvopastoral systems in Chiapas, Mexico. *Agroforestry Systems* **93**, 213–227. doi:10.1007/s10457-018-0310-y.
- Assis, PCR; Stone, LF; Medeiros, JC; Madari, BE; Oliveira, JM; Wruck F (2015) Atributos físicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* **19**, 309–316. doi:10.1590/1807-1929/agriambi.v19n4p309-316.
- Balbino LC, Cordeiro LAM, Porfirio-da-Silva V, de Moraes A, Martínez GB, Alvarenga RC, Kichel AN, Fontaneli RS, dos Santos HP, Franchini JC, Galerani PR (2011) Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* **46**, 1–12. doi:10.1590/s0100-204x2011001000001.
- Baldotto MA, Vieira EM, De Oliveira Souza D, Baldotto LEB (2015) Estoque e frações de carbono orgânico e fertilidade de solo sob floresta, agricultura e pecuária. *Revista Ceres* **62**, 301–309. doi:10.1590/0034-737X201562030010.
- Bernoux M, Cerri CC, Neill C, Moraes JFL De (1998) The use of stable carbon isotopes for estimating soil organic matter turnover rates. **82**, 43–58.
- Bezerra RPM, Loss A, Pereira MG, Perin A (2013) Formas de carbono em latossolo sob sistemas de plantio direto e integração lavoura-pecuária no cerrado, Goiás. *Semina: Ciências Agrárias* **34**, 2637–2654. doi:10.5433/1679-0359.2013v34n6p2637.
- Bremner JM, Mulvaney CS (1982) "Nitrogen-total. In Methods of Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Page, A.L., Miller, R.H. and Keeney, D.R. Eds., American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, 595-624."
- Buzhdygan OY, Meyer ST, Weisser WW, Eisenhauer N, Ebeling A, Borrett SR, Buchmann N, Scherer-lorenzen M, Scheu S, Schmid B, Steinauer K, Strecker T, Tietjen B, Vogel A, Weigelt A, Petermann JS (2020) Biodiversity increases multitrophic energy use efficiency, flow and storage in grasslands. *Nature, Ecology & Evolution* **4**, 393–405. doi:10.1038/s41559-020-1123-8.
- Caetano JO, Benites V de M, Silva GP, da Silva IR, de Assis RL, Cargnelutti Filho A (2013) Dinâmica da matéria orgânica de um neossolo quartzarênico de cerrado convertido para cultivo em sucessão de soja e milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **37**, 1245–1255. doi:10.1590/S0100-06832013000500014.
- Campos LP, Leite LFC, Maciel GA, Brasil EL, Iwata B de F (2013) Estoques e frações de carbono orgânico em latossolo amarelo submetido a diferentes sistemas de manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* **48**, 304–312. doi:10.1590/S0100-204X2013000300009.
- Cubbage F, Balmelli G, Bussoni A, Noellemeyer E, Pachas AN, Fassola H, Colcombet L, Rossner B, Frey G, Dube F, de Silva ML, Stevenson H, Hamilton J, Hubbard W (2012) Comparing silvopastoral systems and prospects in eight regions of the world. *Agroforestry Systems* **86**, 303–314. doi:10.1007/s10457-012-9482-z.
- Ding Z, Kheir AMS, Ali MGM, Ali OAM, Abdelaal AIN, Lin X, Zhou Z, Wang B, Liu B, He Z (2020) The integrated effect of salinity, organic amendments, phosphorus fertilizers, and deficit irrigation on soil properties, phosphorus fractionation and wheat productivity. *Scientific reports, Nature research* **10**, 1–13. doi:10.1038/s41598-020-59650-8.
- Don A, Schumacher J, Freibauer A (2011) Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks - a meta-analysis. *Global Change Biology* **17**, 1658–1670. doi:10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x.
- Ellert, B.H.; Bettany, J.R (1996) Calculation of a organic matter and nutrients stored in soil under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science* **75**, p.529-538.

- Embrapa (1997) “Manual de Métodos de Análise de Solos / Centro Nacional de Pesquisa de Solo.”
- Embrapa (2017) **Manual de métodos de análise de solo**. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, pp 574. ISBN 978-85-7035-771-7
- Feliciano D, Ledo A, Hillier J, Nayak DR (2018) Which agroforestry options give the greatest soil and above ground carbon benefits in different world regions? *Agriculture, Ecosystems and Environment* **254**, 117–129. doi:10.1016/j.agee.2017.11.032.
- Figueiredo EB, Jayasundara S, de Oliveira Bordonal R, Berchielli TT, Reis RA, Wagner-Riddle C, La Scala N (2017) Greenhouse gas balance and carbon footprint of beef cattle in three contrasting pasture-management systems in Brazil. *Journal of Cleaner Production* **142**, 420–431. doi:10.1016/j.jclepro.2016.03.132.
- Franzuebbers AJ (2002) Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil and Tillage Research* **66**, 95–106. doi:10.1016/S0167-1987(02)00018-1.
- Freitas IC (2016) Atributos físicos, químicos e estoques de carbono e nitrogênio do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo na mesorregião central mineira. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).
- Giusti G, Kristjanson P, Rufino MC (2019) Agroforestry as a climate change mitigation practice in smallholder farming: evidence from Kenya. *Climatic Change* **143**, 379–394. doi:10.1007/s10584-019-02390-0.
- Gmach MR, Dias BO, Silva CA, Nóbrega JCA, Lustosa-Filho JF, Siqueira-Neto M (2018) Soil organic matter dynamics and land-use change on Oxisols in the Cerrado, Brazil. *Geoderma Regional* **14**, e00178. doi:10.1016/j.geodrs.2018.e00178.
- Guareschi RF, Pereira MG, Perin A (2013) Frações da matéria orgânica em áreas de Latossolo sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado do estado de Goiás. *Semina: Ciências Agrárias* **34**, 2615–2628. doi:10.5433/1679-0359.2013v34n6p2615.
- Guimarães DV, Gonzaga MIS, da Silva TO, da Silva TL, da Silva Dias N, Matias MIS (2013) Soil organic matter pools and carbon fractions in soil under different land uses. *Soil and Tillage Research* **126**, 177–182. doi:10.1016/j.still.2012.07.010.
- INMET (2019) Instituto Nacional De Meteorologia. Clima, Estação e Dados, Dados Históricos. <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>.
- Kotzé E, Loke PF, Akhosi-Setaka MC, Du Preez CC (2016) Land use change affecting soil humic substances in three semi-arid agro-ecosystems in South Africa. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **216**, 194–202. doi:10.1016/j.agee.2015.10.007.
- Lorenz K, Lal R (2014) Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development* **34**, 443–454. doi:10.1007/s13593-014-0212-y.
- Montanarella L, Pennock DJ, McKenzie N, Badraoui M, Chude V, Baptista I, Mamo T, Yemefack M, Aulakh MS, Yagi K, Hong SY, Vijarnsorn P, Zhang GL, Arrouays D, Black H, Krasilnikov P, Sobocká J, Alegre J, Henriquez CR, Mendonça-Santos M de L, Taboada M, Espinosa-Victoria D, AlShankiti A, AlaviPanah SK, Mustafa Elsheikh EA El, Hempel J, Arbestain MC, Nachtergaele F, Vargas R (2016) World's soils are under threat. *Soil* **2**, 79–82. doi:10.5194/soil-2-79-2016.
- Moraes JFL, Volkoff B, Cerri CC, Bernoux M (1996) Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. *Geoderma* **70**, 63–81. doi:10.1016/0016-7061(95)00072-0.
- O'leary MH (1988) Carbon Isotopes Photosyn Fractionation techniques may reveal new aspects of carbon dynamics in plants. *BioScience* **38**, 328–336.
- Oliveira J de M, Madari BE, Carvalho MT de M, Assis PCR, Silveira ALR, Lima ML, Wruck FJ, Medeiros JC, Machado PLO de A (2018) Integrated farming systems for improving soil carbon balance in the southern Amazon of Brazil. *Regional Environmental Change* **18**, 105–116. doi:10.1007/s10113-017-1146-0.
- Otoni TJO, Pereira IM, de Oliveira MLR, Machado ELM, Farnezi MM, Mota S da LL (2013) Componente arbóreo, estrutura fitossociológica e relações ambientais em um remanescente de cerradão, Em Curvelo - MG. *Cerne* **19**, 201–211. doi:10.1590/S0104-77602013000200004.

- Pegoraro RF, Moreira CG, Dias DG, Silveira TC (2018) Carbon and nitrogen stocks in the soil and humic substances of agricultural crops in the semi-arid region. *Revista Ciência Agronômica* **49**, 574–583. doi:10.5935/1806-6690.20180065.
- R Core Team (2018) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Romero CM, Noe L, Abril A, Rampoldi EA (2014) Resilience of humification process to evaluate soil recovery in a semiarid agroecosystem of Central Argentina. *Spanish Journal of Soil Science* **4**, 211–224. doi:10.3232/SJSS.2014.V4.N3.01.
- Rosa DM, Nóbrega LHP, Mauli, Lima G piccolo de, Pacheco FP (2017) Humic substances in soil cultivated with cover crops rotated with maize and soybean. *Revista Ciência Agronômica* **48**, 221–230. doi:10.5935/1806-6690.20170026.
- Rosset JS, Lana M do C, Pereira MG, Schiavo JA, Rampim L, Sarto MVM (2016) Frações químicas e oxidáveis da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo, em Latossolo Vermelho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* **51**, 1529–1538. doi:10.1590/S0100-204X2016000900052.
- Sanderman J, Hengl T, Fiske GJ (2017) Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **114**, 9575–9580. doi:10.1073/pnas.1706103114.
- Sant-Anna SAC de, Jantalia CP, Sá JM, Vilela L, Marchão RL, Alves BJR, Urquiaga S, Boddey RM (2017) Changes in soil organic carbon during 22 years of pastures, cropping or integrated crop/livestock systems in the Brazilian Cerrado. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **108**, 101–120. doi:10.1007/s10705-016-9812-z.
- Santana PHL, Frazão LA, Santos LDT, Fernandes LA, Sampaio RA (2016) Soil Attributes and Production of Eucalyptus in Monoculture and Silvopastoral Systems in the North of Minas Gerais, Brazil. *Journal of Agricultural Science and Technology B* **6**, 361–370. doi:10.17265/2161-6264/2016.06.001.
- Santos CA, Rezende CP, Machado Pinheiro EF, Pereira JM, Alves BJR, Urquiaga S, Boddey RM (2019) Changes in soil carbon stocks after land-use change from native vegetation to pastures in the Atlantic forest region of Brazil. *Geoderma* **337**, 394–401. doi:10.1016/j.geoderma.2018.09.045.
- Segnini A, Carvalho JLN, Bolonhezi D, Milori DMBP, da Silva WTL, Simões ML, Cantarella H, de Maria IC, Martin-Neto L (2013) Carbon stock and humification index of organic matter affected by sugarcane straw and soil management. *Scientia Agricola* **70**, 321–326. doi:10.1590/S0103-90162013000500006.
- Shi S, Zhang W, Zhang P, Yu Y, Ding F (2013) A synthesis of change in deep soil organic carbon stores with afforestation of agricultural soils. *Forest Ecology and Management* **296**, 53–63. doi:10.1016/j.foreco.2013.01.026.
- Swift RS (1996) Organic matter characterisation. In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabai, M.A., Johnston, C.T., Sumner, M.E. (Eds.), *Soil Science Socie. "Methods Soil Anal. Part 3 – Chem. Methods."*
- Tedesco, M. J.; Gianello, C.; Bissani, C.A.; Bohnen, H. & Volkweiss SJ (1995) "Análise de solo, plantas e outros materiais." (Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul., Ed.). (Porto Alegre)
- Tonucci RG, Nair VD, Ramachandran Nair PK, Garcia R (2017) Grass vs. tree origin of soil organic carbon under different land-use systems in the Brazilian Cerrado. *Plant and Soil* **419**, 281–292. doi:10.1007/s11104-017-3347-1.
- Yeomans JC, Bremner JM (1988) Communications in Soil Science and Plant Analysis A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **19**, 1467–1476.
- Zaninetti RA, Moreira A, Moraes LAC (2016) Atributos físicos, químicos e biológicos de Latossolo Amarelo na conversão de floresta primária para seringueiras na Amazônia. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* **51**, 1061–1068. doi:10.1590/S0100-204X2016000900005.

4.3 Artigo 3 - Simulação de mudanças no carbono orgânico do solo em duas cronossequências de intensificação de uso da terra no Cerrado Mineiro

Este artigo foi elaborado conforme as normas da Revista Geoderma.

Resumo

Sistemas agrossilvipastoris têm o potencial de armazenar carbono orgânico do solo (COS). Contudo, não há estudos de simulação com o modelo Century, para estimar a capacidade de acúmulo de COS, em longo prazo, analisando os efeitos de manejo e das mudanças climáticas em sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF). O objetivo deste estudo foi simular a dinâmica do C do solo, em duas cronossequências de uso da terra, composta por vegetação nativa (VN), pastagem degradada (PAD) e sistema ILPF no Cerrado de Minas Gerais, além de projetar cenários futuros, para verificar o potencial de acúmulo do COS, mediante as alterações climáticas. Os resultados mostraram que o modelo Century simulou de forma confiável os estoques de COS das duas cronossequências. O modelo previu aumento do COS ao converter o sistema PAD (46,04 Mg ha⁻¹ e 42,38 Mg ha⁻¹) em sistemas de ILPF (54,94 Mg ha⁻¹ e 51,71 Mg ha⁻¹) nas cronossequências Francisco Sá e Curvelo, respectivamente. O modelo também previu que a diminuição da precipitação pluviométrica em 20 mm e aumento de temperatura em 2°C das regiões tropicais estudadas poderá causar declínio dos estoques de COS, principalmente, em sistemas degradados, enquanto sistemas agrossilvipastoris apresentariam pouca redução dos estoques de COS. Além disso, os resultados mostraram que a substituição de áreas degradadas, principalmente em solos com textura argilosa, contribui para o aumento dos estoques de COS. Assim, sistemas agrossilvipastoris são potencialmente viáveis para manter a sustentabilidade da agricultura diante das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Modelo Century. Solos degradados. Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. Pastagem. Mudanças climáticas.

Abstract

Agrosilvipastoral systems have the potential to store soil organic carbon (SOC). However, there are no simulation studies with the Century model to estimate the long-term SOC accumulation capacity, analyzing the effects of management and climate change on productivity in crop-livestock-forest (ICLF) integration systems. The main of this study was to simulate soil C dynamics in two chronosequences of land use composed of native vegetation (NV), degraded pasture (DPA) and ICLF system in the Cerrado of Minas Gerais, in addition to project future scenarios to verify the potential of accumulation of SOC through climate change. The results showed that the Century model reliably simulated the SOC stocks of the two chronosequences. The model predicted an increase of SOC by converting the DPA system (46.04 Mg ha⁻¹ and 42.38 Mg ha⁻¹) into ILPF systems (54.94 Mg ha⁻¹ and 51.71 Mg ha⁻¹) in chronosequences Francisco Sá and Curvelo, respectively. The model also predicted that a 20 mm decrease in rainfall and a 2 °C increase in temperature in the studied tropical regions could cause a decline in SOC stocks, especially in degraded systems, while agrosilvipastoral systems would show little reduction in SOC stocks. In addition,

the results showed that the replacement of degraded areas, especially in soils with a clay texture, contributes to the increase in SOC stocks. Thus, agrosilvopastoral systems are potentially viable to maintain the sustainability of agriculture in the face of climate change.

Keywords: Century model. Degraded soils. Crop-livestock-forest integration systems. Pasture. Climate change.

4.3.1 Introdução

O aumento das concentrações de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, nas últimas décadas, tem sido objeto de inúmeros estudos sobre as mudanças climáticas e, em especial, o CO₂, que é emitido para a atmosfera, quando áreas de vegetação nativa são convertidas em áreas agrícolas, as quais são apontadas como um dos principais fatores, no setor agrícola, responsáveis pela emissão de carbono para a atmosfera (Carvalho et al., 2014; Fujisaki et al., 2015; Durigan et al., 2017; Cerri et al., 2018).

Uma das estratégias, para mitigar as mudanças climáticas, por meio do acúmulo de carbono no solo, é identificar solos que estão com baixos estoques de carbono, como solos erodidos e em estágios de degradação e convertê-los em sistemas agrícolas sustentáveis (Lal, 2019). A mudança de uso de solos degradados para sistemas sustentáveis assume grande relevância por aumentar o potencial de captura, armazenamento e sequestro de carbono atmosférico, mitigando GEE (Minasny et al., 2017; Yang et al., 2019).

Neste sentido, sistemas diversificados e intensificados, como os sistemas agrossilvipastoris, que integram lavoura, pecuária e floresta em uma mesma área, com interação e sustentabilidade entre esses componentes, têm o potencial de sequestrar CO₂ atmosférico e acumular carbono orgânico no solo (COS) com maior eficiência do que sistemas convencionais agrícolas (Lorenz e Lal 2014).

Além disso, como o potencial de acúmulo de C de um solo está diretamente relacionado às condições climáticas (temperatura e precipitação pluviométrica), às características físico-químicas (textura e mineralogia) e ao tipo de cobertura vegetal (Brandani et al., 2015), a aplicação de modelos que estimam a capacidade dos solos de acumular C podem complementar estudos da dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS).

Nessa perspectiva, podem-se comparar dados modelados de diferentes condições edafoclimáticas e estratégias de manejo com observações experimentais em longo prazo ou estudos de cronossequências, servindo como estratégias para tomadas de decisões.

Desta forma, o modelo Century é utilizado para avaliar, em longo, prazo a dinâmica da MOS e nutrientes, fornecendo ferramentas para a análise dos efeitos do manejo e das mudanças climáticas na produtividade e sustentabilidade em diferentes agroecossistemas (Parton et al., 1988). O modelo simula os compartimentos ativo, lento e passivo que são diretamente afetados por fatores edafoclimáticos (por exemplo, temperatura, umidade e textura do solo), composição química da serapilheira (lignina / N, C / N) e práticas de manejo que controlam as taxas de decomposição e determinam o fluxo de C entre os compartimentos da MOS (Metherell et al., 1993).

Além disso, o modelo Century simula o compartimento microbiano de superfície relacionado à decomposição da serapilheira da superfície do solo. Os resíduos vegetais acima e abaixo do solo são subdivididos em compartimentos estruturais, relacionado à parede celular dos resíduos vegetais, e metabólicos, referente ao conteúdo intracelular das células vegetais, em função da relação lignina / N no resíduo. Aumentos nesta proporção resultam em mais resíduos, sendo adicionados nos conjuntos estruturais, que apresentam taxas de decomposição mais lentas (Parton et al., 1988).

Inicialmente o modelo Century foi criado, para simular a dinâmica da MOS em agroecossistemas de regiões temperadas (Paustian et al., 1992; Parton e Rasmussen 1994; Smith et al., 1997), porém vários estudos mostram sua aplicabilidade para regiões tropicais (Cerri et al., 2004; Cerri et al., 2007; Bortolon et al., 2011; Brandani et al., 2015; Zani et al., 2018). Além disso, não há estudos de simulação com o modelo Century para estimar a capacidade de acúmulo de COS, em longo prazo, analisando os efeitos de manejo e das mudanças climáticas em sistemas agrossilvipastoris, por serem novos no Brasil.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi simular a dinâmica do COS, em duas cronossequências de intensificação de uso da terra, composta por vegetação nativa (VN), pastagem degradada (PAD), sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e pastagem bem manejada no Cerrado Brasileiro, além de projetar cenários futuros para verificar o comportamento do COS mediante alterações climáticas.

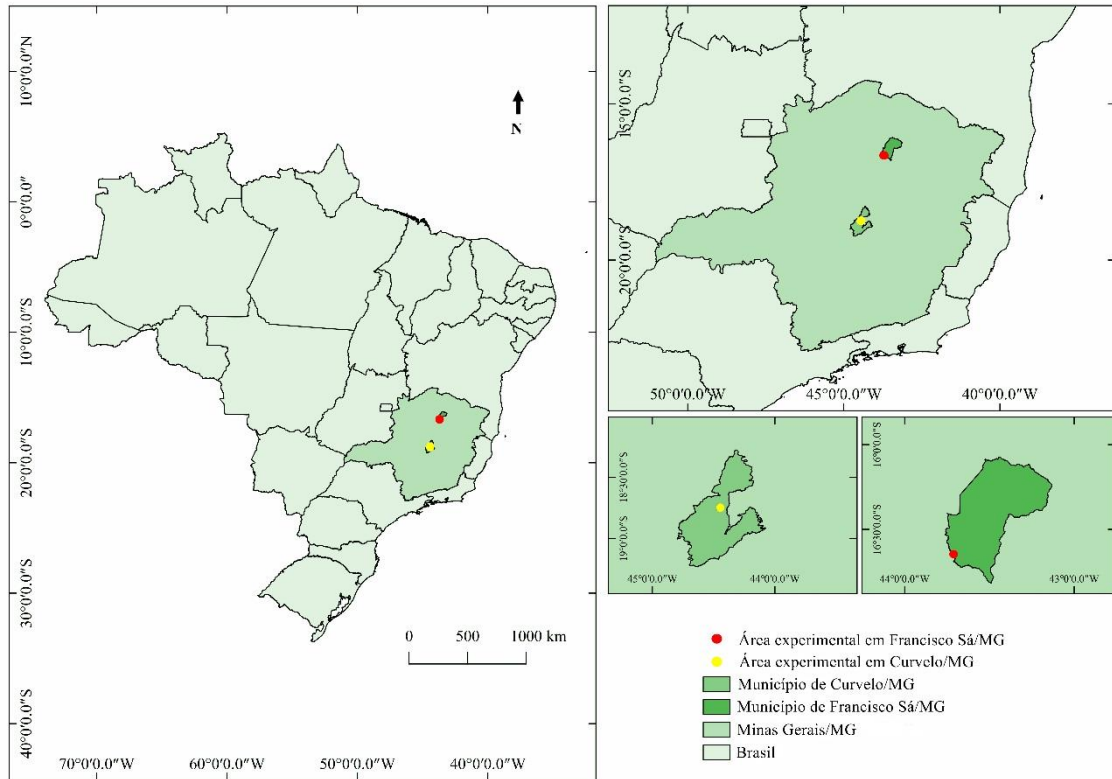
4.3.2 Material e Métodos

4.3.2.1 Descrição das áreas de estudo

4.3.2.1.1 Cronossequência de Francisco Sá, MG

A primeira área de estudo foi selecionada na Fazenda da Barra (16°38'44,02" S e 43°42'43,77" O), localizada no município de Francisco Sá – MG (FIGURA 13), mesorregião Norte do Estado de Minas Gerais e encontra-se em área de transição entre o Cerrado e a Floresta Estacional Semidecidual.

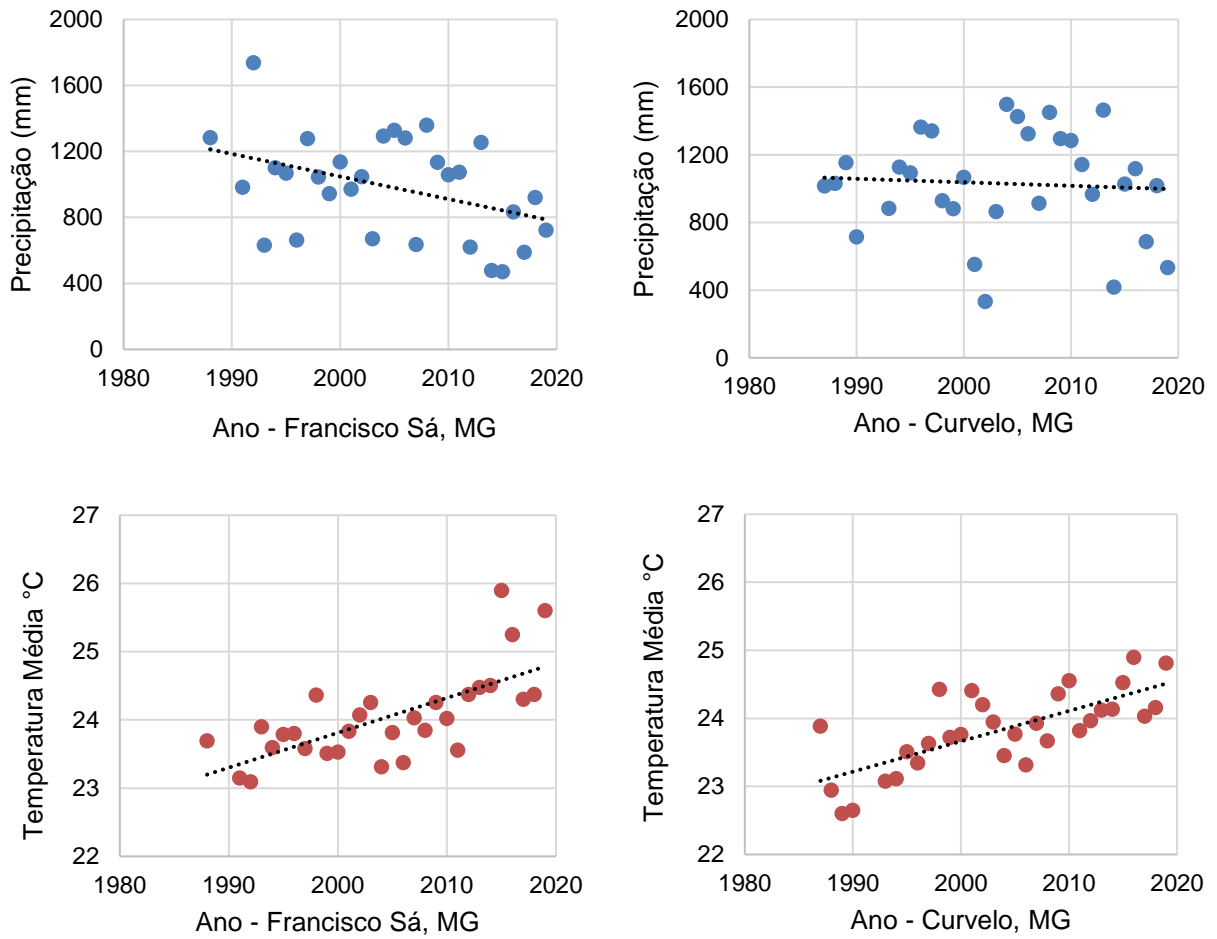
Figura 13 - Localização das áreas de estudo nos municípios de Francisco-Sá e Curvelo no Estado de Minas Gerais, Brasil



Fonte: Adaptado de FREITAS, 2016; ALMEIDA, 2018.

A altitude média da área é de 590 metros, e o índice pluviométrico anual do município, nos últimos 30 anos, foi de 1.003 mm. O clima, segundo classificação de Köppen, é o Tropical de Savana (Aw) com o regime de chuvas caracterizado por duas estações bem definidas e temperatura média oscilando entre 23°C e 26°C (FIGURA 14).

Figura 14 - Precipitação e temperatura mensais, nos últimos 30 anos, nos municípios de Francisco Sá e Curvelo, Minas Gerais, Brasil



Nota: (.....) Linha de tendência para a diminuição da precipitação anual e aumento da temperatura média. Fonte: INMET, 2019.

O solo da área em estudo foi classificado como Cambissolo Háplico eutrófico, textura média (TABELA 10) (Santos et al., 2018).

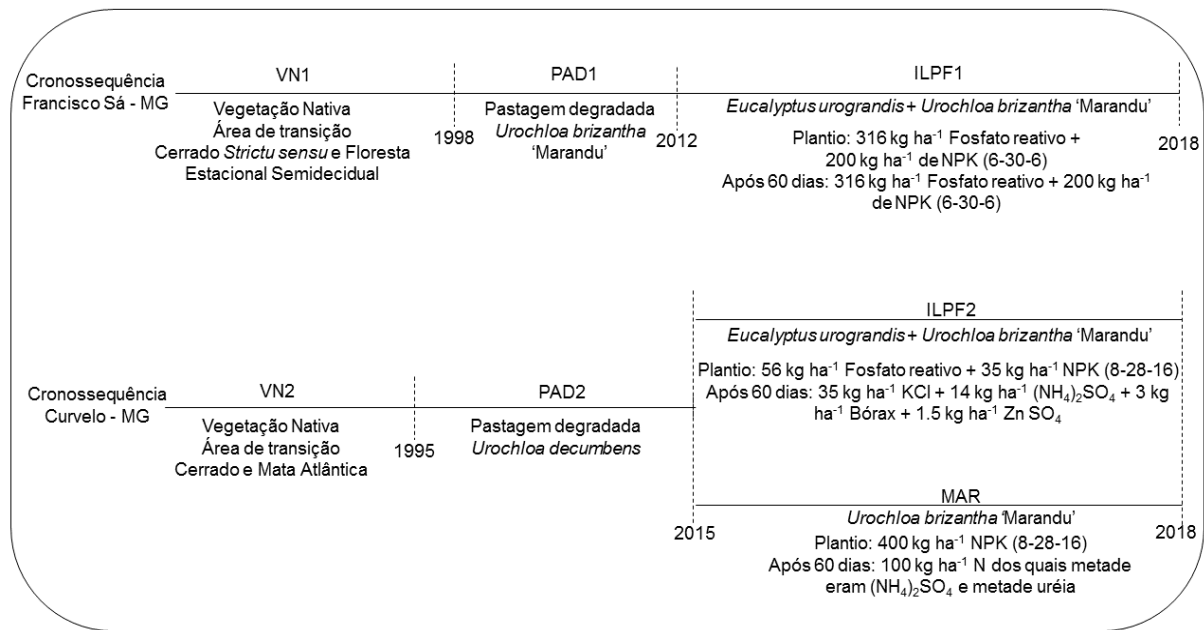
Tabela 10 - Caracterização do solo (0 a 20 cm de profundidade) de duas cronossequências de uso da terra no Cerrado de Minas Gerais, Brasil

Cronossequência	Área de estudo	Textura			Densidade do solo (g cm ⁻³)	pH (H ₂ O)	MO (dag kg ⁻¹)
		Argila	Silte	Areia			
Francisco Sá - MG	VN1	280	300	420	1.29	5.40	4,12
	PAD1	240	240	520	1.38	5.90	2,94
	ILPF1	220	250	530	1.35	5.30	3,23
Curvelo - MG	VN2	524	322	154	1.00	6.11	7,59
	PAD2	686	241	73	1.22	5.33	3,10
	MAR	731	200	69	1.07	5.29	3,93
	ILPF2	684	233	83	1.15	5.84	4,04

Nota: VN1: Vegetação Nativa, PAD1: Pastagem Degradada, ILPF1: Sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta, VN2: Vegetação Nativa, PAD2: Pastagem Degradada, ILPF2: Sistema de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta, e MAR: Monocultivo de pastagem Marandu. Caracterização física realizada de acordo com a metodologia proposta por Embrapa (2017). Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Após a mudança de uso do solo da vegetação nativa de Cerrado, a área experimental foi cultivada, primeiramente, com pastagem de *Urochloa brizantha* cv. Marandu (PAD1), entre 1999 e 2012, e por cerca de 13 anos manteve-se sem manejo adequado, como manutenção da homogeneidade do estande de plantas, adubação, manejo de pragas e doenças, e taxa de lotação de animais pré-definida. O sistema agrosilvipastoril (ILPF1) foi implantado, em outubro de 2012, em que se fez o plantio do material genético de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) e cultivo de sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor*) nas entrelinhas. No início do ano de 2014, o sorgo forrageiro foi plantado juntamente com a pastagem, *Urochloa brizantha* cv. Marandu e, após o seu cultivo, a área foi conduzida como sistema silvipastoril (eucalipto e pastagem). A Figura 15 mostra a cronossequência da área experimental.

Figura 15 - Cronosequência do uso da terra e breve descrição das práticas de manejo dos locais estudados no Cerrado brasileiro



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

4.3.2.1.2 Cronosequência de Curvelo, MG

A segunda área selecionada foi na Fazenda experimental do Moura da Universidade Federal dos Vales Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM (18°44'52,03" S e 44°26'53,56" O), localizada no município de Curvelo – MG (FIGURA 13), mesorregião central do Estado de Minas Gerais e encontra-se em área de transição entre os biomas Cerrado e Mata Atlântica. A fitofisionomia do Cerrado predominante é o Cerradão.

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é Aw, correspondendo a um clima de savana tropical com chuvas concentradas, no período do verão (outubro a abril) e temperaturas elevadas, enquanto o inverno consiste em um período seco (maio a setembro) com menores temperaturas. O índice pluviométrico anual médio no município, nos últimos 30 anos, foi de 1.064 mm, com temperatura média entre 22°C e 25°C (FIGURA 14). O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico (TABELA 1) (Santos et al., 2018).

Após a mudança de uso do solo da vegetação nativa de Cerrado, a área experimental foi cultivada, inicialmente, com pastagem de *Urochloa decumbens* Stapf, por cerca de 20 anos, e manteve-se sem manejo adequado, como manutenção da homogeneidade do estande de plantas, adubação, manejo de pragas e doenças, e taxa de lotação de animais pré-definida (FIGURA 15).

Em 2014, o local foi caracterizado como área de solo exposto e presença de plantas invasoras e, neste ano, foi instalado o sistema agrosilvipastoril (ILPF2). Foi utilizado o clone 144 de *Eucalyptus urograndis* com três meses de idade (um híbrido de *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*). O transplante foi

realizado simultaneamente com a semeadura de milho (SHS híbrido 7920), cultivado por um ano e forragem (*Urochloa brizantha* 'Marandu'). No plantio de eucalipto, adotou-se um espaçamento de 12 x 3 m, com uma faixa de 1,5 m que separa o milho consorciado e a forragem (FIGURA 15).

A unidade experimental de capim marandu (MAR) foi instalada, em dezembro de 2014, foi realizada, utilizando as mesmas recomendações de plantio e tratamentos de cultivo descritos anteriormente para a *Urochloa brizantha* 'Marandu' no sistema ILPF2. A área de pastagem (PAD2) consistia em pastagem de capim-braquiária (*Urochloa decumbens* Stapf) e era utilizada anteriormente por gado leiteiro e bovino e deixada sem manejo definido e sem adubação de manutenção por cerca de 20 anos, apresentando, assim, uma pastagem caracterizada por baixa produtividade, solo exposto e infestação de plantas invasoras (FIGURA 15).

A área de vegetação nativa (VN2), classificada como "Cerradão", uma fitofisionomia do Cerrado *Stricto sensu*, fica adjacente às unidades experimentais. A cronossequência e uso da terra estão descritos na Figura 15.

4.3.2.2 Análises físicas e químicas do solo

As coletas de solo foram realizadas, em 2016 e 2018, com abertura de quatro minitrincheiras (1x1x0.5 m), nos diferentes usos da terra na camada de 0-20 cm de profundidade. As amostras foram passadas por peneiras de 2 mm, sendo retirados os resíduos de plantas, raízes e sementes manualmente. A determinação da densidade aparente, pH, teor de argila, silte e areia foi realizada conforme metodologia proposta pela Embrapa (2017).

Para a determinação dos teores de C total, as amostras de solo foram previamente secas ao ar, homogeneizadas, moídas e passadas em peneiras de 0,150 mm e, posteriormente, analisadas por combustão seca, em um analisador elementar unido a um espectrômetro de massas Carlo Erba® Delta Plus, no Centro de Energia Nuclear na Agricultura – CENA, em Piracicaba – SP, Brasil. Os estoques de C dos sistemas ILPF1, ILPF2, MAR, PAD1 e PAD2 foram calculados, para a mesma massa de solo que suas respectivas vegetações nativas, para a camada de 0-20 cm, de acordo com metodologia proposta por Ellert e Bettany (1996); Moraes et al. (1996).

4.3.2.3 Simulação das alterações dos estoques de C do solo

O modelo Century, versão 4.0, foi utilizado, para simular mudanças nos estoques de C do solo, na profundidade de 0-20 cm, em duas cronossequências sob diferentes práticas de manejo, e os valores-padrão dos parâmetros mantidos inalterados. Avaliaram-se três compartimentos de matéria orgânica do solo (ativas, lentas e passivas), cada uma representando frações de matéria orgânica do solo com diferentes taxas de decomposição em potencial.

Para este estudo, as parametrizações relacionadas à matéria orgânica no modelo Century foram estabelecidas para simular os 20 cm de profundidade superiores do solo. As variáveis de produção de simulação avaliadas foram estoques de C do solo "somtc" e compartimentos do COS: ativo (os quais representam a biomassa microbiana do solo e produtos microbianos), lento (material vegetal resistente à decomposição derivado do compartimento estrutural e produtos microbianos estabilizados no solo

derivados de microrganismos ativos e de superfície) e passivo (muito resistente à decomposição e inclui MOS física e quimicamente estabilizada) “som1c(2)”, “som2c” e “som3c”, respectivamente, (Metherell et al. 1993).

4.3.2.4 Inicializando o modelo Century

Para inicializar o modelo, foram inseridos os dados de clima, textura do solo, densidade e pH do solo e entrada de N, conforme descrito por Parton et al. (1993). Neste estudo, foram utilizados os dados climáticos (temperatura média, máxima e mínima mensais e precipitação) para o período de 1988 a 2018. As fontes de dados foram obtidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET 2019), cujas estações meteorológicas, Estação Montes Claros-A506 (16°68'63,16" S e 43°84'37,63" O) e Estação Curvelo-A538 (18°74'77,11" S e 44°45'37,85" O), ficavam próximas às fazendas experimentais, como também, informações históricas do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa - BDMEP. O índice pluviométrico e temperatura média dos últimos 30 anos encontram-se na Figura 14. Os dados de entrada sobre a textura do solo, pH e densidade aparente estão descritos na Tabela 10.

Para inicializar os compartimentos do modelo MOS, foi fornecido ao Century o histórico de uso da terra e as práticas de manejo das cronossequências de Francisco-Sá-MG e Curvelo-MG. Foi executada no modelo uma condição de equilíbrio (7000 anos), para a vegetação nativa da floresta de Cerrado até 1995 (Curvelo-MG) e 1998 (Francisco Sá-MG), quando a vegetação da floresta foi removida para a mudança de uso do solo inicial em pastagem. Após condução da pastagem sem operações de manejo, durante 10 e 20 anos em Francisco Sá e Curvelo, respectivamente, as áreas foram classificadas como pastagem degradada. Em seguida, nos dois locais, a pastagem degradada foi convertida para sistema agrossilvipastoril. Em Curvelo, houve também a simulação da mudança de uso do solo de pastagem degradada em um monocultivo de pastagem produtiva.

4.3.2.5 Cenários Futuros

Para simular os impactos das diferentes práticas de manejo, em longo prazo, para cada uma das cronossequências avaliadas, o Century foi executado por 100 anos. Foram modelados cenários futuros para aumento da temperatura em 2°C, conforme cenários do IPCC (2018) e diminuição da precipitação pluviométrica em 20 mm mensais, de acordo com a tendência de diminuição do regime de chuvas das regiões observados por Marengo (2007) e Cunha et al. (2019). Os dados foram alterados, no arquivo 'site.100', para verificar o comportamento do COS quanto às alterações climáticas simuladas.

Além disso, o teor de argila foi modificado, para 52% em Francisco-Sá e 26%, em Curvelo-MG, com a finalidade de capturar diferenças, na capacidade de acumulação de C influenciada pela taxa de rotatividade (Turnover) da MOS ativa, eficiência de estabilização da MOS ativa em MOS lenta, nos diferentes sistemas de manejo, como também identificar solos para priorização de aplicação de recursos pelos formuladores de políticas públicas.

4.3.2.6 Análise estatística

As análises estatísticas dos resultados da modelagem foram realizadas, de acordo com os testes propostos por Smith *et al.* (1997), no Microsoft Excel (2016), para avaliar a adequação do modelo Century aos estoques COS, medidos em função das práticas de manejo e do tempo decorrido desde a mudança de uso do solo. Essas métricas incluíram erro quadrático médio da raiz (RMSE), coeficiente de correlação (r), coeficiente de determinação (CD), diferença média entre valores observados e simulados (M), coeficiente de massa residual (CRM) e eficiência da modelagem (EF). Além disso, foi aplicado o teste t de Student a 10% de significância entre os dados medidos versus simulado e entre os usos da terra.

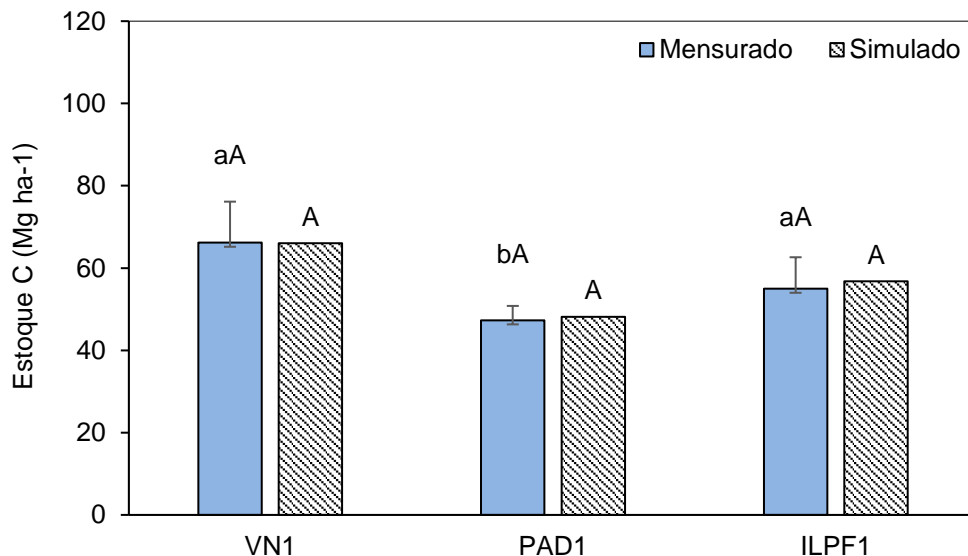
4.3.3 Resultados

As cronossequências foram escolhidas para representar diferentes conteúdos de argila e condições climáticas, em distintas fitofisionomias, em áreas de transição do bioma Cerrado e Mata Atlântica. Como esperado, os estoques de COS foram maiores nas áreas de vegetação nativa.

4.3.3.1 Cronossequência de Francisco Sá/MG

O modelo Century simulou de forma confiável os estoques de COS da cronossequência de Francisco Sá/MG, pois os valores ficaram muito próximos àqueles determinados em laboratório (FIGURAS 16 e 17a).

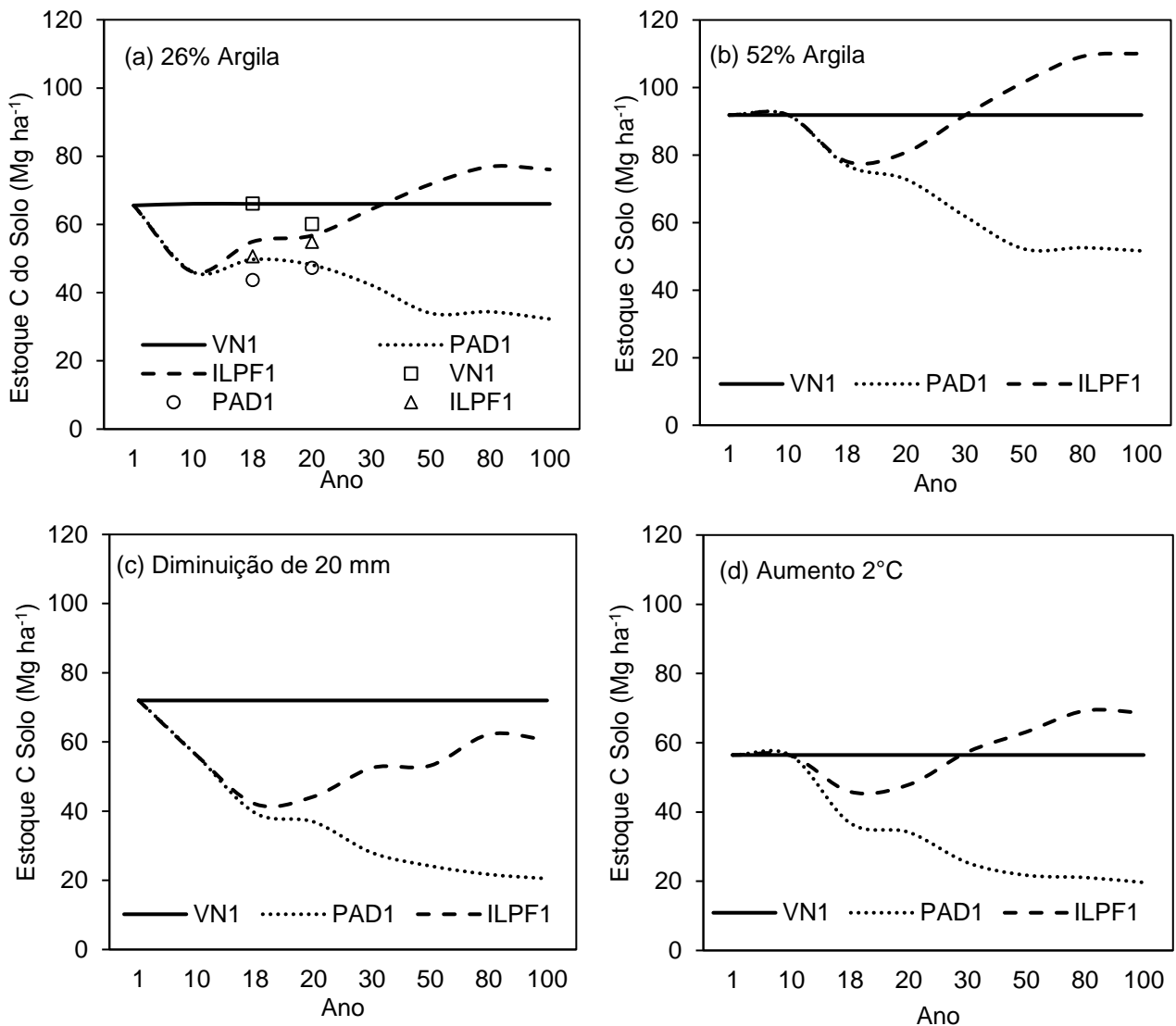
Figura 16 - Valores medidos e simulados dos estoques de C do solo na camada de 0 a 20 cm na cronossequência avaliada no município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil



Nota: As médias seguidas pela mesma letra minúscula entre o uso da terra e maiúscula entre dados medidos versus simulados não diferem entre si usando o teste t a 10% de significância, CV= 11,18%. Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Após o evento de remoção da vegetação nativa e posterior introdução do capim *Urochloa brizantha* cv. 'Marandu' (PAD1), ficando 13 anos sem manejo de pastagem, os estoques de COS diminuíram de 65,57 Mg ha⁻¹ no ano 1 para 46,04 Mg ha⁻¹ após 10 anos. O COS continuará em declínio, se houver a permanência do sistema PAD1 sem manejo adequado, uma vez que os estoques diminuirão para 32,27 Mg ha⁻¹ ao final dos 100 anos de simulação (FIGURA 17a).

Figura 17 - Estoques de C do solo medidos (símbolos) e simulados (linhas) na camada de 0 a 20 cm, usando o modelo Century para simulação até 100 anos



Nota: Em 26% de argila (a), para 52% de argila em (b), diminuição da precipitação mensal em 20 mm (c) e para aumento de temperatura de 2 °C (d) na cronosequência avaliada no município de Francisco Sá, Minas Gerais, Brasil. Ano 1 = 1998. Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

No entanto a simulação foi diferente, quando o sistema PAD1 foi convertido para ILPF1 em 2012, com a introdução e manejo adequado da pastagem *Urochloa brizantha* cv. 'Marandu' em 2014. Após

quatro anos de implantação do sistema e com as práticas atuais de manejo, o Century simulou que os estoques de COS passariam de 54,94 Mg ha⁻¹ após 18 anos para 76,10 Mg ha⁻¹ após 100 anos, ultrapassando os valores de equilíbrio da VN1 de 65,57 Mg ha⁻¹, anteriores a 1998 (FIGURAS 16 e 17a).

O cenário futuro da cronossequência de Francisco Sá pode ser verificado na Figura 17a. Foi observado que, com a adoção de boas práticas de gestão do solo, realizada no sistema ILPF1, o estoque de C será próximo ao da VN1, após 30 anos, tendo previsão de ultrapassar esses valores nos anos posteriores. Contudo o sistema PAD1 mostrará redução dos estoques de C ao longo do tempo.

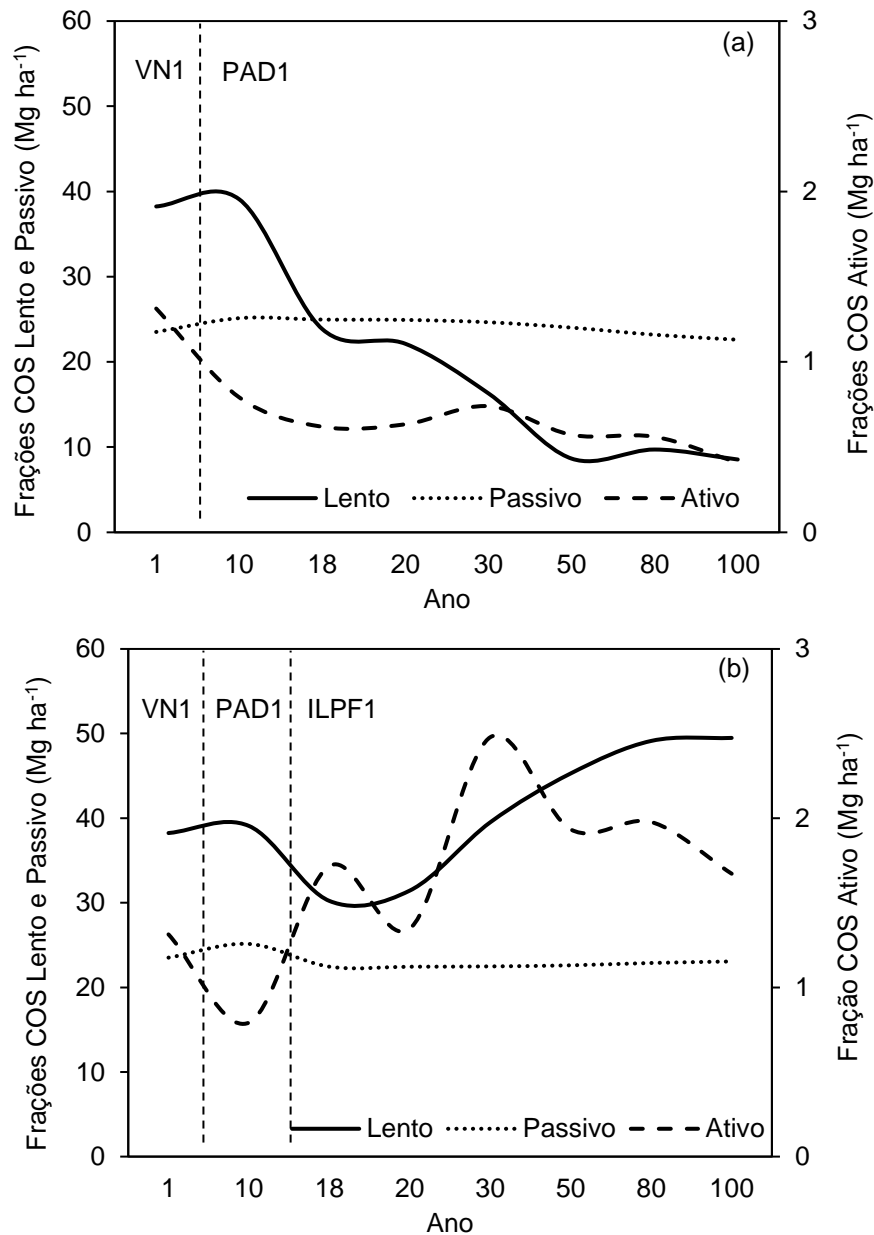
O cenário com modificação do teor de argila, passando de 26% para 52%, mostrou que houve aumento do estoque de C do solo, para o sistema ILPF1 que variou de 91,75 Mg ha⁻¹ após 30 anos para 110,10 Mg ha⁻¹ ao final da simulação (FIGURA 17b). No entanto, para o sistema PAD1, ocorreu redução considerável dos estoques que variaram de 61,91 Mg ha⁻¹ após 30 anos para 51,63 Mg ha⁻¹ após 100 anos. A partir dos resultados desse cenário podemos constatar a necessidade de mudança de uso da terra de áreas degradadas para sistemas agrícolas que preconizam boas práticas de manejo do solo, fornecendo informações importantes sobre uso do solo para priorização de aplicação de recursos pelos formuladores de políticas públicas.

O cenário futuro com diminuição da precipitação pluviométrica em 20 mm por mês apresentou redução dos estoques de C, quando comparado aos estoques de COS simulados inicialmente sem cenários futuros (FIGURAS 17a e 17c). No sistema ILPF1, os estoques variaram de 52,52 Mg ha⁻¹ após 30 anos para 60,57 Mg ha⁻¹ após 100 anos. Já no sistema PAD1, os estoques variaram de 27,99 Mg ha⁻¹ após 30 anos para 20,50 Mg ha⁻¹ após 100 anos. Esse cenário é fundamentado, quando se observa a Figura 14, em que mostra redução da precipitação, nos últimos 30 anos, para a região de Francisco Sá.

Da mesma forma, no cenário futuro, em que houve aumento da temperatura média da região em 2°C (FIGURA 17d), observou-se redução dos estoques de C, quando comparado aos estoques de COS simulados inicialmente sem cenários futuros (FIGURAS 17a e 17d). No sistema ILPF1, os estoques apresentaram valores de 57,35 Mg ha⁻¹ após 30 anos para 68,60 Mg ha⁻¹ após 100 anos. Porém, para o sistema PAD1, os valores observados foram de 25,35 Mg ha⁻¹ após 30 anos para 19,64 Mg ha⁻¹ após 100 anos. Na Figura 14, é observado aumento da temperatura média da região dos últimos 30 anos.

As simulações dos compartimentos ativo, lento e passivo modeladas pelo Century mostraram diferenças entre os sistemas (FIGURA 18).

Figura 18 - Estoques de carbono dos compartimentos Ativo, Lento e Passivo da Matéria Orgânica do Solo no município de Francisco Sá, Estado de Minas Gerais, Brasil



Nota: Em (a) Pastagem degradada (PAD1) e em (b) sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF1). Ano 1 = 1998. Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

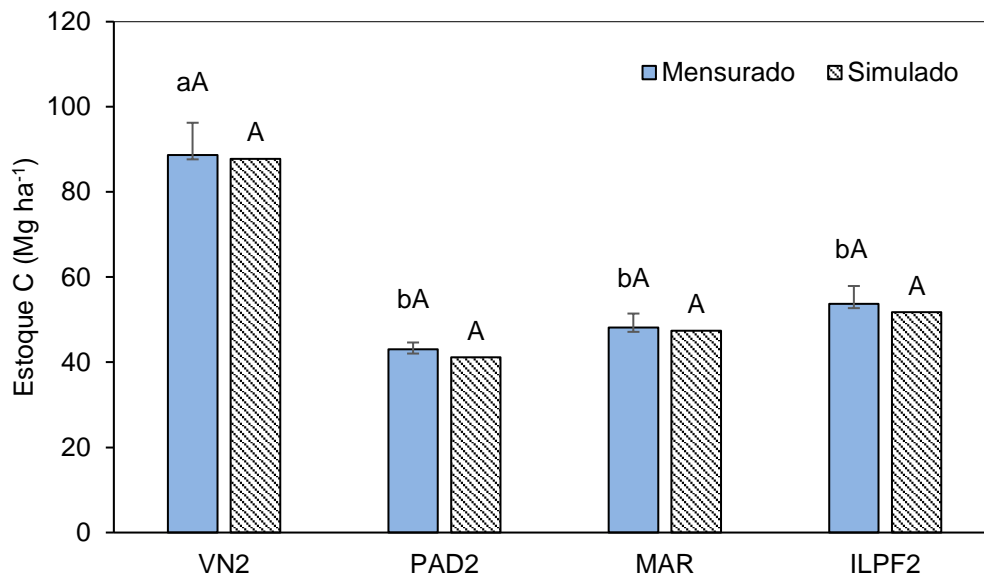
Na cronossequência de Francisco Sá (FIGURA 18a), os compartimentos ativo e lento do sistema PAD1 diminuíram ao longo do tempo. Contudo, ao convertê-lo no sistema ILPF1 (FIGURA 18b), seus valores aumentaram consideravelmente. Por exemplo, no sistema PAD1, as frações ativa e lenta reduziram de 0,79 Mg ha^{-1} e 39,08 Mg ha^{-1} após 10 anos para 0,41 Mg ha^{-1} e 8,55 Mg ha^{-1} ao final da simulação, após 100 anos, respectivamente. O mesmo não ocorreu para a fração passiva que permaneceu estável com o tempo. Porém, no sistema ILPF1, houve aumento das mesmas frações (ativa e lenta) que

variaram de 1,72 Mg ha⁻¹ e 30,22 Mg ha⁻¹ após 18 anos para 1,67 Mg ha⁻¹ e 49,49 Mg ha⁻¹, ao final da simulação, após 100 anos, respectivamente.

4.3.3.2 Cronossequência de Curvelo/MG

As estimativas do modelo Century foram consistentes com as alterações observadas em campo nos estoques de COS da cronossequência de Curvelo/MG (FIGURAS 19).

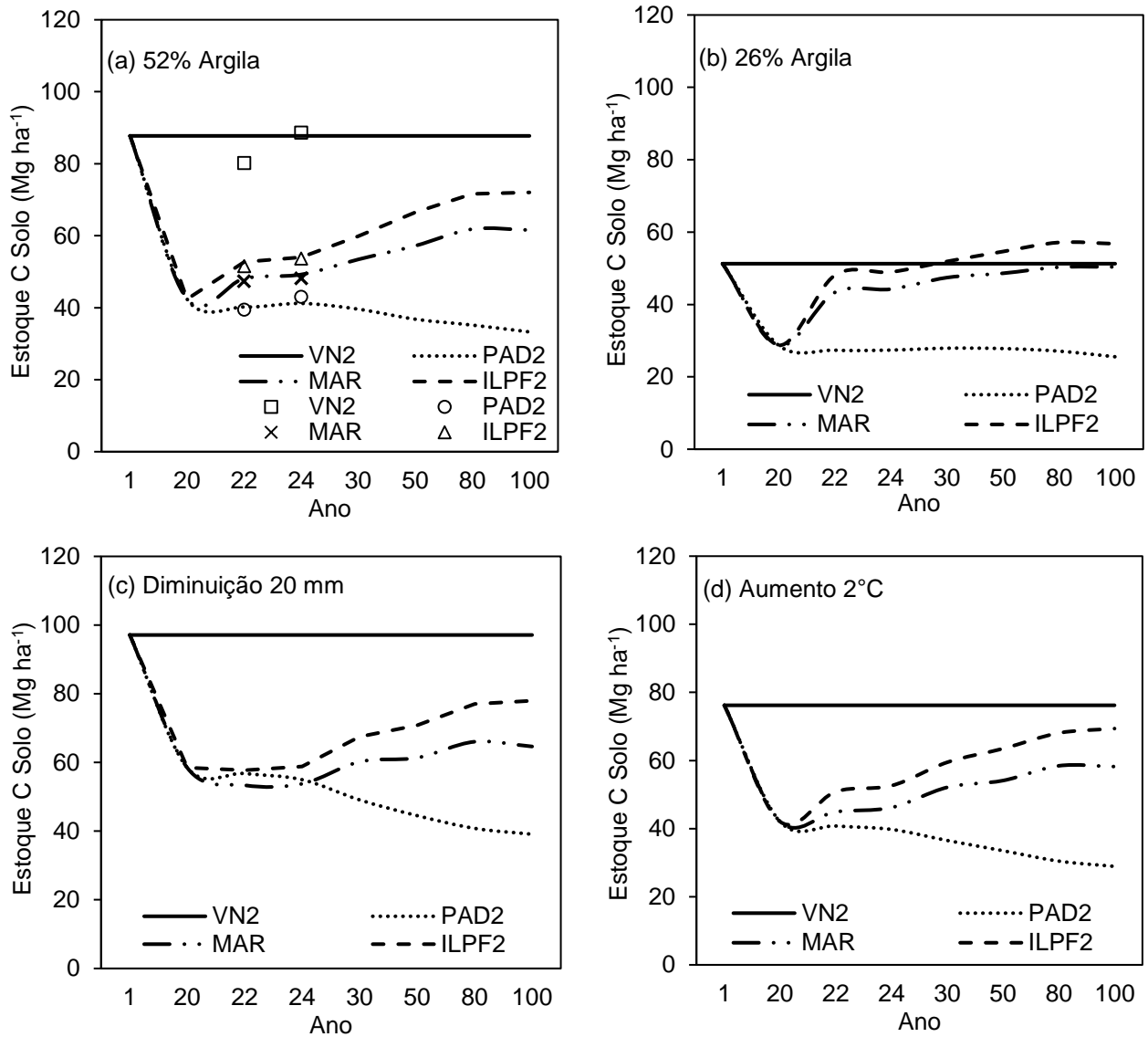
Figura 19 - Valores medidos e simulados dos estoques de C do solo na camada de 0 a 20 cm na cronossequência avaliada no município de Curvelo, Minas Gerais, Brasil



Nota: As médias seguidas pela mesma letra minúscula entre o uso da terra e maiúscula entre dados medidos versus simulados não diferem entre si usando o teste t a 10% de significância, CV=7,11%. Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Após a remoção da vegetação nativa (VN2) e introdução da pastagem *Urochloa decumbens* (PAD2), mantida por 20 anos sem manejo adequado, os estoques de COS decresceram de 87,74 Mg ha⁻¹ no ano 1 para 42,38 Mg ha⁻¹ no ano 20. O modelo previu declínio dos estoques de COS, ao longo do tempo, com valores de 33,28 Mg ha⁻¹ ao término da simulação, após 100 anos (FIGURA 20a).

Figura 20 - Estoques de C do solo medidos (símbolos) e simulados (linhas) na camada de 0 a 20 cm, usando o modelo Century para simulação até 100 anos



Nota: Em 52% de argila em (a), para 26% de argila (b), para diminuição da precipitação mensal em 20 mm (c) e para aumento de temperatura de 2 °C (d) na cronosequência avaliada no município de Curvelo, Minas Gerais, Brasil. Ano 1 = 1995. Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Entretanto, no ano de 2015, parte desse sistema foi convertido em área com ILPF2, consorciando *Urochloa brizantha* 'Marandu' com *Eucalyptus urograndis*, e outra parte em monocultivo de *Urochloa brizantha* 'Marandu' (MAR). De acordo com os resultados da simulação, a mudança de uso do solo, para esses sistemas com manutenção das práticas atuais de manejo, promoveria a elevação dos estoques de COS do ILPF2 e MAR de 51,71 Mg ha⁻¹ e 48,11 Mg ha⁻¹ no ano 20 para 72,07 Mg ha⁻¹ e 61,57 Mg ha⁻¹ após 100 anos, respectivamente (FIGURA 20a).

A introdução de boas práticas de manejo do solo promoveu aumento dos estoques de COS, no sistema ILPF2, em maiores proporções quanto comparado aos outros sistemas avaliados, e esse aumento

é gradual no decorrer do tempo. Contudo a simulação mostrou que o sistema PAD2 reduziu os estoques de C ao longo do tempo.

Foi simulado um cenário com modificação do teor de argila, passando de 52% para 26%. Nesse cenário, houve redução dos estoques de C do solo, quando comparados aos estoques de COS simulados, inicialmente, com teor de argila de 52% (FIGURAS 20a e 20b), com pequenos aumentos para o sistema ILPF2, variando entre 51,89 Mg ha⁻¹ após 30 anos para 56,77 Mg ha⁻¹ após 100 anos. E, para o sistema MAR, alternando de 47,42 Mg ha⁻¹ após 30 anos para 50,38 Mg ha⁻¹ após 100 anos.

No entanto, para o sistema PAD2, ocorreu declínio sutil dos estoques de C do solo, passando de 27,92 Mg ha⁻¹ após 30 anos para 25,54 Mg ha⁻¹ após 100 anos. Esses resultados indicam a importância e necessidade da mudança de uso do solo de áreas degradadas para sistemas agrícolas sustentáveis, principalmente, em solos degradados com maiores teores de argila, os quais podem apresentar menores perdas de carbono ao longo do tempo.

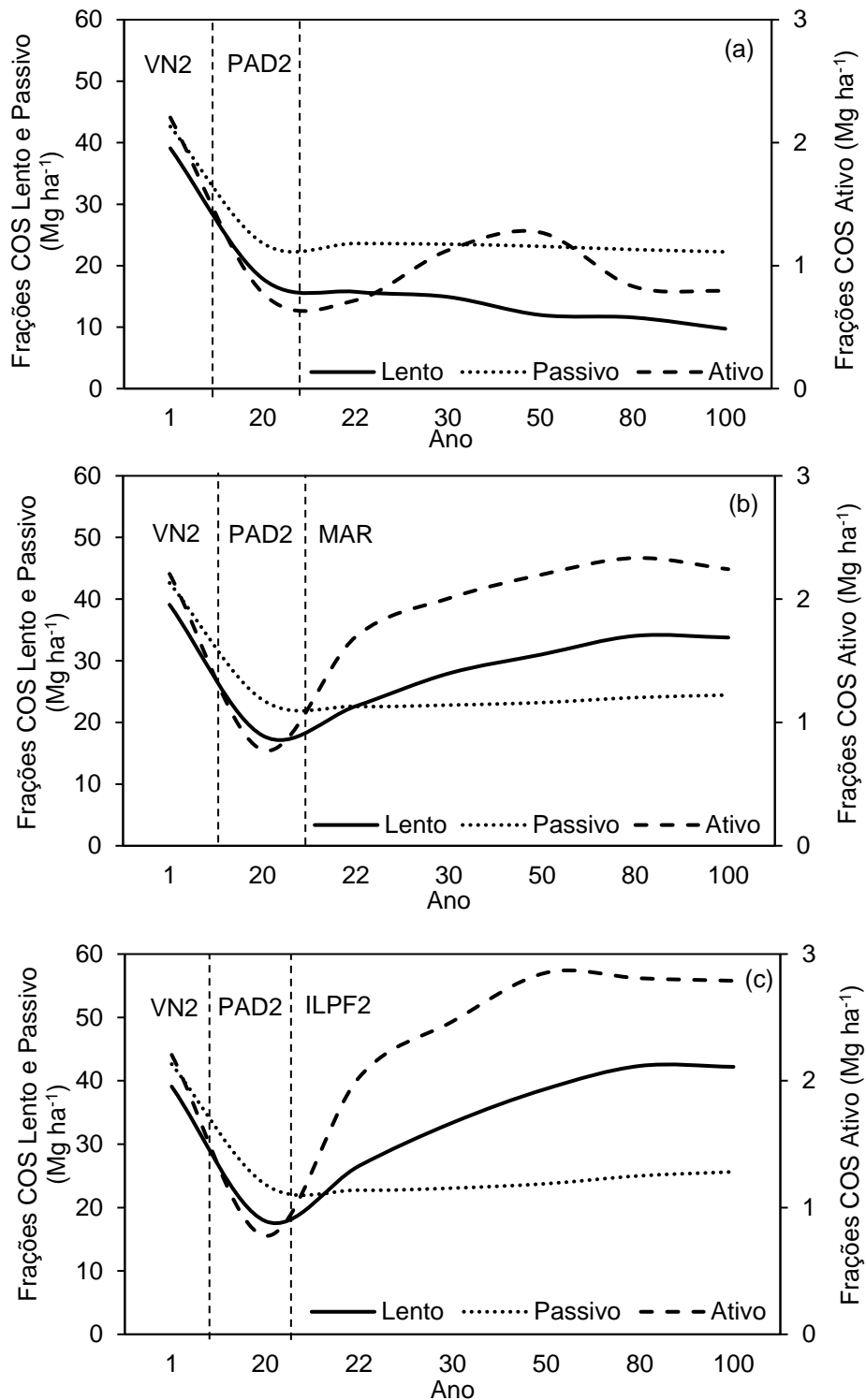
Assim, solos degradados com textura argilosa podem ter priorização de recursos para a mudança de uso da terra para sistemas sustentáveis, em detrimento de solos degradados com textura arenosa, uma vez que esses solos apresentam maiores perdas de carbono, ao longo do tempo, do que aqueles. Desta forma, em um cenário com limitações de recursos financeiros, solos degradados com textura argilosa podem trazer maior benefício para o aumento do carbono no solo, em detrimento a solos degradados com textura arenosa.

Cenários futuros da cronosequência de Curvelo/MG podem ser observados na Figura 20. O cenário futuro com diminuição da precipitação pluviométrica em 20 mm por mês apresentou aumento dos estoques de C (FIGURA 20c) nos sistemas. No sistema ILPF2 e MAR os estoques variaram de 67,48 Mg ha⁻¹ e 60,20 Mg ha⁻¹ após 30 anos para 78,00 Mg ha⁻¹ e 64,64 Mg ha⁻¹ após 100 anos, respectivamente. Porém, para o sistema PAD2, houve declínio, ao longo do tempo, com valores de 39,09 Mg ha⁻¹ após 100 anos. Na Figura 14, observa-se redução da precipitação pluviométrica da região dos últimos 30 anos.

No cenário futuro em que houve aumento da temperatura média da região em 2°C, verificou-se redução dos estoques de C do solo, em relação aos estoques de COS simulados, inicialmente, sem cenários futuros nos sistemas avaliados (FIGURAS 20a e 20d). Para o ILPF2 e MAR, serão observados valores de 59,48 Mg ha⁻¹ e 52,13 Mg ha⁻¹ após 30 anos para 69,37 Mg ha⁻¹ e 58,22 Mg ha⁻¹ após 100 anos, respectivamente. Contudo, para o sistema PAD2, houve declínio do COS, ao longo do tempo, com valores de 28,90 Mg ha⁻¹ após 100 anos. Esse cenário está fundamentado na Figura 14, em que mostra aumento da temperatura média da região nos últimos 30 anos.

As simulações dos compartimentos ativo, lento e passivo da cronosequência de Curvelo – MG estão representados na Figura 21.

Figura 21 - Estoques de carbono dos compartimentos Ativo, Lento e Passivo da Matéria Orgânica do Solo no município de Curvelo, Estado de Minas Gerais, Brasil



Nota: Em (a) Pastagem degradada, em (b) monocultivo de pastagem e em (c) sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. Ano 1 = 1995. Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

No sistema PAD2 as frações ativa e lenta diminuíram de 2,21 Mg ha⁻¹ e 17,87 Mg ha⁻¹ após 20 anos para 0,79 Mg ha⁻¹ e 9,74 Mg ha⁻¹ ao fim da simulação, após 100 anos, respectivamente. Quando ocorreu a mudança de uso do solo do sistema PAD2 em ILPF2 os valores das frações ativa e lenta aumentaram de 2,03 Mg ha⁻¹ e 26,56 Mg ha⁻¹ após 22 anos para 2,79 Mg ha⁻¹ e 42,21 Mg ha⁻¹ ao término da simulação após 100 anos, respectivamente.

Aumento dos valores nos compartimentos ativo e lento também foi evidenciado na mudança de uso do solo do sistema PAD2 em MAR, que variou de 1,70 Mg ha⁻¹ e 22,64 Mg ha⁻¹ após 22 anos para 2,24 Mg ha⁻¹ e 33,77 Mg ha⁻¹ após 100 anos. Nota-se que os valores dessas frações foram maiores no sistema ILPF2 que no MAR. Além disso, observa-se que os valores da fração passiva foram reduzidos quando o sistema VN2 foi modificado para PAD2, variando de 42,63 Mg ha⁻¹ no ano 1 para 23,65 Mg ha⁻¹ após 20 anos da simulação e um discreto aumento com a introdução dos sistemas ILPF2 e MAR (FIGURA 21).

4.3.3.3 Eficiência das simulações com testes estatísticos

Os resultados dos testes estatísticos utilizados para avaliar as simulações das duas cronosequências estão descritos na Tabela 11.

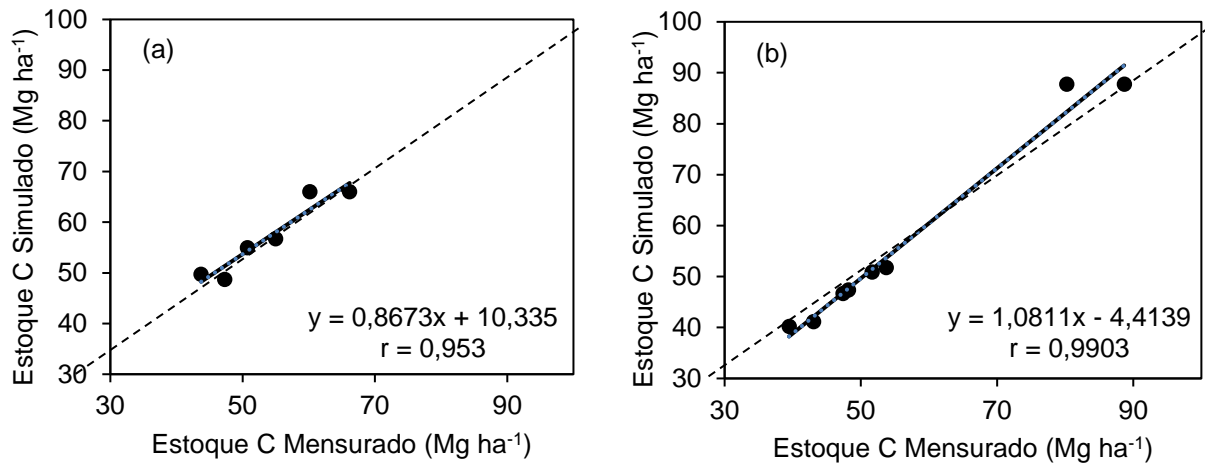
Tabela 11 - Testes estatísticos aplicados entre os valores simulados e medidos dos estoques de C das duas cronosequências nos municípios de Francisco Sá (n=5) e Curvelo – MG (n=7) no Cerrado do Estado de Minas Gerais, Brasil

Cronosequência	Teste Estatístico		CRM	RMSE	EF	M (Mg ha ⁻¹)
	r*	CD				
Francisco Sá - MG	0,95	0,90	-0,06	7,28	0,75	-3,08
Curvelo - MG	0,99	0,98	-0,03	5,66	0,97	-1,64
Valores Ideais	1,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,00

Nota: *r, coeficiente de correlação simples; CD, coeficiente de determinação; CRM, coeficiente de massa residual; RMSE (%), erro quadrado médio da raiz do modelo; EF, eficiência da modelagem; M, diferença média entre dados simulados e medidos. Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

O COS, mensurado em laboratório e simulado pelo modelo Century, apresentou alta correlação (r = 0,95; P<0,05) para Francisco – Sá e (r = 0,99; P<0,05) para Curvelo – MG, (FIGURA 22).

Figura 22 - Estoque de C do solo mensurado versus simulado no município de Francisco Sá em (a) e Curvelo em (b), em áreas de vegetação nativa, pastagem degradada, sistema de integração lavoura-pecuária-floresta e monocultivo de pastagem no Cerrado Brasileiro, n=4



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Os valores calculados próximos a zero, para a diferença média entre observações e simulação (M), mostram que o viés (ou erro consistente) foi pequeno. O resultado das simulações produziu valores de coeficiente de determinação (CD) próximos a 1, significando que o desvio da média das simulações dos valores medidos é menor que o observado nas medições. O coeficiente de determinação, CD, é uma medida da proporção da variação total, nos dados observados, que é explicada pelos dados simulados. O CD mostrou o quanto o modelo foi capaz de explicar os dados medidos. O CD avalia a qualidade do ajuste do modelo. Os valores do erro quadrado médio da raiz (RMSE) indicaram que as diferenças entre os valores medidos e simulados foram, em média, pequenas. Quanto mais próximo de zero, melhor.

Além disso, resultados estatísticos da validação, contendo uma comparação entre os dados simulados e observados de COS das duas cronossequências, tratados de forma conjunta, apresentaram $r = 0,98$; $P < 0,05$ maior que zero, o que mostra correlação positiva entre dados simulados e medidos. O $CD = 0,91$ indicou que houve pouca variação entre os valores simulados e medidos. Assim, pode-se inferir que o desvio das simulações foi menor que dos dados medidos, em laboratório, significando que o modelo descreve os dados melhor do que a média das medições (Smith *et al.* 1997).

O valor do $RMSE = 6,39$, tratado de forma conjunta, mostrou que há pequenas diferenças entre os valores medidos e simulados. A eficiência da modelagem, $EF = 0,94$, fornece uma comparação da eficiência do modelo escolhido com a eficiência em descrever os dados como a média das observações. Seu valor positivo indica que os valores simulados descrevem a tendência nos dados medidos melhor que a média das medições. O $M = -2,26$ mostrou que o erro consistente foi pequeno. E o $CRM = -0,04$ permitiu inferir o quanto o processo de simulação foi bem-sucedido. Seu valor negativo e próximo a zero indicou que o modelo pouco superestimou os valores de COS. Portanto esses resultados confirmam que o modelo foi eficiente e capaz de assertivamente simular as variações nos estoques de C do solo.

4.3.4 Discussão

O modelo Century simulou de maneira precisa as mudanças do COS influenciadas pelo histórico de manejo das cronosequências de Francisco Sá e Curvelo/MG. Nossos resultados corroboram com vários estudos que utilizaram o modelo Century como ferramenta para avaliar os impactos nos estoques de COS em diferentes cronosequências e práticas de manejo do solo. Utilizando o modelo Century, Cerri et al. (2004), Cerri et al. (2007), Tornquist et al. (2009), Bortolon et al. (2011), Brandani et al. (2015), Silva-Olaya et al. (2016), Zani et al. (2018) refletiram de maneira confiável as tendências do COS em estudos de cronosequências agrícolas e mudanças de manejo do solo no Brasil.

Conforme os resultados, houve influência do histórico de manejo nos estoques de C das duas cronosequências estudadas, quando o solo sob pastagem degradada foi convertido em um sistema de manejo do solo mais conservacionista como o ILPF1 e ILPF2. A serapilheira, proveniente da desrama natural do eucalipto e a influência do sistema radicular das pastagens, depositada ao solo por estes sistemas, contribuíram para a entrada e aumento do COS.

Brandani et al. (2015) utilizaram o modelo Century, para avaliar a dinâmica do COS, em sistemas de cana-de-açúcar convencional, com queima dos resíduos e uso de manejo conservacionista, sem queima dos resíduos. Esses autores observaram que, ao final da simulação, o sistema com manejo conservacionista manteve os estoques de COS em níveis iguais ou superiores ao da vegetação nativa de Cerrado, enquanto práticas convencionais, como a queima de resíduos, provocariam redução do COS em níveis abaixo de 60% dos níveis da vegetação nativa.

O modelo simulou que, após o desmatamento das florestas nativas e implementação de pastagens, que por ausência de manejo adequado encontravam-se em estágio de degradação, houve declínio nos estoques de COS. Ao converter a pastagem PAD1 e PAD2, em sistema ILPF1 e ILPF2, respectivamente, ocorreu elevação dos estoques de COS e o mesmo foi verificado, para o sistema MAR, porém com valores menores. Na cronosequência de Francisco Sá, ao final da simulação, o COS do sistema ILPF1 apresentou valores superiores ao da floresta nativa. Resultados semelhantes foram encontrados por Cerri et al. (2007) que, avaliando a precisão do modelo Century na estimativa de alterações do COS em 11 cronosequências, em condição de floresta, para pastagens na Amazônia brasileira, previram que o desmatamento e a mudança de uso do solo, em pastagens bem manejadas, causariam um declínio inicial nos estoques de COS (0-20 cm), seguido por uma lenta subida para níveis superiores aos da floresta nativa.

Em outro estudo realizado por Oelbermann e Voroney (2011), o uso do modelo Century foi adequado, ao prever os estoques de COS em sistemas agroflorestais tropicais e temperados e monocultivos. O modelo previu, ao longo do tempo, declínio dos estoques de COS para sistema de monocultivo e aumento do COS nos sistemas agroflorestais. Segundo os autores, isso foi associado à maior entrada de MOS proveniente de podas de árvores e da serapilheira.

Os cenários futuros, para a redução da precipitação pluviométrica e aumento da temperatura média das duas mesorregiões de Francisco Sá – MG e Curvelo – MG, foram simulados, conforme a Figura 14, em que há uma tendência para diminuição da precipitação e aumento da temperatura média da região ao longo dos últimos 30 anos. Essa tendência global está em conformidade com projeções realizadas pelo

IPCC (2018) e por outros estudos (Schewe et al., 2014; Sedláček e Knutt, 2014; Schleussner et al., 2016a; Schleussner et al., 2016b; Rogelj et al., 2018).

Nos cenários futuros de redução da precipitação, foi verificado que a permanência do sistema PAD1 e PAD2 causariam redução dos estoques de COS, ao passo que a introdução dos sistemas ILPF1, ILPF2 e MAR promoveriam aumentos nos estoques de COS. Conforme Ellison et al. (2017), o plantio de árvores em sistemas agrícolas promove benefícios para o aumento do fluxo de água no sistema. Por exemplo, a presença de raízes profundas aumenta a capacidade de infiltração da água, e a deposição de serapilheira aumenta os níveis de matéria orgânica no solo, que em conjunto melhoram a estrutura do solo e a estabilidade dos agregados, evitando perda de água por evaporação.

Assim, a presença de árvores em sistemas agrícolas tem um papel importante na produção e regulação das temperaturas e fluxos de água doce em escala regional e até global (Ellison et al., 2017). Nossas simulações, com cenários futuros para aumento da temperatura regional em 2°C, mostraram que a permanência dos sistemas PAD1 e PAD2 causariam redução dos estoques de COS, diminuindo o reservatório de carbono do solo ao longo do tempo, enquanto a mudança de uso do solo para sistemas ILPF1, ILPF2 e MAR promoveriam aumentos dos estoques de COS. Estratégia de mudança de uso do solo de áreas degradadas, para sistemas agrícolas contendo árvores (Paustian et al., 2016) e reflorestamento associados a estratégias de redução do desmatamento de florestas, são importantes para a adaptação e mitigação das mudanças climáticas e desenvolvimento sustentável. Conforme Roe et al. (2019), o Brasil está entre os 10 países com maior potencial, para mitigação de GEE, no setor uso do solo, o que poderá ajudar a atingir a meta de 1,5 °C de temperatura proposto no Acordo de Paris. Segundo Houghton et al. (2015), a adoção de estratégias sustentáveis, como o reflorestamento, uso de terras degradadas com introdução de espécies florestais, além de impedir o desmatamento, tem grande potencial para evitar um aquecimento global superior a 2°C. Conforme esses autores, a manutenção de florestas tropicais torna-se importante, uma vez que elas mantêm grandes estoques de carbono em sua biomassa vegetal e no solo.

Conforme Buzhdygan et al. (2020), sistemas agrícolas com maior diversidade de espécies florísticas estimulam o crescimento da comunidade decompositora heterotrófica mais abundante e diversificada com capacidade para aumentar o COS e contribuir com a mitigação das mudanças climáticas.

Em nossas avaliações, foi mostrado aumento do COS, para os compartimentos ativo, lento e passivo, modeladas pelo Century, quando o sistema sob pastagem degradada foi convertido em ILPF1, ILPF2 e MAR. Isso está relacionado às práticas conservacionistas de manejo do solo que aumentam o teor de matéria orgânica no solo, pela maior diversidade florística, serapilheira de árvores, maior presença de raízes no solo, principalmente pela pastagem, contribuindo com o aumento de COS.

Oelbermann e Voroney (2011) ponderaram que os sistemas que têm maior diversidade de espécies florísticas apresentaram maior aporte de matéria orgânica no solo, contribuindo para o aumento do COS, em longo prazo e, conseqüentemente, dos compartimentos de C ativo, lento e passivo do solo.

Estudo realizado por Oelbermann et al. (2017) também obtiveram resultados confiáveis, ao aplicar o modelo Century para analisar o COS, em longo prazo em sistemas de monocultivo e consorciados com as culturas de milho e soja. Os autores observaram que o COS declinou, quando a produção estava sob monocultivo com manejo convencional do solo, após o qual houve aumento do COS, ao implantar o

sistema consorciado. Além disso, foi observado aumento do COS, nas frações ativa e lenta dos sistemas consorciados, em detrimento aos monocultivos.

Segundo Lal (2018), a adoção de práticas de manejo do solo sustentáveis, com introdução de árvores ao sistema agrícola, implica aumentar a MOS e promover o sequestro de C da atmosfera para frações que estejam física e quimicamente protegidas no solo, contribuindo com a mitigação das emissões de GEE.

A substituição de áreas degradadas, com baixo estoque de C, por sistemas de manejo mais sustentáveis, como o ILPF, apresenta-se como alternativa aos sistemas de monocultivos em promover melhorias na qualidade do solo e aumento do COS em curto, médio e longo prazo (Conceição et al., 2017), já que, aproximadamente, 60% das pastagens no Brasil estão em algum estágio de degradação (Andrade et al., 2014; Oliveira et al., 2017), evitando-se o desmatamento de florestas intactas.

Nossas simulações mostraram que a substituição de PAD1 pelo sistema ILPF1 apontou aumentos de COS que podem compensar, em longo prazo, as perdas de C ocorridas pela mudança de uso do solo da vegetação nativa em pastagem. Além disso, a simulação revelou maior contribuição de COS, na mudança de uso do solo de PAD2 em sistema ILPF2 do que no sistema MAR, ao final da simulação. Isso pode ser explicado pela maior entrada de serapilheira e raízes das árvores e maior produção de biomassa pelos sistemas radiculares da pastagem marandu no solo, o que proporciona, segundo Lal (2018), acúmulo de MOS para um bom desempenho da produtividade do sistema, permitindo melhorias nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, a fim de reduzir os insumos de produtos agrícolas.

De acordo com Cardinael et al. (2018), a entrada de resíduos orgânicos, como serapilheira, senescência de raízes, resíduos de culturas, reduz o efeito priming da MOS nativa, em sistemas agrossilviculturais, contribuindo com o aumento do COS.

O efeito priming positivo, que significa aumento da utilização do C da MOS nativa, ocorre, quando são adicionados ao solo resíduos orgânicos com uma relação C:N maior que 30 ou outros compostos orgânicos, quando a demanda de energia e nutrientes não é suficiente para decompor o material aportado (Kuzyakov et al., 2000; Oliveira, 2014). O efeito priming negativo é quando a adubação orgânica ou adição de resíduo orgânico inibe o ataque a fontes mais estáveis de C, como a MOS nativa (Kuzyakov et al., 2000; Oliveira, 2014).

Desta forma, no efeito priming negativo a MOS nativa ou mais antiga não sofre mineralização pelos microrganismos heterotróficos, contribuindo para o acúmulo de C no solo.

Além disso, é importante considerar que a cronossequência de Curvelo passou por 20 anos sob pastagem degradada e a de Francisco-Sá por 13 anos. Isso contribuiu para que os estoques de C de Curvelo decrescessem em maior proporção que os de Francisco-Sá.

Outros aspectos como textura, fertilidade de solos, clima e intensidade de pastejo podem influenciar a produtividade de sistemas agrossilvipastoris e monocultivos de pastagens bem conduzidas e, conseqüentemente, estarem relacionados às entradas de C e N no solo, bem como as taxas de turnover (renovação da MOS).

Assim, considerando a diferença de mineralogia da fração argila, o solo da cronossequência de Curvelo, mais argiloso, apresentou menores perdas de COS que o solo da cronossequência de Francisco Sá, associado a práticas agrícolas sustentáveis que podem contribuir para o maior acúmulo de carbono na MOS, como também, na provável dinâmica da formação e estabilização de novos agregados do solo

(Six et al., 2000). Portanto os resultados dessa simulação indicam que solos argilosos, para os referidos usos da terra, são situações prioritárias para a alocação de recursos para ao incremento da fixação de carbono no solo.

4.3.5 Conclusão

O modelo Century pode ser aplicado para avaliar cronosequências de intensificação de uso da terra com sistemas agrossilvipastoris em distintas fitofisionomias do Cerrado.

Os estoques de COS aumentaram, ao longo do tempo, nos sistemas ILPF1, ILPF2 e MAR. Todavia os sistemas integrados ILPF1 e ILPF2 apresentaram-se como melhores alternativas para acúmulo COS em relação ao monocultivo de pastagens.

A mudança do uso do solo de pastagem degradada para sistemas agrossilvipastoris não só recuperaria os estoques de COS, como também seus estoques podem ser maiores que as áreas de floresta nativa após 100 anos de simulação.

O modelo também previu que a diminuição da precipitação pluviométrica e aumento da temperatura em 2°C das regiões estudadas poderá causar declínio dos estoques de COS, principalmente, em sistemas degradados, enquanto sistemas agrossilvipastoris apresentariam pouca redução dos estoques de COS.

4.3.6 Referências

- Andrade RG, Teixeira AHC LJ et al. (2014) EMBRAPA: Brazilian Agriculture Observation and Monitoring System. Cerrado Pasture Degradation - Scenario 3. Available at: <http://mapas.cnpm.embrapa.br/somabrasil/webgis.html> (accessed 05 February 2020). *EMBRAPA Brazilian Agric. Obs. Monit. Syst. Cerrado Pasture Degrad. - Scenar. 3.* <http://mapas.cnpm.embrapa.br/somabrasil/webgis.html>.
- Bortolon ESO, Mielniczuk J, Tornquist CG, Lopes F, Bergamaschi H (2011) Validation of the Century model to estimate the impact of agriculture on soil organic carbon in Southern Brazil. *Geoderma*, 167–168, 156–166. doi:10.1016/j.geoderma.2011.08.008.
- Brandani CB, Abbruzzini TF, Williams S, Easter M, Pellegrino Cerri CE, Paustian K (2015) Simulation of management and soil interactions impacting SOC dynamics in sugarcane using the CENTURY Model. *GCB Bioenergy* 7, 646–657. doi:10.1111/gcbb.12175.
- Buzhdygan OY, Meyer ST, Weisser WW, Eisenhauer N, Ebeling A, Borrett SR, Buchmann N, Schererlorenzen M, Scheu S, Schmid B, Steinauer K, Strecker T, Tietjen B, Vogel A, Weigelt A, Petermann JS (2020) Biodiversity increases multitrophic energy use efficiency, flow and storage in grasslands. *Nature, Ecology & Evolution* 4, 393–405. doi:10.1038/s41559-020-1123-8.
- Cardinael R, Guenet B, Chevallier T, Dupraz C, Cozzi T, Chenu C (2018) High organic inputs explain shallow and deep SOC storage in a long-term agroforestry system - Combining experimental and modeling approaches. *Biogeosciences* 15, 297–317. doi:10.5194/bg-15-297-2018.
- Carvalho JLN, Raucci GS, Frazão LA, Cerri CEP, Bernoux M, Cerri CC (2014) Crop-pasture rotation: A strategy to reduce soil greenhouse gas emissions in the Brazilian Cerrado. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 183, 167–175. doi:10.1016/j.agee.2013.11.014.
- Cerri, C.E.P.; Easter, M.; Paustian, K.; Killian, K.; Coleman, K.; Bernoux, M.; Falloon, P.; Powelson, D.S.; Batjes, N.; Milne, E.; Cerri CC et al. (2007) Simulating SOC changes in 11 land use change chronosequences from the Brazilian Amazon with RothC and Century models. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 122, 46–57. doi:10.1111/10.1016/j.agee.2007.01.007.
- Cerri CEP, Cerri CC, Maia SMF, Maurício Roberto C, Feigl BJ, Lal R (2018) Reducing Amazon Deforestation through Agricultural Intensification in the Cerrado for Advancing Food Security and Mitigating Climate Change. *Sustainability* 10, 1–18. doi:10.3390/su10040989.
- Conceição MCG da, S. Matos E, Bidone ED, Rodrigues R de AR, Cordeiro RC (2017) Changes in Soil Carbon Stocks under Integrated Crop-Livestock-Forest System in the Brazilian Amazon Region. *Agricultural Sciences* 08, 904–913. doi:10.4236/as.2017.89066.
- Cunha APMA, Zeri M, Leal KD, Costa L, Cuartas LA, Marengo JA, Tomasella J, Vieira RM, Barbosa AA, Cunningham C, Cal Garcia JV, Broedel E, Alvalá R, Ribeiro-Neto G (2019) Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. *Atmosphere* 10, 1–20. doi:10.3390/atmos10110642.
- Durigan MR, Cherubin MR, de Camargo PB, Ferreira JN, Berenguer E, Gardner TA, Barlow J, Dias CT dos S, Signor D, de Oliveira RC, Cerri CEP (2017) Soil organic matter responses to anthropogenic forest disturbance and land use change in the eastern Brazilian Amazon. *Sustainability* 9, 1–16. doi:10.3390/su9030379.
- Ellert, B.H.; Bettany, J.R. Calculation of a organic matter and nutrients stored in soil under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science*, Ottawa, v.75, p.529-538, 1996.
- Embrapa (1997) “Manual de Métodos de Análise de Solos / Centro Nacional de Pesquisa de Solo. EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). 212p.”
- Embrapa (2017) *Manual de métodos de análise de solo*. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, pp 574. ISBN 978-85-7035-771-7

- Fujisaki K, Perrin AS, Desjardins T, Bernoux M, Balbino LC, Brossard M (2015) From forest to cropland and pasture systems: A critical review of soil organic carbon stocks changes in Amazonia. *Global Change Biology* 21, 2773–2786. doi:10.1111/gcb.12906.
- Houghton, R.A., Byers, B., Nassikas, A.A., 2015. A role for tropical forests in stabilizing atmospheric CO₂. *Nat. Clim. Chang.* 5, 1022–1023. <https://doi.org/10.1038/nclimate2869>
- INMET (2019) Instituto Nacional De Meteorologia. Clima, Estação e Dados, Dados Históricos. <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>.
- IPCC (2018) Summary for Policymakers. “Glob. Warm. 1.5°C. An IPCC Spec. Rep. impacts Glob. Warm. 1.5°C above pre-industrial levels Relat. Glob. Greenh. gas Emiss. pathways, Context Strength. Glob. response to Threat Clim. cha.” (Ed and TW (eds.)]. IP [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor) pp. 1–24 <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
- Kuzyakov, Y., Friedel, J.K., Stahr. Review of mechanisms and quantification of priming effects. *Soil Biology & Biochemistry*, v.32, p. 1485-1498, 2000. DOI: 10.1016 / S0038-0717 (00) 00084-5
- Lal R (2018) Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. *Global Change Biology* 24, 3285–3301. doi:10.1111/gcb.14054.
- Lal R (2019) Promoting “4 Per Thousand” and “Adapting African Agriculture” by south-south cooperation: Conservation agriculture and sustainable intensification. *Soil and Tillage Research* 188, 27–34. doi:10.1016/j.still.2017.12.015.
- Lorenz K, Lal R (2014) Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 34, 443–454. doi:10.1007/s13593-014-0212-y.
- Marengo JA (2007) “Mudanças Climáticas Globais e seus Efeitos sobre a Biodiversidade: Caracterização do Clima Atual e Definição das Alterações Climáticas para o Território Brasileiro ao Longo do Século XXI.”
- Metherell, A.K., L.A. Harding, C.V. Cole and WJP et al (1993) CENTURY Soil organic matter model environment. “Tech. Doc. Agroecosystem version 4.0. Gt. Plains Syst. Res. Unit Tech. Rep. No. 4. USDA-ARS, Fort Collins, Color. 1993.”
- Minasny B, Malone BP, McBratney AB, Angers DA, Arrouays D, Chambers A, Chaplot V, Chen ZS, Cheng K, Das BS, Field DJ, Gimona A, Hedley CB, Hong SY, Mandal B, Marchant BP, Martin M, McConkey BG, Mulder VL, O’Rourke S, Richer-de-Forges AC, Odeh I, Padarian J, Paustian K, Pan G, Poggio L, Savin I, Stolbovoy V, Stockmann U, Sulaeman Y, Tsui CC, Vågen TG, van Wesemael B, Winowiecki L (2017) Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* 292, 59–86. doi:10.1016/j.geoderma.2017.01.002.
- Moraes JFL, Volkoff B, Cerri CC, Bernoux M (1996) Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. *Geoderma* 70, 63–81. doi:10.1016/0016-7061(95)00072-0.
- Oelbermann M, Echarte L, Marroquin L, Morgan S, Regehr A, Vachon KE, Wilton M (2017) Estimating soil carbon dynamics in intercrop and sole crop agroecosystems using the century model. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 180, 241–251. doi:10.1002/jpln.201600578.
- Oelbermann M, Voroney RP (2011) An evaluation of the century model to predict soil organic carbon: Examples from Costa Rica and Canada. *Agroforestry Systems* 82, 37–50. doi:10.1007/s10457-010-9351-6.
- Oliveira DMS, Williams S, Cerri CEP, Paustian K (2017) Predicting soil C changes over sugarcane expansion in Brazil using the DayCent model. *GCB Bioenergy* 9, 1436–1446. doi:10.1111/gcbb.12427.

- Oliveira, P. A. *Adubação orgânica e emissões de gases de efeito estufa na recuperação de barragem de rejeito de beneficiamento de minério de ferro*. Paulo Afonso de Oliveira, dissertação de mestrado, Universidade Federal de Viçosa, 87 f, 2014.
- Parton WJ, Rasmussen PE (1994) Long-term effects of crop management in wheat-fallow: II. CENTURY model simulations. *Soil Science Society of America Journal* 58, 530–536. doi:10.2136/sssaj1994.03615995005800020040x.
- Parton WJ, Scurlock JMO, Ojima DS, Gilmanov TG, Scholes RJ, Schimel DS, Kirchner T, Menaut J -C, Seastedt T, Garcia Moya E, Kamnalrut A, Kinyamario JI (1993) Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. *Global Biogeochemical Cycles* 7, 785–809. doi:10.1029/93GB02042.
- Parton WJ, Stewart JWB, Cole C V. (1988) Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model. *Biogeochemistry* 5, 109–131. doi:10.1007/BF02180320.
- Paustian K, Parton WJ, Persson J (1992) Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen-fertilized long-term plots. *Soil Science Society of America Journal* 56, 476–488. doi:10.2136/sssaj1992.03615995005600020023x.
- Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G.P., Smith, P., 2016. Climate-smart soils. *Nature*. 532, 49–57. <https://doi.org/10.1038/nature17174>
- Rogelj, J., Popp, A., Calvin, K. V., Luderer, G., Emmerling, J., Gernaat, D., Fujimori, S., Strefler, J., Hasegawa, T., Marangoni, G., Krey, V., Kriegler, E., Riahi, K., Van Vuuren, D.P., Doelman, J., Drouet, L., Edmonds, J., Fricko, O., Harmsen, M., Havlík, P., Humpenöder, F., Stehfest, E., Tavoni, M., 2018. Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 °C. *Nat. Clim. Chang.* 8, 325–332. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0091-3>
- Roe, S., Streck, C., Obersteiner, M., Frank, S., Griscom, B., Drouet, L., Fricko, O., Gusti, M., Harris, N., Hasegawa, T., Hausfather, Z., Havlík, P., House, J., Nabuurs, G.J., Popp, A., Sánchez, M.J.S., Sanderman, J., Smith, P., Stehfest, E., Lawrence, D., 2019. Contribution of the land sector to a 1.5 °C world. *Nat. Clim. Chang.* 9, 817–828. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0591-9>
- Santos HG dos;, Jacomine PKT, Anjos LHC dos;, Oliveira, Vírllei Alvaro de; Lumbrreras, José Francisco; Coelho, Maurício Rizzato; Almeida, Jaime Antonio de; Araujo filho JC de;, Oliveira JB de XC, Ferreira TJ (2018) “Sistema brasileiro de classificação de solos.”
- Ellison, D., Morris, C.E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyarsa, D., Gutierrez, V., Noordwijk, M. van, Creed, I.F., Pokorny, J., Gaveau, D., Spracklen, D. V., Tobella, A.B., Ilstedt, U., Teuling, A.J., Gebrehiwot, S.G., Sands, D.C., Muys, B., Verbist, B., Springgay, E., Sugandi, Y., Sullivan, C.A., 2017. Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Glob. Environ. Chang.* 43, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002>
- Houghton, R.A., Byers, B., Nassikas, A.A., 2015. A role for tropical forests in stabilizing atmospheric CO2. *Nat. Clim. Chang.* 5, 1022–1023. <https://doi.org/10.1038/nclimate2869>
- Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G.P., Smith, P., 2016. Climate-smart soils. *Nature*. 532, 49–57. <https://doi.org/10.1038/nature17174>
- Roe, S., Streck, C., Obersteiner, M., Frank, S., Griscom, B., Drouet, L., Fricko, O., Gusti, M., Harris, N., Hasegawa, T., Hausfather, Z., Havlík, P., House, J., Nabuurs, G.J., Popp, A., Sánchez, M.J.S., Sanderman, J., Smith, P., Stehfest, E., Lawrence, D., 2019. Contribution of the land sector to a 1.5 °C world. *Nat. Clim. Chang.* 9, 817–828. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0591-9>
- Rogelj, J., Popp, A., Calvin, K. V., Luderer, G., Emmerling, J., Gernaat, D., Fujimori, S., Strefler, J., Hasegawa, T., Marangoni, G., Krey, V., Kriegler, E., Riahi, K., Van Vuuren, D.P., Doelman, J., Drouet, L., Edmonds, J., Fricko, O., Harmsen, M., Havlík, P., Humpenöder, F., Stehfest, E., Tavoni, M., 2018. Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 °C. *Nat. Clim. Chang.* 8, 325–332. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0091-3>

- Schewe, J., Heinke, J., Gerten, D., Haddeland, I., Arnell, N.W., Clark, D.B., Dankers, R., Eisner, S., Fekete, B.M., Colón-González, F.J., Gosling, S.N., Kim, H., Liu, X., Masaki, Y., Portmann, F.T., Satoh, Y., Stacke, T., Tang, Q., Wada, Y., Wisser, D., Albrecht, T., Frieler, K., Piontek, F., Warszawski, L., Kabat, P., 2014. Multimodel assessment of water scarcity under climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 111, 3245–3250. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222460110>
- Schleussner, C.F., Lissner, T.K., Fischer, E.M., Wohland, J., Perrette, M., Golly, A., Rogelj, J., Childers, K., Schewe, J., Frieler, K., Mengel, M., Hare, W., Schaeffer, M., 2016a. Differential climate impacts for policy-relevant limits to global warming: The case of 1.5 °c and 2 °c. *Earth Syst. Dyn.* 7, 327–351. <https://doi.org/10.5194/esd-7-327-2016>
- Schleussner, C.F., Rogelj, J., Schaeffer, M., Lissner, T., Licker, R., Fischer, E.M., Knutti, R., Levermann, A., Frieler, K., Hare, W., 2016b. Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperature goal. *Nat. Clim. Chang.* 6, 827–835. <https://doi.org/10.1038/nclimate3096>
- Sedláček, J., Knutti, R., 2014. Half of the world's population experience robust changes in the water cycle for a 2 °c warmer world. *Environ. Res. Lett.* 9. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/4/044008>
- Silva-Olaya AM, Cerri CEP, Williams S, Cerri CC, Davies CA, Paustian K (2017) Modelling SOC response to land use change and management practices in sugarcane cultivation in South-Central Brazil. *Plant and Soil* 410, 483–498. doi:10.1007/s11104-016-3030-y.
- Six J, Elliott ET, Paustian K (2000) Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry* 32, 2099–2103. doi:10.1016/S0038-0717(00)00179-6.
- Smith P, Smith JU, Powlson DS, McGill WB, Arah JRM, Chertov OG, Coleman K, Franko U, Froking S, Jenkinson DS, Jensen LS, Kelly RH, Klein-Gunnewiek H, Komarov AS, Li C, Molina JAE, Mueller T, Parton WJ, Thornley JHM, Whitmore AP (1997) A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma* 81, 153–225. doi:10.1016/S0016-7061(97)00087-6.
- Tornquist CG, Mielniczuk J, Cerri CEP (2009) Modeling soil organic carbon dynamics in Oxisols of Ibirubá (Brazil) with the Century Model. *Soil and Tillage Research* 105, 33–43. doi:10.1016/j.still.2009.05.005.
- Yang Y, Tilman D, Furey G, Lehman C (2019) Soil carbon sequestration accelerated by restoration of grassland biodiversity. *Nature Communications* 10, 1–7. doi:10.1038/s41467-019-08636-w.
- Zani CF, Barneze AS, Robertson AD, Keith AM, Cerri CEP, Mcnamara NP, Cerri CC (2018) Vinasse application and cessation of burning in sugarcane management can have positive impact on soil carbon stocks. *Peer Journal* 1–30. doi:10.7717/peerj.5398.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo gerou informações sobre as mudanças nos estoques de C e N do solo em duas cronosssequências de uso do solo no Cerrado mineiro, assim como apresentou resultados sobre a origem do C no solo e humificação da matéria orgânica do solo em distintos manejos de solo. Adicionalmente, foi utilizada a modelagem matemática, com o uso do modelo Century, para simular os estoques de carbono do solo em sistemas agrossilvipastoris, a fim de predizer sobre o potencial de acúmulo de C do solo a curto, médio e longo prazo, bem como cenários futuros de alterações de precipitação pluviométrica e mudança de temperatura regional mediante alterações climáticas.

Essas informações podem auxiliar nos cálculos de sequestro de carbono e emissão de CO₂ das mudanças do uso do solo nos inventários nacionais de gases de efeito estufa, em estratégias de manejo que melhoram a sustentabilidade desses sistemas e diagnósticos de viabilidade para uma agricultura de baixa emissão de carbono. Além de servirem como informação base, para tomadores de decisão, em políticas públicas, que promovam usos da terra e práticas de manejo mais conservacionistas. Além disso, auxiliam na identificação de práticas de manejo que possibilitem o atingimento das metas propostas pelo Brasil no Acordo de Paris e a Contribuição Nacional Determinada (NDC) do Brasil e em iniciativas do Governo Federal como o Programa de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono (ABC).

O estudo contribuirá com o entendimento dos impactos das mudanças no uso do solo nos estoques de C dos sistemas agrícolas que estão substituindo pastagens degradadas no Cerrado. Ressalta-se que estudos complementares como a associação da modelagem com sistemas de informações geográficas (SIG) podem ajudar a avaliar a magnitude desses impactos e determinar o efeito de possíveis novas estratégias de manejo sobre a sustentabilidade de sistemas agrossilvipastoris.