

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

Luana Larissa de Souza Almeida

Qualidade da matéria orgânica do solo e estoques de carbono e nitrogênio em sistemas integrados de produção no Norte de Minas Gerais

**Montes Claros
2018**

Luana Larissa de Souza Almeida

Qualidade da matéria orgânica do solo e estoques de carbono e nitrogênio em sistemas integrados de produção no Norte de Minas Gerais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Orientador: Leidivan Almeida Frazão

Coorientador: Luiz Arnaldo Fernandes

Montes Claros
Fevereiro de 2018

A444q
2018

Almeida, Luana Larissa de Souza.

Qualidade da matéria orgânica do solo e estoques de carbono e nitrogênio em sistemas integrados de produção no Norte de Minas Gerais / Luana Larissa de Souza Almeida. Montes Claros, 2018.

54 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Área de concentração em Produção Vegetal, Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientador (a): Leidivan Almeida Frazão.

Banca examinadora: Álvaro Luiz de Carvalho Veloso, Maria das Dores Magalhães Veloso, Júnior Cota Silva.

Inclui referências: f. 22-26; 51-53.

1. Sistemas silvipastoris. 2. Carbono. 3. Nitrogênio. I. Frazão, Leidivan Almeida. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 631.4

Luana Larissa de Souza Almeida

Qualidade da matéria orgânica do solo e estoques de carbono e nitrogênio em sistemas integrados de produção no Norte de Minas Gerais

Aprovado pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Álvaro Luiz de Carvalho Veloso
FUNORTE

Prof.^a Dr.^a Maria das Dores Magalhães Veloso
UNIMONTES

Prof. Dr. Junio Cota Silva
ICA - UFMG



Prof.^a Dr.^a Leidivan Almeida Frazão
ICA/UFMG

Montes Claros, 20 de fevereiro de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por toda proteção divina e conquistas alcançadas, entre elas, o Mestrado;

Aos meus pais, Rosemary de Souza Almeida e Mauro Francisco de Almeida, por todo amor e apoio incondicional;

Aos meus irmãos, Anne, Júnior e Nayara, e aos sobrinhos Sophia e Heitor, por todos os momentos de alegria e apoio;

Ao meu noivo, Rogério Pereira de Oliveira, por todo amor, perseverança e paciência no período de desenvolvimento desta pesquisa;

Aos meus orientadores, Prof.^a Leidivan e Prof. Luiz Arnaldo: obrigada pelo ensinamentos repassados, confiança, amizade e oportunidade em desenvolver uma pesquisa tão enriquecedora. A contribuição de vocês foi ímpar no meu desenvolvimento no curso pós-graduação do ICA/UFMG;

À Universidade Federal de Minas Gerais e ao Instituto de Ciências Agrárias pela oportunidade e privilégio de estudar;

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 membros da banca, pela presença e contribuições repassadas para elaboração deste trabalho final;

Ao professor Regynaldo, por toda a gentileza em disponibilizar o laboratório de Resíduos e ao Márcio pelo suporte técnico para execução das minhas análises. Obrigada pelos ensinamentos e experiências compartilhadas. Ao professor Alcinei Místico pelo apoio à estatística. Muito Obrigada;

Aos professores Demerson e Ernane, assim como as técnicas de laboratório, Francine e Flávia, pelo empréstimo de instrumentos e materiais necessários para condução desta pesquisa;

A todos os professores do curso de pós-graduação que se dedicam em transmitir com sabedoria e amor os conhecimentos adquiridos ao longo da academia;

Ao Álvaro, por toda a gentileza em ceder a sua propriedade para condução desta pesquisa.

À Juliana e à Paula, que sempre estiveram presentes na condução das análises de laboratório. Em especial, a Juliana pelos conhecimentos repassados, conselhos e incentivos para este percurso acadêmico;

Aos colegas e amigos do curso de pós-graduação por todo o apoio e companheirismo ao longo desta jornada acadêmica. Em especial Juliana, Rejane, Camila, Jaqueline e Josiane: foi um prazer conhecê-las. Aos colegas, Igor e Luan, pelo esclarecimento de dúvidas e apoio;

Ao grupo de estudos ILPF, por toda a parceria nos trabalhos de campo e laboratório, o apoio de todos vocês foi essencial para a realização desta pesquisa!

Aos funcionários do laboratório de Solos ICA/UFMG, Manuel, Ismael e Luiz Henrique, pelo apoio na condução das análises;

A Prof.^a. Dr.^a. Brigitte e a Sandra, pelo apoio na condução das análises no Laboratório de Biogeoquímica Ambiental do Centro de Energia Nuclear da Universidade de São Paulo - CENA/USP.

Muito Obrigada!

Qualidade da matéria orgânica do solo e estoques de carbono e nitrogênio em sistemas integrados de produção no Norte de Minas Gerais

RESUMO

Objetivou-se com este estudo avaliar a qualidade da matéria orgânica de um Cambissolo Háplico eutrófico, após a implantação de sistemas silvipastoris no Norte de Minas Gerais em área anteriormente ocupada com pastagem de baixa produtividade. O arranjo dos sistemas implantados consistiu de integração de pasto de capim-marandu com *Eucalypto cloeziana* (SSP1) ou *urograndis* (SSP2). Esses sistemas foram comparados com áreas de estrato regenerante (ER) e vegetação nativa (VN). O delineamento utilizado foi inteiramente casualizado utilizando parcelas subdivididas para avaliar as variáveis físico-químicas e biológicas do solo, e adotou-se o esquema fatorial 4X2 (quatro tratamentos e duas épocas de avaliação) para variáveis efluxo CO₂ e fluxo H₂O do solo ($p < 0,05$). Os estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo aumentaram nos SSP em relação ao ER, porém, ainda foram inferiores em relação à VN após quatro anos de implantação. O fracionamento químico e granulométrico indicou que o carbono (C) ficou protegido nas frações mais estáveis da matéria orgânica do solo - MOS (humina e silte+argila). Houve incremento no carbono microbiano do solo no período chuvoso e do quociente metabólico no período seco. O SSP1 aumentou atividade microbiana na camada 10-20 cm do solo quando comparado a VN e ER, resultado que pode ser atribuído à deposição de material vegetal e revolvimento do solo para incorporação em subsuperfície no sistema cultivado. O efluxo CO₂ foi semelhante entre VN e SSP2 no período chuvoso e entre SSP1 e VN no período seco, o que pode indicar uma maior diversidade de organismos e raízes nesses sistemas em relação à ER. Pode-se concluir que a introdução dos sistemas integrados melhorou a qualidade do solo quando comparado a ER, permitindo a maior proteção da MOS.

Palavras-chave: Sistemas silvipastoris. Dióxido de carbono. Biomassa microbiana do solo. Carbono. Nitrogênio.

SOIL ORGANIC MATTERS QUALITY AND CARBON AND NITROGEN STOCKS IN PRODUCTION INTEGRATED SYSTEMS IN THE NORTH OF MINAS GERAIS

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the quality of the organic matter of an eutrophic Haplic Cambisol, after the implantation of silvopastoral systems in the North of Minas Gerais, in an area previously occupied by pasture of low productivity. The arrangement of the implanted systems consisted of integration of grass of marandu grass with *Eucalypto cloeziana* (SSP1) or *urograndis* (SSP2). These systems were compared with areas of regenerating stratum (ER) and native vegetation (VN). The design was completely randomized using subdivided plots to evaluate the physical-chemical and biological variables of the soil, and the factorial scheme 4X2 (four treatments and two epochs of evaluation) was adopted for efflux variables CO₂ and flow H₂O from soil ($p < 0,05$). The carbon (C) and nitrogen (N) stocks of the soil increased in the SSP in relation to the RE, but were still lower in relation to the NP after four years of implantation. The chemical and granulometric fractionation indicated that carbon (C) was more stable in protected fractions of soil organic matter - MOS (humina and silt+clay). There was an increase in soil microbial carbon in the rainy season and the metabolic quotient in the dry period. The SSP1 increased microbial activity in the 10-20 cm layer of soil when compared to NR and ER, a result that can be attributed to the deposition of plant material and soil rotation for incorporation into subsurface in the cultivated system. The efflux CO₂ was similar between VN and SSP2 in the rainy season and between SSP1 and VN in the dry period, which may indicate a greater diversity of organisms and roots in these systems in relation to ER. It can be concluded that the introduction of integrated systems improved soil quality when compared to ER, allowing greater protection of MOS.

Keywords: Silvopastoral systems. Carbon dioxide. Microbial soil biomass. Carbon. Nitrogen.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Mapa de localização da área experimental em Francisco Sá, Minas Gerais.....	31
Figura 2 - Precipitação pluviométrica mensal e temperatura para o ano de 2016 e 2017 - MG.	31
Figura 3 - Representação esquemática de sistemas integrados implantados em 2013.	33
Figura 4 - Teores de Carbono e Nitrogênio (g kg^{-1}) e Relação C:N do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo em Francisco Sá – MG.....	37
Figura 5 - Estoques de Carbono e Nitrogênio (Mg ha^{-1}) do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo em Francisco Sá – MG.....	38
Figura 6 - Distribuição percentual do teor de C nas frações granulométricas da MOS nas profundidades 0-10 (A), 10-20 (B), 20-30 (C) e 30-40 (D) do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo em Francisco Sá – MG.....	39
Figura 7 - Distribuição percentual do teor de C nas frações húmicas da MOS nas profundidades 0-10 (A), 10-20 (B), 20-30 (C) e 30-40 (D) do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo em Francisco Sá – MG.....	41
Figura 8 - Relações entre o carbono associado as frações das substâncias húmicas da MOS sob diferentes sistemas de uso e manejo em Francisco Sá – MG.....	43
Figura 9 - Efluxo de CO_2 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) do solo em janeiro e julho de 2017 (estações úmida e seca) sob diferentes sistemas de uso e manejo em Francisco Sá – MG.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Teores de areia, silte e argila na camada 0-20 cm de Cambissolo Háplico em Francisco Sá - MG	32
Tabela 2 - Atributos microbiológicos do solo em janeiro sob diferentes sistemas de uso e manejo no município de Francisco Sá - MG	43
Tabela 3 - Atributos microbiológicos do solo em julho sob diferentes sistemas de uso e manejo no município de Francisco Sá - MG	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BMS	Biomassa microbiana do solo
(C-FAF + C-FAH)/ C-FHUM	Relação entre fração ácido húmico e fúlvico pela fração humina
C	Carbono
C-CO ₂	Perda de carbono por respiração
C-FAF	Carbono da fração ácido fúlvico
C-FAF / C-FAH	Relação entre fração ácido fúlvico e ácido húmico
C-FAH	Carbono da fração ácido húmico
C-FHUM	Carbono da fração humina
Cmic	Carbono microbiano
CO	Carbono Orgânico
COT	Carbono Orgânico Total
EC	Estoque de Carbono
EM	Estoque de Nitrogênio
ER	Estrato Regenerante
F- areia	Fração com partículas do tamanho areia
FAF	Fração ácido fúlvico
FAH	Fração ácido húmico
FG	Fracionamento Granulométrico
FLL	Fração Leve e Livre
FSH	Fracionamento das Substâncias Húmicas
F-silte+argila	Fração com partículas do tamanho do silte e argila
Gt	Gigatonelada
HUM	Fração humina
SSP1	Sistema silvipastoril com eucalipto cloeziana
SSP2	Sistema silvipastoril com eucalipto urograndis
MO	Matéria Orgânica
MOS	Matéria Orgânica do Solo
N	Nitrogênio
NT	Nitrogênio Total
Pg	Pentagrama
qCO ₂	Quociente Metabólico
Qmic	Quociente Microbiano
RBS	Respiração Basal do Solo
S	Enxofre
SH	Substâncias Húmicas
VN	Vegetação Nativa
Wflux	Fluxo de água no solo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo Geral	14
2.2	Objetivos Específicos	14
3	REVISÃO DE LITERATURA	15
3.1	Importância dos sistemas integrados de produção	15
3.2	Dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS)	15
3.2.1	Carbono (C) no sistema solo-planta-atmosfera	15
3.2.2	Nitrogênio (N) no sistema solo-planta-atmosfera	16
3.2.3	Estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) em sistemas agrícolas	17
3.2.4	Biomassa microbiana como indicadora da qualidade do solo	18
3.2.5	Fracionamento granulométrico da MOS	18
3.2.6	Frações húmicas da MOS.....	19
3.2.7	Efluxo de dióxido de carbono (CO ₂) do solo	20
3.3	Referências	22
4	ARTIGO	
4.1	Artigo – Qualidade da matéria orgânica do solo e estoques de C e N em sistemas integrados de produção no Norte de Minas Gerais	27
4.1.1	Introdução.....	30
4.1.2	Material e Métodos	30
4.1.2.1	Localização e características da área de estudo	30
4.1.2.2	Histórico e implantação do sistema silvipastoril.....	32
4.1.2.3	Delineamento experimental e descrição dos tratamentos	33
4.1.2.4	Amostragem do solo e preparo das amostras	33
4.1.2.5	Teores e estoques de carbono e nitrogênio do solo	34
4.1.2.6	Frações granulométricas da MOS.....	34
4.1.2.7	Frações húmicas da MOS	34
4.1.2.8	Determinação do carbono da biomassa microbiana (C _{mic}) e respiração basal do solo (RBS)	35
4.1.2.9	Avaliação do efluxo de CO ₂ do solo.....	35
4.1.2.10	Análise estatística.....	35
4.1.3	Resultados.....	36
4.1.3.1	Teores e estoques de carbono orgânico e nitrogênio do solo	36
4.1.3.2	Carbono associado às frações granulométricas da MOS.....	38
4.1.3.3	Carbono associado às frações húmicas da MOS	40
4.1.3.4	Atributos microbiológicos do solo.....	43
4.1.3.5	Efluxo de CO ₂ do solo	45
4.1.4	Discussão	46
4.1.4.1	Teores e estoques de C e N nos diferentes sistemas de uso e manejo do solo	46

4.1.4.2 Preservação do C nas frações da MOS.....	47
4.1.4.3 Atividade microbiana do solo	48
4.1.4.4 Efluxo CO ₂ do solo	49
4.1.5 Conclusões.....	49
4.1.6 Agradecimentos.....	50
4.1.7 Referências	51
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	54

1 INTRODUÇÃO

A adoção de práticas conservacionistas de manejo e de tecnologias que preconizam uma agricultura de baixo carbono (C) são estratégias que contribuem para o constante aporte de matéria orgânica e restabelecimento da qualidade do solo. Os sistemas integrados de produção contribuem para manutenção e, ou aumento da atividade biológica do solo, ciclagem de nutrientes, formação de agregados estáveis e sequestro de C, nitrogênio (N) e produtividade agrícola (CORDEIRO *et al.*, 2015).

Os sistemas integrados podem ser implantados com a finalidade de recuperar áreas subutilizadas devido aos modelos inadequados de agricultura (BALBINO; CORDEIRO; MARTÍNEZ, 2012). Sendo assim, o sistema radicular das plantas anuais e perenes que compõem o sistema contribuem para a incorporação de nutrientes em profundidade e estimulam a atividade biológica em subsuperfície. Consequentemente, há um aumento nas reservas de nutrientes no solo (WENDLING *et al.*, 2011; OLIVEIRA *et al.*, 2017).

A matéria orgânica do solo (MOS) pode ser utilizada como indicadora de qualidade dos solos, visto que integra diversos processos de transformação e transferência de energia nos ecossistemas terrestres. A análise dos diversos compartimentos pode inferir desde a atividade da microbiota do solo e sua contribuição para a ciclagem de nutrientes, até o grau de humificação e proteção dos agregados do solo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

O adequado gerenciamento do uso da terra em sistemas integrados de produção contribui para manutenção da atividade dos microrganismos do solo, sugerindo maior equilíbrio para a ciclagem de nutrientes e menores flutuações entre diferentes épocas do ano (ALVES *et al.*, 2011). Assim, como a proteção do carbono nas partículas primárias do solo, nas substâncias mais estáveis e a formação de reservas orgânicas, permitindo a lenta liberação de nutrientes ao longo do tempo em sistemas autossustentáveis da MOS (MARTINS; CORINGA; WEBER, 2009; GAZOLLA *et al.*, 2015).

Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi avaliar os diferentes compartimentos da MOS após a introdução de sistemas silvipastoris nas condições edafoclimáticas da região Norte do Estado de Minas Gerais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Caracterizar a qualidade do solo por meio dos compartimentos da matéria orgânica do solo (MOS).

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar a distribuição das frações granulométricas da MOS e o carbono presente em cada fração nos diferentes sistemas de manejo;
- Separar e quantificar as substâncias húmicas da MOS;
- Determinar as relações entre os teores de carbono associados às frações húmicas da MOS;
- Determinar o carbono microbiano do solo;
- Verificar a influência sazonal do efluxo CO_2 (respiração) e fluxo de H_2O no solo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Importância dos sistemas integrados de produção

Os sistemas integrados de produção representam uma alternativa sustentável para mitigação dos gases de efeito estufa e, enquadram-se em um modelo de agricultura de baixo carbono, através do emprego mínimo de práticas agrícolas e manutenção dos resíduos culturais na área que protegem a matéria orgânica (MO) e a sua sustentabilidade no solo com menores perdas de C para atmosfera (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

As áreas ocupadas por estes sistemas no território brasileiro abrangem 11,5 milhões de hectares, representando apenas 5,11% das áreas cultivadas. Embora, haja possibilidade de expansão, visto que, ainda estão disponíveis 67,8 milhões de hectares dos 224,9 milhões em atividade no Brasil (CORDEIRO *et al.*, 2015; EMATER, 2017).

Estes sistemas são classificados conforme o arranjo dos componentes arbóreo, agrícola, pasto e/ou animal, conforme denominação a seguir: Integração lavoura-Pecuária (ILP) ou Sistema Agropastoril; Integração Pecuária-Floresta (IPF) ou Sistema Silvopastoril; Integração lavoura-Floresta (ILF) ou Sistema Silviagrícola; Integração lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) ou Sistema Agrossilvipastoril (BALBINO, 2011).

A adoção da ILPF representa uma estratégia sustentável para melhoria da qualidade do solo por aportar grande quantidade de MO e estimular o metabolismo microbiano no solo, favorecendo a ciclagem de nutrientes e a retenção de carbono na biomassa viva do solo (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

3.2 Dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS)

A dinâmica da MOS envolve todos os componentes vivos (parte aérea das plantas, raízes e animais) e não vivos (restos de vegetais e animais) que interagem com os fatores abióticos (água, luz, temperatura, entre outros) dando origem a MOS. Ações antrópicas podem interferir nessa dinâmica (desmatamento, revolvimento do solo, entre outros) e alterar a velocidade de transformação desta no solo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006; SANTOS; GUERRA, 2008).

A composição química da MO reflete a sua labilidade ou recalcitrância no processo de degradação dos compostos orgânicos no solo e, conseqüentemente a sua proteção nos compartimentos químico, físico e biológico no solo (ROSCOE; MACHADO, 2002; CAMARGO *et al.*, 2008).

3.2.1 Carbono (C) no sistema solo-planta-atmosfera

O solo, recurso natural e dinâmico, apresenta-se como um importante reservatório de carbono para o ecossistema terrestre. Estima-se que 2500 Pg C esteja estocado no solo, estando a maior parte desse elemento na forma de C orgânico (1500 Pg) e em menor proporção na forma inorgânica (950 Pg) (BATJES, 1996).

Os demais reservatórios de C são representados pelas formações geológicas (carvão, petróleo e gás natural), oceanos, atmosfera e vegetação que contribuem com 5000 Pg C, 38000 Pg C, 760 Pg C, 620 Pg C, respectivamente. Em termos comparativos, o solo apresenta até um metro de

profundidade 1,8 vezes mais carbono do que a vegetação e atmosfera juntas e 3,3 vezes mais C do que este último compartimento (LAL, 2008).

No sistema solo-planta-atmosfera a dinâmica do C no solo está associada a 3 elementos principais que constituem este ciclo: o C fotossintetizado adicionado ao solo, através dos resíduos vegetais; a perda de C do solo para atmosfera (efluxo) e o estoque de C, governado pela ciclagem de nutrientes e organismos do solo. As taxas de adição do C estão associadas ao conteúdo de MO acrescida pelos componentes vegetais, em especial, pelas gramíneas que conseguem produzir grande quantidade de fitomassa vegetal (BARRETO *et al.*, 2008; COSTA *et al.*, 2006). Por outro lado, as principais perdas C-CO₂ estão associadas à decomposição MO, respiração de raízes e organismos (ALMEIDA, 2010).

O uso, o manejo e a cobertura vegetal interferem no fluxo líquido do C no solo e a atmosfera atua como principal receptora dos gases produzidos pela respiração do solo, tal como, o C-CO₂ proveniente do processo de mineralização, sendo assim, se 10% do C do solo for mineralizado, representará o aumento de 20% do CO₂ para atmosfera (LAL, 2008; PITOMBO, 2011).

3.2.2 Nitrogênio (N) no sistema solo-planta-atmosfera

A composição do ar atmosférico se assemelha com a constituição da atmosfera do solo em aspectos qualitativos dos gases, apresentando em maior proporção o N gasoso (~78%). Entretanto, em termos quantitativos não se verifica o mesmo comportamento, visto o ônus com processos respiratórios dos organismos acima e abaixo do solo (ALMEIDA *et al.*, 2010; LEPSCH, 2011).

Devido ao seu caráter de essencialidade, o nitrogênio está entre os mais requeridos para o desenvolvimento das plantas e a sua disponibilidade no solo está condicionada a transformações pelos organismos vivos, em formas absorvíveis, para as plantas, tornando-o como um dos nutrientes mais limitantes para o desenvolvimento e produção vegetal (CAMARGO *et al.*, 2008).

Além disso, as quantidades exportadas pelas culturas, assim como a grande mobilidade no solo podem contribuir para perdas por volatilização, lixiviação ou escoamento. A presença de animais nos sistemas agrícolas pode contribuir com fontes de N para as plantas, por meio das excretas (urina e esterco) eliminadas ao solo, que se bem gerenciadas podem contribuir para a produção vegetal (RUFINO *et al.*, 2006; MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

A adoção do sistema de plantio direto (SPD) em áreas com ILPF representa uma alternativa sustentável para aumentar a incorporação de resíduos, favorecendo a atividade microbiana e aumentando os teores de nutrientes no solo, especialmente de N ao longo do tempo (SOUZA *et al.*, 2009).

O N orgânico adicionado ao solo passa por dois processos de transformação bioquímica: a mineralização e a imobilização. Ambas, governadas pela atividade e aparato enzimático dos microrganismos do solo, associadas à qualidade do substrato orgânico e clima. Juntos esses fatores alteram a dinâmica de disponibilidade e/ou acúmulo de nutrientes no solo e na biomassa viva (microbiana e vegetal), afetando diretamente a produtividade primária líquida acima do solo (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

De acordo com Moreira e Siqueira (2006), a relação C:N do substrato inferior a 20 propicia processos de mineralização; 20-30 imobilização e mineralização (acúmulo e liberação) e superiores a

30 processos de imobilização, classificando assim: os substratos em ricos, intermediários ou pobres, respectivamente.

3.2.3 Estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) em sistemas agrícolas

Os diferentes sistemas de uso e manejo do solo podem promover incrementos nos estoques de C e N em função do manejo adotado (SILVA *et al.*, 2011). Altas temperaturas, umidade e o intenso revolvimento do solo podem contribuir para o declínio MO exposta à mineralização (NOVARA *et al.*, 2012). O manejo de resíduos associado ao menor impacto por operações agrícolas contribui para a recuperação e manutenção desses estoques no solo, após a conversão de sistemas naturais em áreas cultiváveis (ALMEIDA *et al.*, 2016). Estima-se que o estoque de carbono nos primeiros 30 cm do solo possa atingir 800 Pg de C (CERRI *et al.*, 2006).

Solos sob pastagens podem refletir estoques diferenciados a depender do manejo empregado. Conforme observado por Rosa, Sano e Rosendo (2014) em estudos realizados na bacia hidrográfica do Rio Paranaíba, a conversão de pasto degradado para melhorado culminou no aumento de 15% dos estoques de C para a camada 0-30 cm (passando 59.35 Mg/ha para 68.28 Mg/ha⁻¹). Esse resultado expressa o potencial das pastagens bem manejadas na fixação do C no solo devido a intensa capacidade renovação e adição de C oxidável na região rizosférica (WENDLING *et al.*, 2011); liberação de exsudatos e mucilagens com produto do metabolismo radicular (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006), e capacidade de estabelecer associações micorrízicas (REIS JÚNIOR; MENDES, 2007).

Solos argilosos apresentam alta densidade de cargas e elevada superfície específica, e com isso contribuem para maior disponibilidade de nutrientes quando comparados à solos arenosos. Quando bem manejados, apresentam boas reservas de C e N ao longo do tempo (FREITAS, 2016).

Luca *et al.* (2008) verificaram que em solos cultivados com cana-de-açúcar e submetidos ao manejo com e sem queima há redução dos teores de C e N em Latossolos, Argissolos e Neossolos, com maior impacto para este último, em função da menor capacidade de suporte (nutrientes). Além disso, a textura mais arenosa interferiu na diminuição da relação C:N pelo consumo da palhada pela microbiota do solo e perda do C para atmosfera.

Salton *et al.* (2011) destacaram o potencial dos sistemas integrados para a melhoria da qualidade do solo e aumento dos estoques de C. Os autores relataram que o manejo integrado com gramíneas tropicais pode melhorar a eficiência do C incorporado em subsuperfície.

A integração lavoura-pecuária-floresta foi considerada como modelo de agricultura mais adequado por Sacramento *et al.* (2013), em estudo realizado na região Semiárida, visto que após 13 anos de implantação, promoveu as menores perdas nos conteúdos de C e N (14,37 g Kg⁻¹) quando comparado ao sistema de referência (20,84 g Kg⁻¹), até a profundidade de 60 cm do solo. Já Oliveira *et al.* (2017), em estudo realizado na Zona da Mata, verificaram conteúdos semelhantes de C para o sistema silvipastoril e monocultivo de pasto com 20 anos, e tendência de aumento nos estoques em todo o perfil avaliado (0-40 cm).

Diversos autores destacam que o preparo do solo, operações agrícolas, cobertura vegetal e o tempo podem conduzir ao sucesso ou a ineficiência dos ecossistemas cultivados, sendo determinantes nas reservas de C e N no solo (ALMEIDA *et al.*, 2016; FREITAS *et al.*, 2016).

3.2.4 Biomassa microbiana como indicadora da qualidade do solo

A biomassa microbiana do solo (BMS) reúne a porção viva da MOS, com exceção dos organismos maiores do que $5 \times 10^3 \mu\text{m}^3$. Representada pelos microrganismos do solo, incluindo fungos, bactérias e actinomicetos, a BMS pode conter de 2 a 5% do COT e 1 a 5% do NT, sendo um indicador sensível para alterações da MOS e dos sistemas agrícolas (JENKINSON; LADD, 1981; WARDLE, 1992; SMITH; PAUL, 1990).

A BMS pode ser quantificada e qualificada em função da sua população (fungos e bactérias); pela atividade metabólica (respiração microbiana) de fungos, bactérias e actinomicetos (SILVEIRA; MELLONI; PEREIRA, 2006); conteúdo de C e N imobilizado no tecido microbiano e respectivas relações com o carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) presentes no solo (FRAZÃO *et al.*, 2011).

A mudança do uso da terra afeta o compartimento biológico e a sua capacidade de retenção do C. A conversão de área nativa alterou propriedades do solo, comunidade microbiana e mineralização do C no solo (ZHOU; WANG; LUO, 2018).

As relações entre a respiração basal do solo e o C_{mic} e entre o C_{mic} e o COT geram dois sensíveis indicadores da qualidade do solo: o quociente metabólico (qCO_2) e o quociente microbiano ($qMIC$). O qCO_2 indica a quantidade de C na forma de dióxido de carbono ($C-CO_2$) que está sendo perdida do sistema e pode revelar condições estressantes da biomassa a depender das variáveis e condições avaliadas. Além disso, indica o nível de equilíbrio que um sistema está submetido, o qual demandará menos energia para manutenção da célula microbiana. Se estiver, estável, o gasto energético será menor, reduzindo as perdas do C pela respiração (ANDERSON; DOMSCH, 1993; TÓTOLA; CHAER, 2002).

Em contrapartida, o $qMIC$ evidencia o quanto a biomassa microbiana está sendo eficiente em reter o carbono no tecido microbiano, promovendo a imobilização. Quanto maior for esse índice, mais intenso é o processo de retenção do carbono no compartimento biológico (NUNES *et al.*, 2011; ALMEIDA *et al.*, 2016). Ademais, valores inferiores a 1% podem indicar alguma limitação relacionada ao uso e manejo do solo (JAKELAITIS *et al.*, 2008) ou por efeitos sazonais (FRAZÃO *et al.* 2010).

Ambientes em algum estágio de degradação apresentam menor diversidade organismos, apresentando pouca ou nenhuma diversidade vegetal e animal com reflexos na adição de substratos orgânicos na serapilheira, conduzindo a menor diversidade biológica no solo (SILVEIRA; MELLONI; PEREIRA, 2006).

3.2.5 Fracionamento Granulométrico da MOS

O fracionamento físico pode auxiliar no entendimento sobre o grau de estabilidade, agregação e proteção da MOS. Pode ser realizado mediante a separação física dos compostos que integram o complexo organomineral baseado nas diferenças granulométricas (areia, silte e argila) e/ou densidade das partículas físicas (ROSCOE; MACHADO, 2002; GUERRA; SANTOS, 2008).

De acordo com Cambardella e Elliott (1992) o fracionamento granulométrico visa separar a MOS considerando duas frações: a associada aos materiais susceptíveis a degradação microbiana ($> 0,053 \text{ mm}$) e; aquela associada aos minerais com partículas do tamanho das frações silte e argila ($< 0,053 \text{ mm}$) com maior tempo de permanência no solo, permitindo assim maior proteção da MOS.

Assim, o compartimento granulométrico classifica-se a partir do grau de associação com as partículas do solo, nível de acesso pela microbiota e, conseqüentemente, pela susceptibilidade a degradação, refletindo em frações mais lábeis ou estáveis (FREITAS, 2016).

O carbono orgânico pode estar distribuído no solo em três frações físicas, classificadas em função da associação ou não do carbono com componente mineral: de maneira livre, não protegido pelo componente mineral, representando a fração leve livre (FLL) da MOS, constituindo o carbono orgânico particulado (COP); protegido de forma intermediária, na fração areia, formando o carbono orgânico intermediário (COI) que encontra-se em moderado estágio de decomposição; e em avançado estágio de degradação, associado a fração silte+argila, constituindo o carbono presente no complexo organomineral (SANTOS *et al.*, 2013).

Freitas (2016), estudando um Latossolo Vermelho na Mesorregião Central Mineira com sistemas de ILPF, verificou que a distribuição do COT das FLL, Fareia e Fsilte+argila no perfil do solo tendem a diminuir com o aumento da profundidade. Há predomínio da Fsilte+argila em relação às demais, uma vez que a proteção físico-química aumenta com a associação a superfície dos argilominerais.

A natureza do substrato orgânico é um fator que define a permanência das frações orgânicas no solo em função da resistência das moléculas orgânicas a degradação microbiana (MENDHAM *et al.*, 2004). Pegoraro *et al.* (2011) verificaram na entrelinha de áreas com eucalipto, aumento do C da fração leve da MOS quando comparada a áreas com pasto, visto a maior deposição de resíduos da colheita nesta posição, ambos sob Argissolo. Assim, a incorporação desses resíduos lignificados contribuíram para elevar a relação C:N e reduzir os efeitos da decomposição, aumentando, desta forma, os estoques de C e da fração lábil da MOS, no respectivo estudo.

Martins, Coringa e Weber (2009) verificaram que após 10 anos de implantação de sistema de ILPF, houve maiores quantidades de COT associadas à fração granulométrica mais fina (< 53 μm), quando comparado à fração mais grosseira (> 53 μm), indicando o maior potencial de agregação do material orgânico as silte e argila do solo. Resultados encontrados por Tirloni *et al.* (2012) também indicaram que a MOS associada aos minerais revelou-se com uma importante bioindicadora da estabilidade dos agregados no solo.

A textura do solo está intimamente relacionada à capacidade de proteção da MOS, sendo maior para solos argilosos. O maior teor de argila, e conseqüentemente maior proteção coloidal, reflete na formação de agregados estáveis, influenciando na capacidade da fração mineral em manter um maior conteúdo de C no solo melhorando a sua fertilidade (ROSCOE; MACHADO, 2002; LUCA *et al.*, 2008).

3.2.6 Frações húmicas da MOS

A matéria orgânica do solo (MOS) é formada por resíduos orgânicos de origem animal e vegetal em diferentes estágios de decomposição, biomassa viva e substâncias produzidas por esta (MEDONÇA; MATOS, 2005). A transformação constante destes materiais por processos físicos, químicos e biológicos gera um sistema complexo de substâncias definidas como húmicas (SH) e não húmicas (SNH) (GUERRA *et al.*, 2008).

As SH constituem material amorfo e quimicamente complexo, de baixa solubilidade e que está intimamente ligado a estruturas químicas complexas (ceras, polifenóis, entre outros compostos recalcitrantes). Enquanto, as SNH são resultantes da decomposição da MO e metabólicos da microbiota, tais como carboidratos, proteínas, aminoácidos, lignina e outros (KONONOVA, 1984; GUERRA *et al.*, 2008).

O fracionamento das substâncias húmicas visa à separação em três componentes principais: ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) e humina (HUM) por diferença de solubilidade em meio ácido ou alcalino ou pelo caráter de insolubilidade (STEVENSON; COLE, 1999). Estima-se que estas contribuam com 80 a 90% de CO em solos minerais. Em relação à solubilidade, a fração AF (FAF) é solúvel em meio ácido e básico, a fração AH (FAH) é solúvel apenas em meio alcalino e a fração HUM (FHUM) é insolúvel em ambos os meios (SCHNITZER, 1982; MEDONÇA; MATOS, 2005).

As FAH e FAF são as de maior mobilidade no solo, embora a FAF seja a maior responsável pela reatividade, acidez e conteúdo de O₂ no solo. A estabilidade química e resistência à decomposição definem a FHUM, com maior tempo de permanência no solo e proteção dos nutrientes minerais, especialmente C, N e S (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

As relações estabelecidas entre as frações das SH podem indicar desde qualidade da MOS até a vulnerabilidade de um sistema produtivo (FONTANA *et al.* 2010). Barreto *et al.* (2008) observaram através das relações estabelecidas entre as frações alcalino-solúveis (FAH:FAF), que a substituição de área de mata por áreas cultivadas (pastagem e cacau) não interferiu no conteúdo da MOS. Assim, as SHs funcionam como importante indicador da qualidade do solo em sistemas cultivados.

Solos com boa reserva de nutrientes, seja pela mineralogia (argilosos) ou aplicação de corretivos e fertilizantes, tendem a contribuir para a formação de complexos argilo-húmicos (LUCA *et al.*, 2008; ALMEIDA *et al.*, 2016), enquanto aquelas com baixas reservas de nutriente e arenosos necessitam de maior atenção quanto ao manejo conservacionista (CIOTTA *et al.*, 2003).

3.2.7 Efluxo de dióxido de carbono (CO₂) do solo

Os poros do solo podem funcionar como reservatório permanente ou temporário de C. Os mecanismos de estabilização desse elemento aos compartimentos físico ou químico que vão definir a sua permanência no solo. O transporte deste no solo pode ocorrer de duas formas: por difusão, pela saturação do espaço poroso pela água com a saída do CO₂ desprotegido ou por fluxo de massa, associado a outros gases contra um gradiente de pressão (BALL; SIMTH, 1991; DAVIDSON *et al.*, 2002; ROSCOE; MACHADO, 2002; MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

O uso e o manejo do solo em sistemas agrícolas influenciam na quantidade de CO₂ liberada pelo solo. A determinação direta das emissões de CO₂ do solo para atmosfera pode ser obtido pelo uso de câmaras fechadas sobre o solo, sendo um método muito sensível na captura de CO₂ in loco, produzido durante a respiração das raízes, organismos do solo e degradação da MO. (COSTA *et al.*, 2006).

Assim, áreas com vegetação nativa podem apresentar maiores efluxo de CO₂ em comparação áreas cultivadas, devido ao maior equilíbrio ecológico e diversidade de organismos. Pinto-Junior *et al.* (2009) em estudo realizado no Norte do Mato Grosso em Neossolo Quartzarênico, obtiveram valores médios de 6,45 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 3,62 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para Floresta de Transição Amazônica Cerrado e de

6,32 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 2,16 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ em pastagem de *Brachiaria sp.*, na estação úmida e seca, respectivamente.

A umidade parece ser um dos fatores mais relevantes para maiores efluxos no solo. De acordo com Panosso *et al.* (2009), em latossolo sem vegetação e sob diferentes lâminas de irrigação em São Paulo, indicaram a umidade como fator limitante para as emissões de CO_2 , correlacionado-se negativamente com a temperatura do solo, após o molhamento da área. Já em solos vegetados, o fator umidade também foi um dos precursores para o aumento dos efluxos. Resultados semelhantes foram encontrados por Ribeiro (2014) em sistemas agroflorestais com Latossolos e Gleissolos em Minas Gerais, onde os maiores efluxos de CO_2 podem ter sido influenciados pela maior atividade específica dos microrganismos do solo e produção de metabólitos no solo.

Outro aspecto relevante em modelos de agricultura sustentáveis é a escolha de espécies com alto valor biológico, isto é, capazes de aportar grandes quantidades de C fotossintetizado ao solo. Costa *et al.* (2008) verificaram que áreas de SPD com espécies altamente produtoras de resíduos (ervilhaca+milho) sob Argissolo Vermelho no Rio Grande do Sul contribuíram para fixação de C no solo (0,15 t $\text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$), enquanto as de baixa produção (aveia-preta+milho) funcionaram como fonte de carbono via CO_2 para atmosfera (0,12 t $\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$). Os autores destacam como elementos primordiais a escolha das espécies e o histórico da área, a partir dos quais se torna possível prever as potencialidades que os sistemas têm para conservar a MOS.

3.3 Referências

- ALMEIDA, A. M. **Fluxo de CO₂ proveniente da respiração do solo sob pastagens e fragmentos de Floresta Atlântica em regeneração (RJ)**. 2010. 79 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Química, Centro de Estudos Gerais, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2010. Disponível em: <<https://bit.ly/2GQlbCk>>. Acesso em: 5 maio 2017.
- ALMEIDA, L. S.; FERREIRA, V. A. S.; FERNANDES, L. A.; FRAZÃO, L. A.; OLIVEIRA, A. L. G.; SAMPAIO, R. A. Indicadores de qualidade do solo em cultivos irrigados de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1539-1547, 2016. Disponível em: <<https://bit.ly/2InYWRj>>. Acesso em: 15 abr. 2017.
- ALVES, T.S.; CAMPOS, L.L.; NETO, N. E.; MATSUOKA, M.; LOUREIRO, M. F. Biomassa e atividade microbiana de solo sob vegetação nativa e diferentes sistemas de manejos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 2, p. 342-347, 2011. Disponível em: <https://bit.ly/2L3nnVa>. Acessado: 13 jan. 2017.
- ANDERSON, T. H.; DOMSCH, K. H. The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 25, n. 3, p. 393-395, 1993. Disponível em: <<https://bit.ly/2GtBKAK>>. Acesso em: 17 nov. 2016.
- BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; MARTÍNEZ, G. B. Contribuições dos sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF) para uma agricultura de baixa emissão de carbono (Contributions of the Crop-Livestock-Forest Integration Systems (iLPF) for a low Carbon Emission Agriculture). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, n. 6, p. 1163-1175, 2012. Disponível em: <<https://bit.ly/2GvjZAO>>. Acesso em: 7 nov. 2016.
- _____; BARCELOS, A. O.; STONE, L. F. (Ed. Tec.). **Marco referencial: integração lavoura-pecuária-floresta**. Brasília: EMBRAPA, 2011. 132 p. Disponível em: <<https://bit.ly/2q0YPD0>>. Acesso em: 9 nov. 2016.
- BALL, B. C.; SMITH, K. A. Gas movement. In: SMITH, K.; MULLINS, C. (Ed.). **Soil analysis: physical methods**. New York: Marcel Dekker, 1991.p. 511-549.
- BARRETO, A. C. ; SANTOS FREIRE, M. B. G.; NACIF, P. G. S.; ARAÚJO, Q. R.; FREIRE, F. J.; INÁCIO, E. S. B. Fracionamento químico e físico do carbono orgânico total em um solo de mata submetido a diferentes usos. **Revista Brasileira Ciências do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1471-1478, 2008. Disponível: <<https://bit.ly/2lk6RyT>>. Acesso em: 20 nov. 2017.
- BATJES, N. H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. **European Journal of Soil Science**, v. 47, n. 2, p. 151-163, 1996. Disponível em: <<https://bit.ly/2EeH2Ob>>. Acesso em: 10 nov. 2017.
- CAMARGO, F. A. O.; SILVA, L. S.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M. J. Nitrogênio orgânico do solo. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. S.; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. rev. e atual. Porto Alegre: Metrópole, 2008. cap. 7, p. 87-97.
- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 3, p. 777-783, 1992. Disponível em: <<https://bit.ly/2GlgfIP>>. Acesso em: 10 fev. 2016.
- CERRI, C. C.; BERNOUX, M.; CERRI, C. E. P.; LAL, R. Challenges and opportunities of soil carbon sequestration in Latin America. In: _____; ETCHEVERS, J.; CERRI, C.E.P. (Org.) **Carbon sequestration in soils of Latin America**. New York: Haworth, 2006.p.41-47.
- CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; ERNANI, P. R.; ALBUQUERQUE, J. A. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. **Ciência Rural**, v. 33, n. 6 p.1161-1164, 2003. Disponível em: <<https://bit.ly/2JeOfLa>>. Acesso em: 10 out. 2017.

CORDEIRO, L. A. M.; BALBINO, L. C.; GALERANI, P. R.; DOMIT, L. A.; SILVA, P. C.; KLUTHCOUSKI, J.; VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; SKORUPA, L. A.; WRUCK, F. J. Transferência de Tecnologias para adoção da estratégia de integração lavoura-pecuária-floresta. In: _____; VILELA, L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARCHÃO, R. L. (Ed.). **Integração lavoura-pecuária-floresta: o produtor pergunta, a EMBRAPA responde**. Brasília: EMBRAPA, 2015. p. 377-393. Disponível em: <<https://bit.ly/2Jesn9J>>. Acesso em: 1 out. 2017.

COSTA, F. S.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 32, n.1, p.323-332, 2008. Disponível em: <<https://bit.ly/2J6IE4p>>. Acesso: 12 fev. 2017.

_____; GOMES, J. ; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Métodos para avaliação das emissões de gases do efeito estufa no sistema solo-atmosfera. **Ciência Rural**, v. 36, n. 2, p. 693-700, 2006. Disponível em: <<https://bit.ly/2GrY7KC>>. Acesso em: 20 jan. 2016.

DAVIDSON, E. A.; SAVAGE, K.; BOLSTAD, P.; CLARK, D. A.; CURTIS, P. S.; ELLSWORTH, D. S.; HANSON, P. J.; LAW, B. E.; LUO, Y.; PREGITZER, K. S.; RANDOLPH, J. C.; ZAK, D. Belowground carbon allocation in forests estimated from litterfall and IRGA-based soil respiration measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 113, n. 1, p. 39-51, 2002. Disponível em: <<https://bit.ly/2lpDLy5>>. Acesso em: 12 jun. 2017.

EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL (RS). Panorama geral. **Informativo Conjuntural**, n. 1.460., p. 2, 2017. Disponível em: <<https://bit.ly/2q11I7o>>. Acesso em: 25 maio 2017.

FONTANA, A.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C.; BENITES, V. D. M. Quantificação e utilização das frações húmicas como característica diferencial em horizontes diagnósticos de solos brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 4, 2010. Disponível em: <<https://bit.ly/2tXIOQK>>. Acesso em: 2 fev. 2017.

FRAZÃO, L. A.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Inorganic nitrogen, microbial biomass and microbial activity of a sandy Brazilian Cerrado soil under different land uses. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 135, n. 3, p. 161-167, 2010. Disponível em: <<https://bit.ly/2EeCofj>>. Acesso em: 2 fev. 2017.

FREITAS, I. C. **Atributos físicos, químicos e estoques de carbono e nitrogênio do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo na mesorregião Central Mineira**. 2016. 104 f. Dissertação (Mestrado em Produção Animal) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2016. Disponível em: <<https://bit.ly/2H46yc7>>. Acesso em: 2 jun. 2017.

GAZOLLA, P. R.; GUARESCHI, R. F.; PERIN, A., PEREIRA, M. P.; ROSSI, C.Q (2015). Frações da matéria orgânica do solo sob pastagem, sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 36, n. 2, p. 693-704, 2015. Disponível em: <<https://bit.ly/2LiUip8>>. Acesso em: 12 ago. 2017.

GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M.G; PERIN, A. Frações da matéria orgânica em áreas de Latossolo sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado do estado de Goiás. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 6, 2013.

GUERRA, J. G. M.; SANTOS, G. A. Métodos químicos e físicos. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. S.; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2 ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. Parte II cap. 13, 185-198.

_____; SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CAMARGO, F. A. O. Macromoléculas e substâncias húmicas. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. S.; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. Parte I cap. 03, p. 19-25.

JENKINSON, D. S.; LADD, J. N. Microbial biomass in soil: measurement and turnover. In: PAUL, E.A.; LADD, J. N. (Ed.). **Soil Biochemistry**. New York: Marcel Dekker, 1981. v. 5., cap. X, p. 415-471.

JAKELAITIS, A.; SILVA, A. A. D.; SANTOS, J. B.; VIVIAN, R. Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 38, n. 2, p. 118-127, 2008. Disponível em: <<https://bit.ly/2GtlBK4>>. Acesso em: 5 jun. 2016.

KONONOVA, M. M. Current problems in the study of organic matter accumulation in soils under anaerobiosis. **Soil Science**, v.137, n. 6, p. 419-427,1984.

LAL, R. Carbon sequestration. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 363, p. 815-830, 2008. Disponível em: <<https://bit.ly/2JeszWm>>. Acesso em: 18 jun. 2017.

LEPSCH, I. F. **19 lições de pedologia**. São Paulo: Oficina de textos, 2011.

LUCA, E. F.; FELLER, C.; CERRI, C. C.; BARTHÈS, B.; CHAPLOT, V.; CAMPOS, D. C.; MANECHINI, C. Avaliação de atributos físicos e estoques de carbono e nitrogênio em solos com queima e sem queima de canavial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 789-800, 2008. Disponível em: <<https://bit.ly/2lm16kc>>. Acesso em: 8 maio. 2017.

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 amazônica**, v. 39, n. 3, p. 655-660, 2009. Disponível em: <<https://bit.ly/2lpDMSN>>. Acesso em: 15 ago. 2017.

MENDHAM, D. S.; HEAGNEY, E. C.; CORBEELS, M.; O'CONNELL, A. M.; GROVE, T. S.; MCMURTRIE, R. E. Soil particulate organic matter effects on nitrogen availability after afforestation with *Eucalyptus globulus*. **Soil Biology Biochemistry**, v. 36, n. 7, p. 1067-1074, 2004. Disponível em: <<https://bit.ly/2H442CK>>. Acesso em: 15 fev. 2017.

MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. Viçosa: Ed. UFV, 2005.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: ED. UFLA, 2006.

NOVARA, A.; LA MANTIA, T.; BARBERA, V.; GRISTINA, L. Abordagem de local pareado para o estudo da dinâmica do carbono orgânico do solo em um ambiente semiárido do Mediterrâneo. **Catena**, v. 89, n. 1, p.1-7, 2012. Disponível em: <<https://bit.ly/2GrUjJb>>. Acesso em: 7 jan. 2018.

NUNES, R. S.; LOPES, A. A. C.; SOUSA, D. M. G.; MENDES, I. C. Sistemas de manejo e os estoques de carbono e nitrogênio em latossolo de Cerrado com a sucessão soja-milho. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 35, n. 4, p.1407-1419, 2011. Disponível em: <<https://bit.ly/2H4e4np>>. Acesso em: 10 jan. 2018.

OLIVEIRA, P. A. D.; RODRIGUES, R.; CORDEIRO, R.; MIORANZA, M.; VALLE, T. D. S.; ALECRIM, F. Teor e estoque de carbono e nitrogênio do solo em área sob sistema silvipastoril na Zona da Mata, MG. **Documentos**, n. 192, p. 50-52, 2017. (Seminário PIBIC Embrapa Solos 2016/2017). Disponível em: <<https://bit.ly/2Eehkth>>. Acesso em: 5 jan. 2018.

OLIVEIRA, W.R.D.; RAMOS, M.L.G.; CARVALHO, A .M.; COSER, T. R.; SILVA, A.M.M.; LACERDA, M. M.; SOUZA, K. W.; MARCHÃO, R. L.; VILELA, L.; PULROLNIK, K. Dynamics of soil microbiological attributes under integrated production systems, continuous pasture, and native cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1501-1510, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900049>> Acesso em: 3 jan. 2018.

PANOSSO, A. R.; RIBEIRO, C. E. R.; ZANINI, J. R.; PAVANI, L. C.; PEREIRA, G. T.; JUNIOR, N.S. Variabilidade espacial da emissão de CO₂, da temperatura e umidade de um latossolo desprovido de vegetação sob diferentes lâminas de molhamento. **Semina: Ciência Agronômica**, n.1, v. 30, p. 1017-1033, 2009, Disponível em: <<https://bit.ly/2xjsCON>>. Acesso em: 4 jan. 2018.

PEGORARO, RF.; SILVA, IR.; NOVAIS, RF.; BARROS, NF.; FONSECA, S.; DAMBROZ, C S. Estoques de carbono e nitrogênio nas frações da matéria orgânica em Argissolo sob eucalipto e

pastagem. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 2, p. 261-273, 2011. Disponível em: <<https://bit.ly/2L0saqv>>. Acesso em: 23 nov. 2017.

PINTO-JUNIOR O. B.; SANCHES L.; DALMOLIN A. C.; NOGUEIRA J. S. Efluxo de CO₂ do solo em floresta de transição Amazônia Cerrado e em área de pastagem. **Acta Amazonica**. v. 39, n. 4, p. 813-822, 2009. Disponível em: <<https://bit.ly/2GQxNcE>>. Acesso em: 3 jan. 2018.

PITOMBO, L. M. **Estoques de carbono e nitrogênio e fluxos de gases do efeito estufa em solo com diferentes históricos de aplicação de lodo de esgoto**. 2011. 61 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) – Instituto Agronômico de Campinas, Campinas, 2011. Disponível em: <<https://bit.ly/2EelzUs>>. Acesso em: 4 fev. 2017.

REIS JÚNIOR, F. B.; MENDES, I. C. Biomassa microbiana do solo. **Documentos**, n. 205, p. 9-40, 2007.. Disponível em: <<https://bit.ly/2EcaVP7>>. Acesso em: 16 set. 2017.

RIBEIRO, J. M. Atributos químicos e microbiológicos do solo em sistemas agroflorestais do Norte de Minas Gerais. 2014. 89 f. Dissertação de mestrado (Mestrado em Produção Vegetal) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2014. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/NCAP-9PYG9L/juliana_martins.pdf?sequence=1>. Acesso em: 5 jun. 2017.

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**, v. 26, n. 2, p. 333-351, 2014. Disponível em: <<https://bit.ly/2GL8Vmj>>. Acesso em: 5 ago. 2017.

ROSCOE, R.; MACHADO, P. L. O. **Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica**. Dourados: EMBRAPA Agropecuária Oeste, 2002. Disponível em: <<https://bit.ly/2H4P0wh>>. Acesso em: 16 out. 2017.

RUFINO, M. C., ROWE, E. C., DELVE, R. J.; GILLER, K. E. Nitrogen cycling efficiencies through resource-poor African crop-livestock systems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 112, n. 4, p. 261-282, 2006. Disponível em: <<https://bit.ly/2q0btmh>>. Acesso em: 11 ago. 2017.

SACRAMENTO, J. A. A. S. D.; ARAÚJO, A. C. D. M.; ESCOBAR, M. E. O.; XAVIER, F. A. D. S.; CAVALCANTE, A. C. R.; OLIVEIRA, T. S. D. Soil carbon and nitrogen stocks in traditional agricultural and agroforestry systems in the semiarid region of Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 3, p. 784-795, 2013. Disponível em: <<https://bit.ly/2J9oB1f>>. Acesso em: 12 out. 2017.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRÍCIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1349-1356, 2011. Disponível em: <<https://bit.ly/2q1apOS>>. Acesso em: 6 set. 2017.

SANTOS, D. C.; FARIAS, M. O.; LIMA, C. L. R.; KUNDE, R. J.; PILLON, C. N.; FLORES, C. A. Fracionamento químico e físico da matéria orgânica de um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso. **Ciência Rural**, v. 43, n. 5, p. 838-844, 2013. Disponível em: <<https://bit.ly/2Gri444>>. Acesso em: 16 dez. 2017.

SCHNITZER, M. Organic matter characterization. In: MILLER, R.H.; KEENEY, D. R. (Ed.). **Methods of soil analysis: part 2: chemical and microbiological properties**. 2th. ed. Madison: American Society of Agronomy; Soil Science Society of America, 1982. p. 581-594.

SILVA, E. F.; LOURENTE, E. P. R.; MARCHETTI, M. E.; MERCANTE, F. M.; FERREIRA, A. K. T.; FUJII, G. C. Frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica em solos sob integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1321-1331, 2011. Disponível em: <<https://bit.ly/2GvYUWI>>. Acesso em: 18 nov. 2017.

SILVEIRA, R. B.; MELLONI, R.; PEREIRA, E. G. Atributos microbiológicos e bioquímicos como indicadores da recuperação de áreas degradadas, no sul de Minas Gerais. **Revista Acadêmica: Ciência Animal**, v. 2, n. 2, p. 21-29, 2006. Disponível em: <<https://bit.ly/2uGS4Mz>>. Acesso em: 8 nov. 2017.

SMITH, J. L.; PAUL, E. A. The significance of soil microbial biomass estimation. In: BOLLAG, J. M., STOTZKY, G. (Ed.). **Soil Biochemistry**. New York: Marcel Dekker, 1990. v. 6, p.357-396.

SOUZA, E. D.; COSTA, S. E. V.G.A.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. D. F.; ANDRIGUETI, M.; CAO, E. Estoques 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, n. 6, p. 1829-1836, 2009. Disponível em: <<https://bit.ly/2KXoRk4>>. Acesso: 12 fev. 2017.

STEVENSON, F. J.; COLE, M. A. **Cycles of soil**: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, Xmicronutrients. 2nd. ed. New York: John Wiley & Sons, 1999. 427 p.

TIRLONI, C.; VITORINO, A. C. T.; BERGAMIN, A. C.; SOUZA, L. C. F. D. Physical properties and particle-size fractions of soil organic matter in crop-livestock integration. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 4, p. 1299-1310, 2012. Disponível em: <<https://bit.ly/2pZg6xA>>. Acesso em: 18 mar. 2016.

TÓTOLA, M. R.; CHAER, G. M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v. 2, p. 195-276.

WARDLE, D. A. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil. **Biological Reviews**, v. 67, p. 321-358, 1992. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1469-185X.1992.tb00728.x>>. Acesso em: 20 abr. 2016.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; VINHAL-FREITAS, I. C. Mudanças no carbono e nitrogênio em diferentes compartimentos da matéria orgânica sob sistema agrossilvipastoril. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 4, p. 641-653, 2011. Disponível em: <<https://bit.ly/2uO3vT5>>. Acesso em: 12 jan. 2018.

ZHOU, Z.; WANG, C.; LUO, Y.; XU, X. Effects of forest degradation on microbial communities and soil carbon cycling: a global meta analysis. **Global Ecology and Biogeography**, v. 27, n. 1, p. 110-124, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/geb.12663>>. Acesso em: 12 jan. 2018.

4 ARTIGO

4.1 Artigo – Qualidade da matéria orgânica do solo e estoques de C e N em sistemas integrados de produção no Norte de Minas Gerais

Este artigo foi elaborado conforme as normas da Revista Nutrient Cycling in Agroecosystems

Qualidade da matéria orgânica do solo e estoques de C e N em sistemas integrados de produção no Norte de Minas Gerais

Resumo

Objetivou-se com este estudo avaliar a qualidade da matéria orgânica de um Cambissolo Háplico eutrófico, após a implantação de sistemas silvipastoris no Norte de Minas Gerais em área anteriormente ocupada com pastagem de baixa produtividade. O arranjo dos sistemas implantados consistiu de integração de pasto de capim-marandu com *Eucalipto cloeziana* (SSP1) ou *urograndis* (SSP2). Esses sistemas foram comparados com áreas de estrato regenerante (ER) e vegetação nativa (VN). O delineamento utilizado foi inteiramente casualizado utilizando parcelas subdivididas para avaliar as variáveis físico-químicas e biológicas do solo, e adotou-se o esquema fatorial 4X2 (quatro tratamentos e duas épocas de avaliação) para variáveis efluxo CO₂ e fluxo H₂O do solo ($p < 0,05$). Os estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo aumentaram nos SSP em relação ao ER, porém ainda foram inferiores em relação à VN após quatro anos de implantação. O fracionamento químico e granulométrico indicou que o carbono (C) ficou protegido nas frações mais estáveis da matéria orgânica do solo - MOS (humina e silte+argila). Houve incremento no carbono microbiano do solo no período chuvoso e do quociente metabólico no período seco. O SSP1 aumentou atividade microbiana na camada 10-20 cm do solo quando comparado a VN e ER, resultado que pode ser atribuído à deposição de material vegetal e revolvimento do solo para incorporação em subsuperfície no sistema cultivado. O efluxo CO₂ foi semelhante entre VN e SSP2 no período chuvoso e entre SSP1 e VN no período seco, o que pode indicar uma maior diversidade de organismos e raízes nesses sistemas em relação à ER. Pode-se concluir que a introdução dos sistemas integrados melhorou a qualidade do solo quando comparado a ER, permitindo a maior proteção da MOS.

Palavras-chave: Biomassa microbiana do solo. Carbono. Nitrogênio. Dióxido de carbono. Sistemas silvipastoris.

Soil organic matter quality and C and N stocks in integrated production systems in the North of Minas Gerais

Abstract

The objective of this study was to evaluate the quality of the organic matter of an eutrophic Haplic Cambisol, after the implantation of silvopastoral systems in the North of Minas Gerais, in an area previously occupied by pasture of low productivity. The arrangement of the implanted systems consisted of integration of grass of marandu grass with *Eucalipto cloeziana* (SSP1) or *urograndis* (SSP2). These systems were compared with areas of regenerating stratum (ER) and native vegetation (VN). The design was completely randomized using subdivided plots to evaluate the physical-chemical and biological variables of the soil, and the factorial scheme 4X2 (four treatments and two epochs of evaluation) was adopted for efflux variables CO₂ and flow H₂O from soil ($p < 0,05$). The carbon (C) and nitrogen (N) stocks of the soil increased in the SSP in relation to the RE, but were still lower in relation to the NP after four years of implantation. The chemical and granulometric fractionation indicated that carbon (C) was more stable in protected fractions of soil organic matter - MOS (humina and silt+clay). There was an increase in soil microbial carbon in the rainy season and the metabolic quotient in the dry period. The SSP1 increased microbial activity in the 10-20 cm layer of soil when compared to NR and ER, a result that can be attributed to the deposition of plant material and soil rotation for incorporation into subsurface in the cultivated system. The efflux CO₂ was similar between VN and SSP2 in the rainy season and between SSP1 and VN in the dry period, which may indicate a greater diversity of organisms and roots in these systems in relation to ER. It can be concluded that the introduction of integrated systems improved soil quality when compared to ER, allowing greater protection of MOS.

Keywords: Microbial soil biomass. Carbon. Nitrogen. Carbon dioxide. Silvopastoral systems.

4.1.1 Introdução

A produção agrícola integrada, modelo da agricultura de baixo carbono, tem sido uma das precursoras para qualidade dos solos brasileiros, por permitir a captura do CO₂ no solo através da sua retirada do ar atmosférico. Assim, as áreas tornam-se mais produtivas e diversificadas quanto à produção agrícola (Souza et al. [2009](#); Oliveira et al. [2016](#)).

A adoção desse modelo pode contribuir para neutralização do carbono atmosférico em áreas anteriormente ocupadas com sucessão de culturas apenas, contribuindo para o acúmulo de carbono no solo, com taxas que podem atingir a ordem de 0,82 a 2,58 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Fatores como: tipos de culturas, condições edafoclimáticas e permanência do sistema na área são determinantes na dinâmica deste elemento no solo (Carvalho et al. [2010](#)).

Desta forma, os diferentes extratos vegetais que compõem o sistema aportam matéria orgânica para o solo, contribuindo com a produção de compostos orgânicos de natureza química diversa, que promovem o aumento e diversificação da microbiota do solo. Adicionalmente, a introdução de gramíneas tropicais em sistemas integrados amplia as vias de entrada do C jovem ou prontamente mineralizável contribuindo para a atividade metabólica do solo (Pegoraro et al. [2011](#); Rosa, Sano; Rosendo, [2014](#)).

O diagnóstico sobre uso e manejo do solo pode ser feito com uso de indicadores, microbiota e compartimentos da MOS, uma vez que, são sensíveis as alterações nos ambientes de produção agrícola. Assim, o uso desses indicadores permite identificar quais são as estratégias de manejo sustentáveis para a manutenção da produtividade nos solos cultivados (Jakelaitis et al. [2008](#); Frazão et al. [2010](#)).

Diante do exposto, objetivou-se com este estudo avaliar os compartimentos da matéria orgânica do solo e selecionar os indicadores mais apropriados para o diagnóstico de uso e manejo do solo após quatro anos de implantação de sistemas silvipastoris no Norte de Minas Gerais.

4.1.2 Material e Métodos

4.1.2.1 Localização e características da área de estudo

O estudo foi conduzido no período de janeiro 2016 a julho de 2017, na Fazenda da Barra em Francisco Sá situada no Norte de Minas Gerais nas coordenadas geográficas 16° 38'44,02" S e 43° 42' 43,77" O (Figura 1). A altitude média da área é de 590 m. O relevo é plano e está localizado em uma área de transição entre Cerrado e Floresta Estacional Semidecidual. Conforme Köppen o clima é o Aw, com estações bem definidas apresentando verão quente e úmido e inverno frio e seco. As médias mensais de precipitação e temperatura durante o período avaliativo são apresentadas na Figura 2.

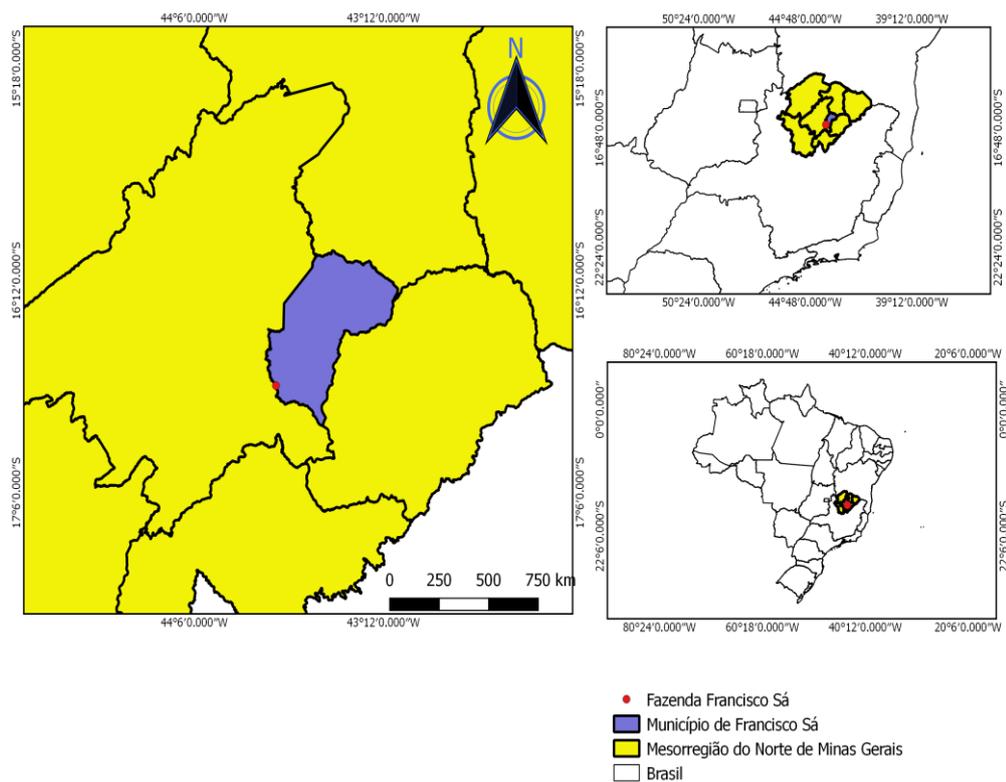


Figura 1 - Mapa de localização da área experimental em Francisco Sá, Minas Gerais.

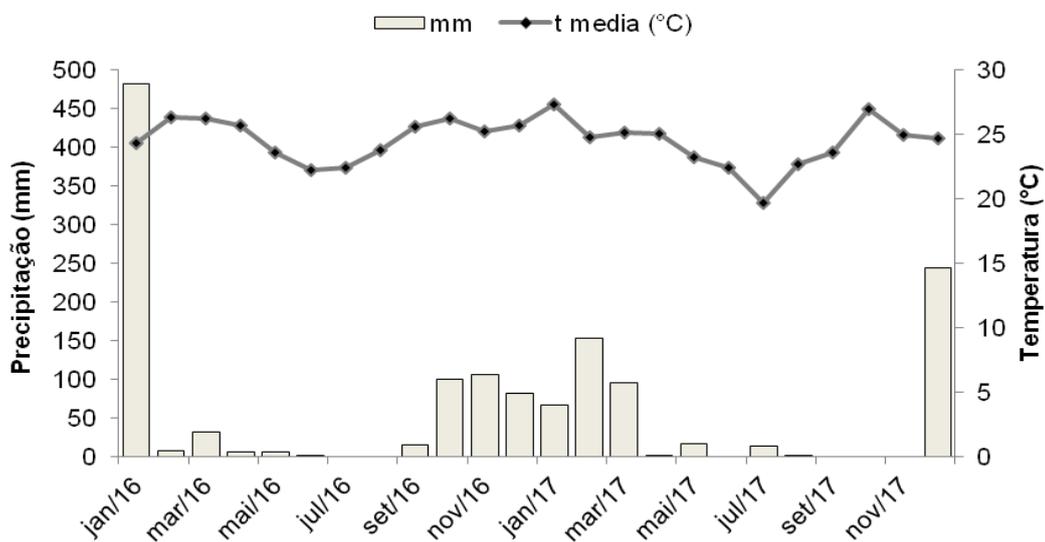


Figura 2 - Precipitação pluviométrica mensal e temperatura para o ano de 2016 e 2017, em Montes Claros, MG. Fonte: INMET, 2017.

O solo da área foi classificado como Cambissolo Háplico eutrófico (Embrapa [2014](#)), com textura média. O solo apresentou boa disponibilidade de nutrientes e baixa saturação por Al^{3+} (Tabela 1).

Tabela 1 - Teores de areia, silte e argila na camada 0-20 cm de Cambissolo Háplico em Francisco Sá - MG

Atributos do solo	VN ⁽²⁾	SSP1 ⁽²⁾	SSP2 ⁽³⁾	ER ⁽⁴⁾
Areia Total (g Kg ⁻¹)	420	520	530	520
Silte (g kg ⁻¹)	300	270	250	240
Argila (g Kg ⁻¹)	280	210	220	240
Silte/Argila	1.07	1.28	1.13	1.00
pH ⁽⁵⁾	5.4	5.4	5.3	5.9
SB ⁽⁶⁾ (cmolc dm ⁻³)	8.6	6.0	6.2	4.9
t ⁽⁷⁾ (cmolc dm ⁻³)	8.6	6.1	6.3	4.9
T ⁽⁸⁾ (cmolc dm ⁻³)	12.9	9.7	9.7	8.2
Ca ⁽⁹⁾ (cmolc dm ⁻³)	5.2	4.2	3.8	2.8
Mg ⁽¹⁰⁾ (cmolc dm ⁻³)	2.7	1.4	2.0	1.6
K ⁽¹¹⁾ (cmolc dm ⁻³)	0,7	0,4	0,4	0,5
Al ⁺³ ⁽¹²⁾ (cmolc dm ⁻³)	0	0.1	0.1	0
m ⁽¹³⁾ (cmolc dm ⁻³)	0	1.6	1.5	0
V ⁽¹⁴⁾ (%)	66.6	61.8	63.9	59.7

⁽¹⁾VN: Vegetação Nativa; ⁽²⁾SSP1: com a espécie Eucalipto cloeziana; ⁽³⁾SSP2: com o híbrido clonal *E.urophylla* e *E.grandis* (*urograndis*); ⁽⁴⁾ER: estrato regenerante. ⁽⁵⁾pH em água. ⁽⁶⁾ Soma de bases trocáveis. ⁽⁷⁾Capacidade de troca catiônica efetiva. ⁽⁸⁾Capacidade de troca catiônica efetiva a pH 7. ⁽⁹⁾Cálcio. ⁽¹⁰⁾Magnésio. ⁽¹¹⁾Potássio. ⁽¹²⁾Alumínio trocável. ⁽¹³⁾Saturação por Alumínio. ⁽¹⁴⁾Saturação por bases. Caracterização química realizada conforme metodologia proposta pela Embrapa (1997).

4.1.2.2 Histórico e implantação do sistema Silvipastoril

A área de estudo foi convertida em 1998 de vegetação nativa para pastagem de *Urochloa brizantha* (syn. *Brachiaria brizantha*), conhecido como capim-marandu, sendo utilizada por 13 anos para bovinocultura de leite. A partir de 2011 não houve condução e a pastagem de capim-marandu foi substituída pela vegetação espontânea, constituindo o estrato regenerante (ER). Em 2012, uma área com 3,2 hectares foi convertida para os sistemas agrossilvipastoris com integração de eucalipto, sorgo e capim-marandu. O arranjo espacial dos sistemas foi realizado com renques duplos de eucalipto (com espaçamento de 2x3m) e espaçamento de 14 metros entre os renques (aléias) (Figura 3a). Em dezembro de 2012 foi plantado eucalipto com sorgo que foi colhido em maio de 2013 para silagem.

Em novembro 2013 houve a ressemeadura do sorgo juntamente com plantio do capim-marandu. A segunda colheita de sorgo para silagem foi realizada em abril de 2014 e o pasto não teve boa formação devido ao período longo de estiagem. Em novembro de 2014, realizou-se uma gradagem pesada, ressemeadura do capim-marandu e a desrama do eucalipto, e a partir destas operações de manejo os sistemas permaneceram com arranjo composto pelo componente florestal e capim-marandu (silvipastoril) (Figura 3). As avaliações do presente estudo foram realizadas a partir de 2016.

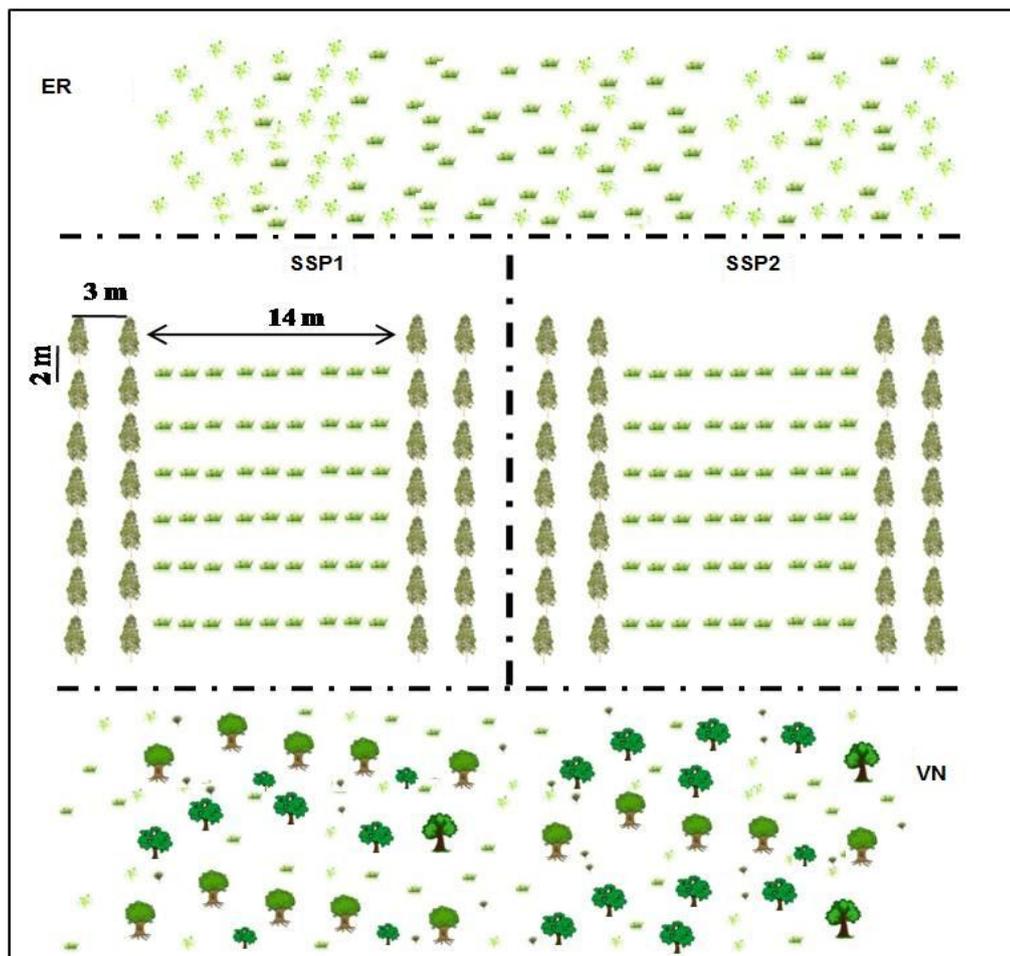


Figura 3 - Representação esquemática de sistemas integrados implantados em 2013.

4.1.2.3 Delineamento experimental e descrição dos tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado com quatro tratamentos descritos a seguir:

- Sistema Silvopastoril utilizando eucalipto cloeziana (*Eucalyptus cloeziana*) consorciado com capim-marandu (*Urochloa brizantha*) - (SSP1);
- Sistema Silvopastoril utilizando o híbrido eucalipto urograndis (*E. urophylla* x *E. grandis*) consorciado com capim-marandu (*Urochloa brizantha*) - (SSP2);
- Estrato regenerante (ER): área anteriormente cultivada com pastagem de *Urochloa brizantha* e que no momento das avaliações apresentava vegetação espontânea;
- Vegetação nativa (VN): área de referência, caracterizada por vegetação típica de áreas de transição entre Cerrado e Floresta Estacional Semidecidual.

4.1.2.4 Amostragem do solo e preparo das amostras

As amostragens de solo foram realizadas entre os anos de 2016 e 2017. Em fevereiro de 2016 parcelas de 2500 m² foram lançadas em cada área avaliada e quatro minitrincheiras foram abertas para a retiradas de amostras de solos em quadruplicatas nas camadas de 0-10, 10-20, 20-30,

e 30-40 cm de profundidade e determinação da densidade do solo, teores de C e N, frações granulométricas e húmicas da MOS.

A coleta das amostras indeformadas para determinação da densidade do solo foi realizada pelo método do anel volumétrico (Embrapa [1997](#)).

As amostras foram secas ao ar (TFSA), passadas em peneiras com malha de 2mm para realização do FG e FSH. Parte das amostras foram moídas e passadas em peneiras com malha de 0,150 mm para determinação dos teores de COT e NT.

Para a determinação dos atributos microbiológicos a amostragem de solo foi realizada nas camadas 0-5, 5-10 e 10-20 cm de profundidade no ano de 2017 em dois períodos: janeiro (quente e úmido) e julho (frio e seco). As amostras foram devidamente acondicionadas e armazenadas na geladeira a 4° C até o início das análises. Posteriormente, realizou-se o peneiramento em tamis com malha de 2 mm, catação manual de pequenos fragmentos vegetais para evitar possíveis interferências nas análises, e pesagem das amostras de solo.

4.1.2.5 Teores e Estoques de Carbono e Nitrogênio do Solo

Os teores de COT e NT foram realizados por meio do analisador elementar LECO@TruSpec que determinou o teor de C por absorção de infravermelho e o NT por condutividade térmica. Para o cálculo dos estoques de C (EC) ou N (EN), em Mg ha⁻¹, multiplicou-se o teor de COT ou NT (%) pela densidade do solo (g cm⁻³) e respectiva profundidade amostrada (cm).

4.1.2.6 Frações Granulométricas da MOS

A determinação das FG foi realizada de acordo com metodologia adaptada de Christensen (1985; 1992). Pesou-se 20 gramas (g) TFSA de solo para cada subamostra e 70 ml de água foram vertidos em frascos de vidro, e mantidos em ambiente refrigerado. Posteriormente, as mesmas foram sonicadas em aparelho ultrassom (Sonics Vibra Cell™) durante 25 minutos com amplitude de 53% e energia média de 1028,57 J mL⁻¹. Após a dispersão, realizou-se o peneiramento úmido em tamis de 0,053 mm. Ao material retido na peneira (>0,053) contendo as frações leve e livre (FLL) e areia (Fareia), a separação foi realizada por diferença densidade. A fração que passou pela peneira (<0,053) fração silte+argila (Fsilte+argila) foi transferida para refratários de vidro. Em seguida, foram secas em estufa a 65°C, sendo o período 24h (FLL e Fareia) e 96h (Fsilte+argila). Após moagem e pesagem das frações a 0,150 mm determinou-se os teores de C-FLL, C-Fareia e C-Fsilte+argila por combustão a seco, através do analisador elementar LECO@TruSpec.

4.1.2.7 Frações húmicas da MOS

As frações humificadas da MOS foram determinadas de acordo com metodologia adaptada de Swift ([1996](#)), onde em 0,5 g de (TFSA) foi utilizada solução extratora de NaOH a 0,1 mol L⁻¹ que solubilizou os ácidos fúlvicos (AF) e ácidos húmicos (AH). A fração humina (FHUM) precipitou após três ciclos de centrifugação e extração, o resíduo sólido foi armazenado em estufa. A separação do AF e AH ocorreu em meio sulfúrico a (20%) com pH igual a 2,0±0,1. O teor de C foi obtido pelo método de oxidação por via úmida (Yeomans; Bremner [1988](#)).

Obtidas as frações húmicas, foram calculadas as relações entre as frações alcalino solúveis (FAH/FAF) e entre o extrato alcalino EA=FAH+FAF e a fração húmica (EA/FHUM).

4.1.2.8 Determinação do Carbono da Biomassa Microbiana (Cmic) e Respiração Basal do Solo (RBS)

A determinação do Cmic foi realizada pelo método de fumigação-extração, de acordo com Vance et al. (1987) e adaptado por Silva; Azevedo e De-Polli (2007), utilizando clorofórmio isento de etanol. Para cada subamostra foram pesadas 10 g de solo em dois tubos de falcon, uma parte contendo solo para amostras fumigadas e outra para não fumigadas (controle). Para extração do C do solo utilizou-se como solução extratora o K_2SO_4 0,5 mol L⁻¹. Os extratos obtidos foram centrifugados, filtrados e armazenados em ambiente refrigerado até o momento das análises. O Cmic foi obtido pela diferença entre o C das amostras fumigadas e não fumigadas, aplicado a fator um fator de correção que representa a eficiência da extração.

A RBS foi determinada por meio do CO₂ evoluído e a extração com NaOH 0,5 mol L⁻¹ conforme Jenkinson e Powlson (1976) e adaptado por Silva; Azevedo e De-Polli (2007), através de recipientes fechados contendo 100g de solo e copo com 20 ml de NaOH que foi utilizado para recuperação do carbono evoluído (C-CO₂) emitido durante a respiração dos microrganismos do solo. O CO₂ desprendido foi avaliado às 24h, 48h, 72h e 120h, totalizando 31 dias de avaliações. Ao final de cada avaliação a alíquota contendo a solução extratora era substituída por outra de mesma quantidade e concentração. A quantificação do C-CO₂ foi realizada pela titulação do excesso de NaOH que não reagiu com C-CO₂, com solução padronizada de HCl 0,25 mol L⁻¹. A RBS foi determinada quando houve estabilização, entre 72h e 120h, da respiração dos microrganismos do solo.

Após a avaliação do Cmic e RBS foi possível calcular o quociente microbiano do solo (qMIC), obtido pela razão entre o Cmic e o COT, e o quociente metabólico do solo (qCO₂), obtido pela razão entre a RBS e Cmic (Anderson e Domsch 1993).

4.1.2.9 Avaliação do Efluxo de CO₂ do Solo

Para o cálculo do efluxo de CO₂ do solo utilizou-se o analisador de gás por infravermelho (IRGA) modelo Lcpro-sd, utilizando-se câmaras que foram colocadas sobre o solo, e acopladas a uma campânula modelo ADC Soil Hood. As medições foram feitas realizadas nos meses de janeiro e julho no período diurno, entre 8:00 e 12:00 horas.

Os cálculos dos efluxos de CO₂ do solo foram realizados por meio da diferença entre a concentração dos gases emitidos na câmara e a concentração no ambiente.

4.1.2.10 Análise Estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e, quando significativos foram comparados pelo teste Tukey ($p < 0.05$). Todas as análises foram realizadas empregando os pacotes estatísticos do software R versão 3.4.3.

4.1.3 RESULTADOS

4.1.3.1 Teores e Estoques de Carbono Orgânico e Nitrogênio do Solo

Os teores de C e N apresentaram diferenças significativas apenas na camada de 0-10 cm de profundidade (Figura 4). Não foram observadas diferenças significativas entre os diferentes usos e manejo do solo para a relação C:N, que variou entre 10,36 e 14,85. A densidade do solo variou entre 1,18 e 1,51 e não diferiu entre os sistemas avaliados.

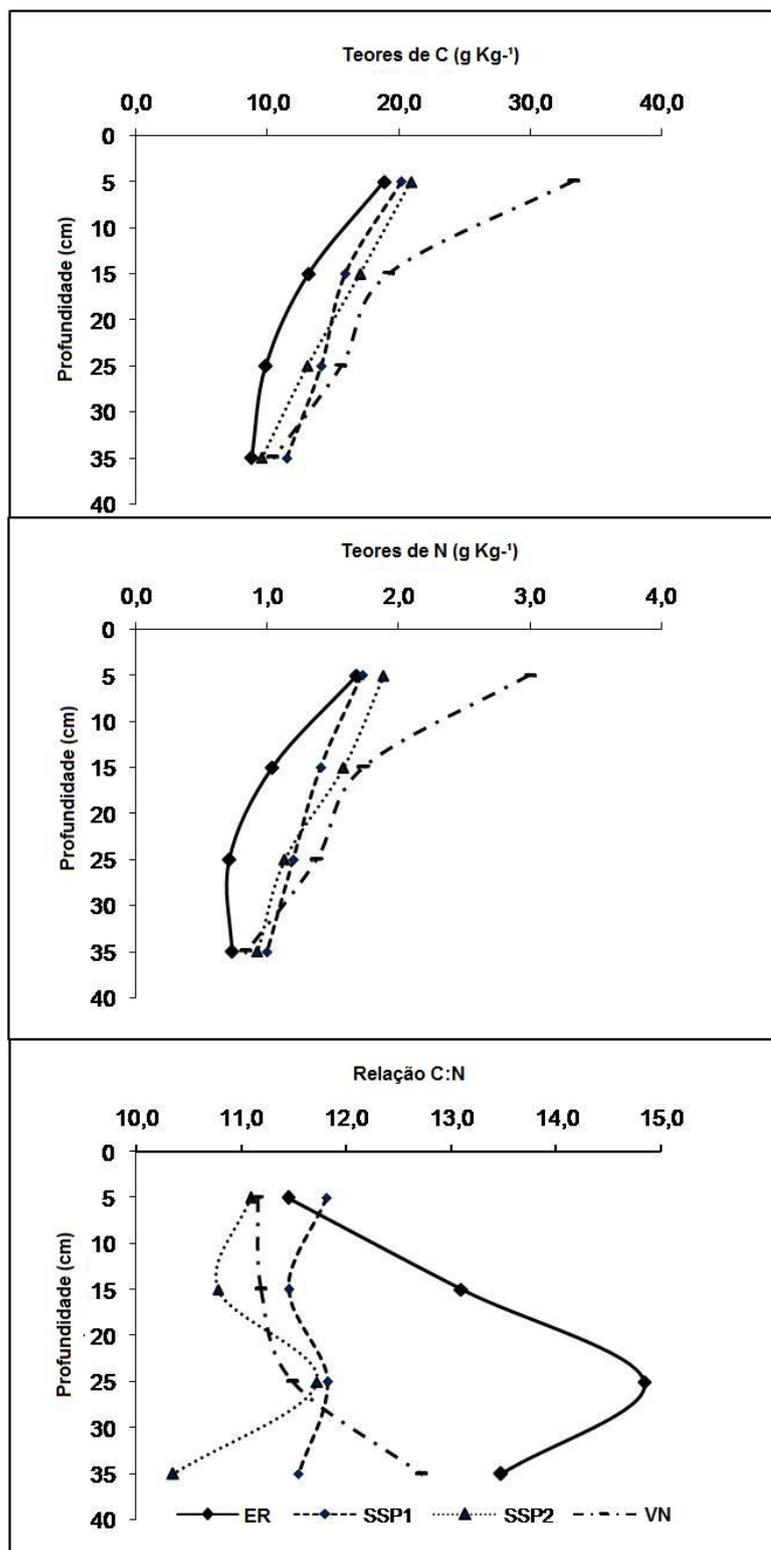


Figura 4 - Teores de Carbono e Nitrogênio (g Kg⁻¹) e Relação C:N do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo em Francisco Sá – MG. VN, Vegetação Nativa; SSP1, Sistema integrado com eucalipto cloeziana e capim-marandu; SSP2, Sistema integrado com eucalipto urograndis e capim-marandu; ER, Estrato regenerante.

Os sistemas integrados promoveram aumento dos estoques de C e N apenas em subsuperfície, com reduções significativas apenas na camada 0-10 cm quando comparado a VN. As intervenções agrícolas iniciais (gradagem pesada e a colheita do sorgo) podem ter contribuído para as reduções observadas em relação à VN pela exposição da MO a degradação microbiana com declínio nos estoques de C e N no solo, entretanto, observa-se melhorias dos sistemas integrados em relação à testemunha ER. Após quatro anos de implantação dos sistemas silvipastoris (SSP1 e SSP2), ambos apresentaram aumento nos estoques de C e N quando comparados ao ER, porém, ainda inferiores a VN. Os valores variaram entre 13,42 Mg ha⁻¹ e 39,59 Mg kg⁻¹ para os estoques de C e entre 1,29 Mg ha⁻¹ e 3,56 Mg kg⁻¹ os estoques de N (Figura 5).

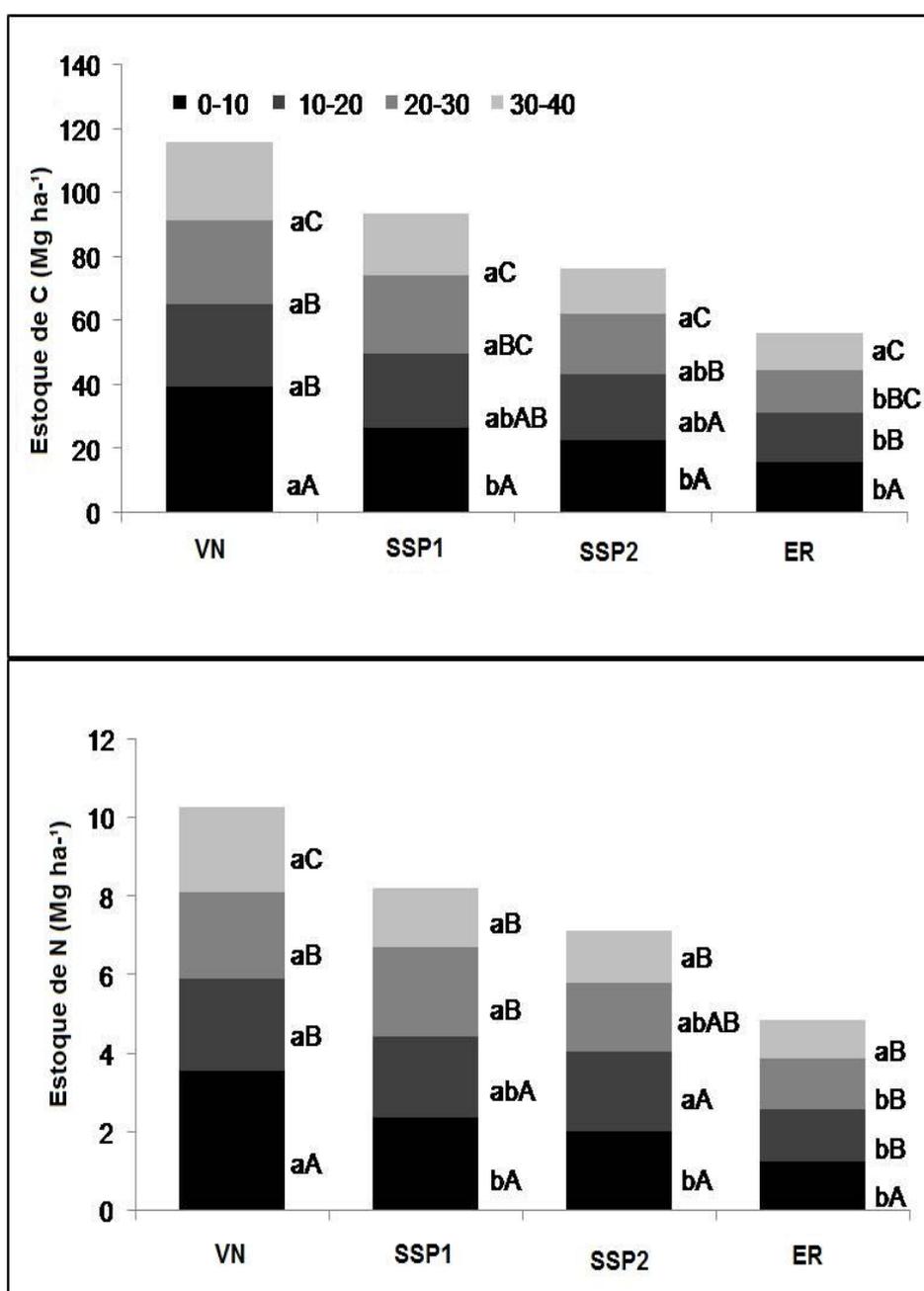


Figura 5 - Estoques de Carbono e Nitrogênio (Mg ha^{-1}) do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo em Francisco Sá – MG. VN, Vegetação Nativa; SSP1, Sistema integrado com eucalipto cloeziana e capim-marandu; SSP2, Sistema integrado com eucalipto urograndis e capim-marandu; ER, Estrato regenerante. A média seguida de mesma letra minúscula não difere quanto ao sistema avaliado e as letras maiúsculas quanto à profundidade. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.1.3.2 Carbono associado às frações granulométricas da MOS

Avaliando as frações granulométricas (FG) da MOS observou-se maior percentual de carbono orgânico (CO) associado a F-silte+argila, seguido pela F-areia e FLL. O sistema Silvipastoril com eucalipto cloeziana (SSP1) foi o que mais contribuiu para a proteção do C (67,87% a 75,63%) na F-silte+argila até a profundidade de 40 cm do solo (Figura 6).

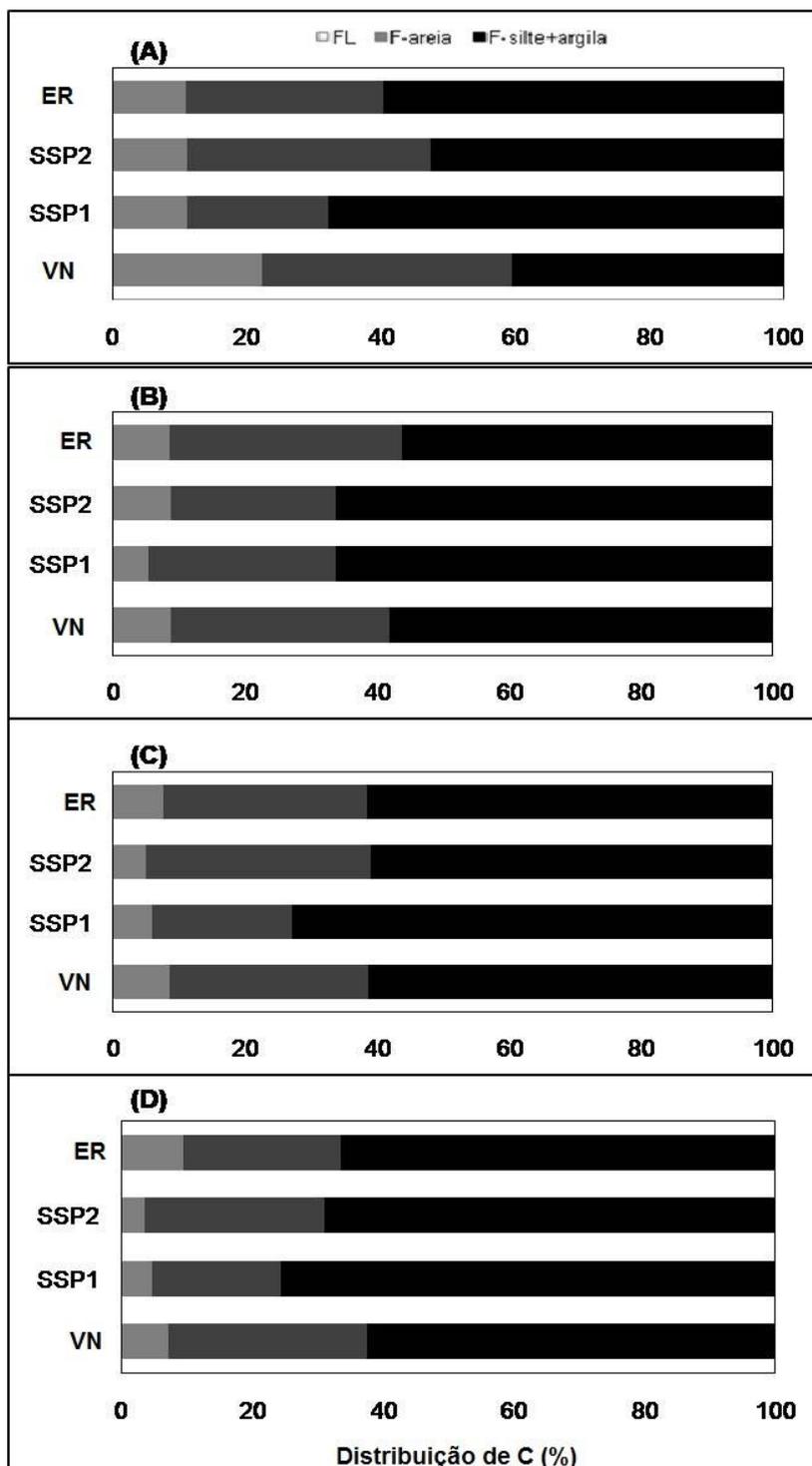


Figura 6 - Distribuição percentual do teor de C nas frações granulométricas da MOS nas profundidades 0-10 (A), 10-20 (B), 20-30 (C) e 30-40 (D) do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo em Francisco Sá – MG. VN, Vegetação Nativa; SSP1, Sistema integrado com eucalipto cloeziana e capim-marandu; SSP2, Sistema integrado com eucalipto urograndis e capim-marandu; ER, Estrato regenerante. FLL, Fração leve e livre; Fareia, Fração areia; Fsilte+argila, fração silte e argila.

O período de coleta (úmido) interferiu na atividade metabólica do solo e, conseqüentemente na maior oferta de carbono prontamente mineralizável ou oxidável para o sistema. A FLL foi superior VN na camada superficial, representando 22,24% do COT. A menor retenção do C na F-areia foi influenciada pela textura média do solo e, a maior proteção do C pela F-silte+argila.

Os teores de C da FLL na camada superficial da VN foi superior em relação aos demais tratamentos, com reduções de 67,82%, 65,21% e 72,46%, respectivamente para o SSP1, SSP2 e ER. Não foram verificadas diferenças significativas nas camadas mais profundas entre os sistemas de uso do solo. A maior deposição de resíduos ao solo, ausência de intervenções antrópicas e menor exposição da MOS, podem ter contribuído para os resultados observados. Além disso, os SSPs no ano 2014 tiveram o solo perturbado pela gradagem para o plantio do capim-marandu, o que pode ter contribuído para as reduções dos teores de C.

Em relação à F-areia, o menor conteúdo de C foi apresentado no SSP1 em relação à VN, que pode ser atribuído ao maior consumo dos materiais orgânicos pouco transformados pela microbiota do solo em janeiro, que aumentou consideravelmente de tamanho em relação aos demais sistemas, requerendo, portanto, mais substrato orgânico para manutenção do metabolismo microbiano.

Para a F-silte+argila não foi observada diferença significativa quanto ao conteúdo de carbono entre os sistemas, embora o SSP1 tenha apresentado um incremento de 7,1% de C em relação à VN. Esse resultado é um indicativo de que os sistemas integrados podem promover a recuperação dos teores de C no solo em frações mais estáveis da MOS no longo prazo.

4.1.3.3 Carbono associado às frações húmicas da MOS

Analisando as frações húmicas da MOS verificou-se que a maior parte do carbono encontra-se protegido na FHUM, seguido pela FAH e FAF, com valores para a FHUM que variam entre 5,62 g kg⁻¹ e 23,23 g kg⁻¹ (Figura 7).

O sistema SSP2 foi o maior responsável pelo grau de humificação da MOS, tendo em vista que mais 72% do carbono encontra-se protegido na FHUM deste sistema. Além disso, o predomínio da FHUM, neste sistema em camadas subsuperficiais, deve-se a menor influência de variáveis biológicas e ambientais. Por outro lado, a maior solubilidade da MOS foi observada no SSP1 que apresentou 52% do C protegido na FHUM e maior representação deste elemento nas frações alcalino-solúveis (FAF e FAH). Fatores como: quantidade e diversidade de microrganismos, qualidade do substrato orgânico e a sazonalidade da biomassa microbiana podem ter contribuído para os resultados observados.

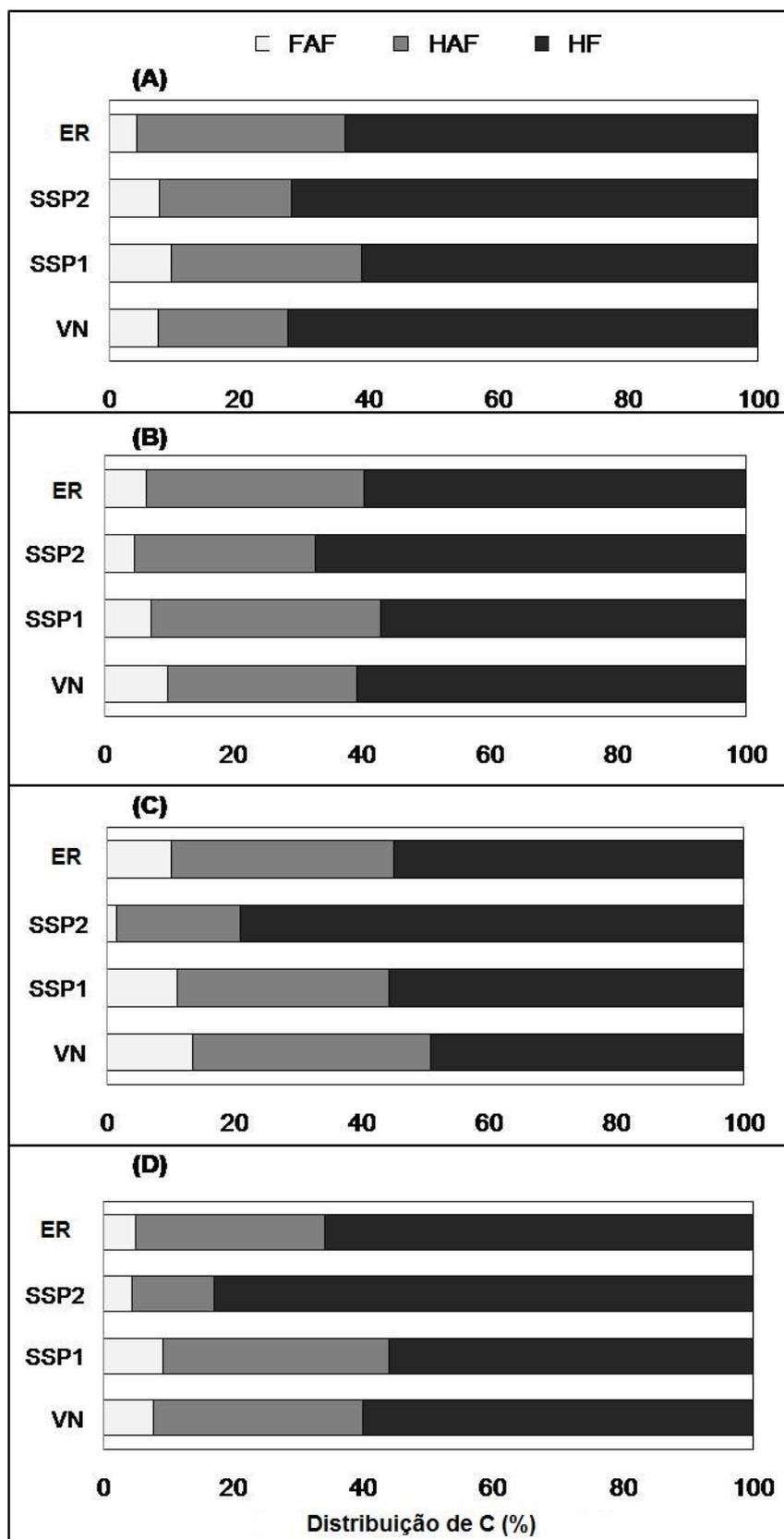


Figura 7 - Distribuição percentual do teor de C nas frações húmicas da MOS nas profundidades 0-10 (A), 10-20 (B), 20-30 (C) e 30-40 (D) do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo em Francisco Sá – MG. VN, Vegetação Nativa; SSP1, Sistema integrado com eucalipto cloeziana e capim-marandu; SSP2, Sistema integrado com eucalipto urograndis e capim-marandu; ER, Estrato regenerante. FAF, fração ácido fúlvico; FAH, fração ácido húmico; FHUM, fração humina.

Não houve interação entre os fatores (sistemas x profundidades) para a relação entre as frações ácido húmico e ácido fúlvico (FAH/FAF), entretanto os valores foram superiores a 2,58 e indicaram um maior conteúdo de carbono para FAH (Figura 8). Para a relação entre o extrato alcalino e a humina (FAF+FAH)/HUM os valores foram menores que 1,0, com exceção da VN (20-30 cm de profundidade) que apresentou proporções próximas entre as frações alcalino-solúveis e humina. Entre os sistemas avaliados o SSP2 foi o que obteve em média mais de 72% do COT representado pela FHUM, justificando os baixos valores encontrados para a relação (FAF+FAH)/HUM que variaram de 0,20 a 0,48 g kg⁻¹ e esse valor pode ser atribuído a maior recalcitrância da serapilheira do eucalipto.

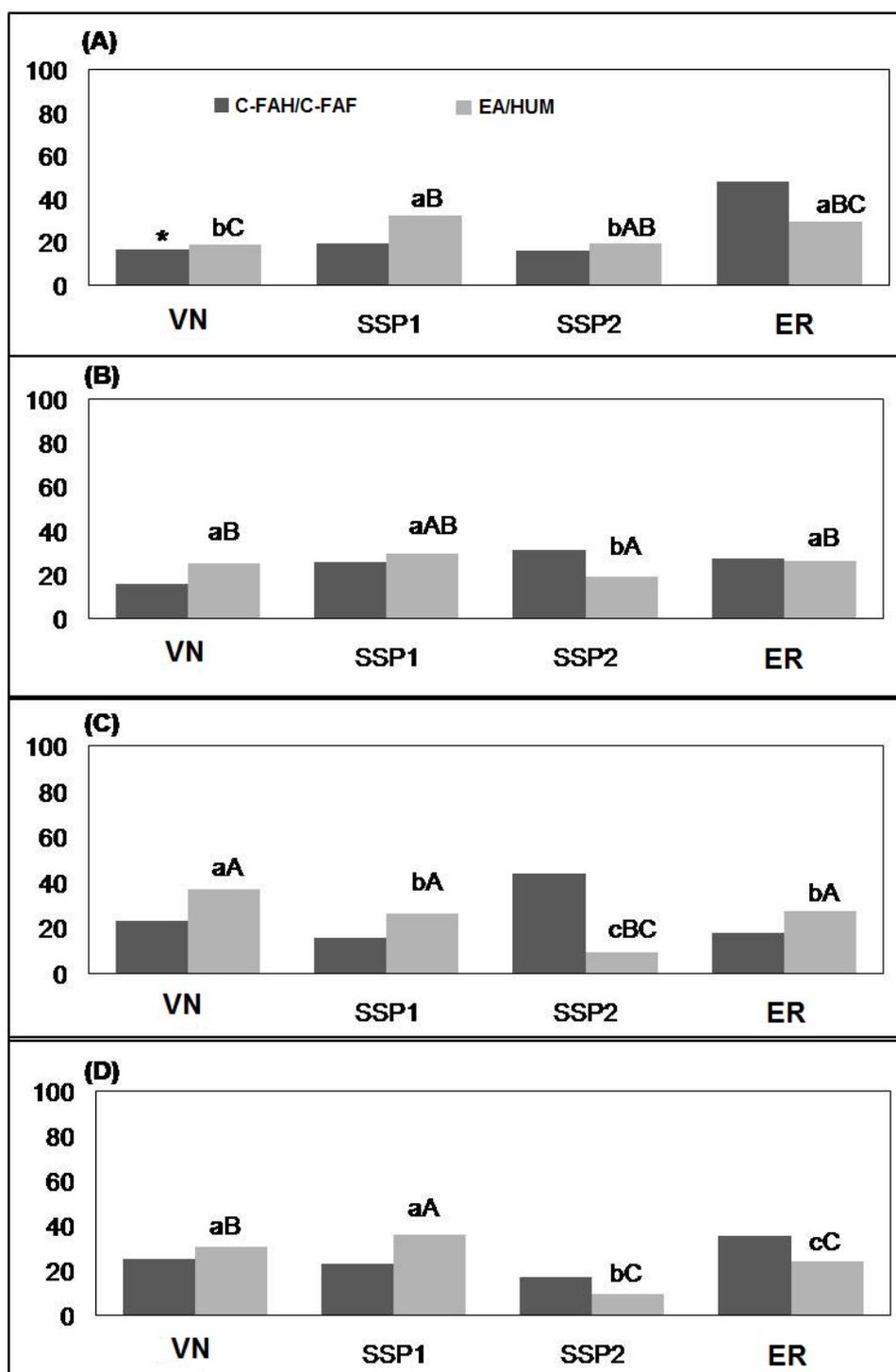


Figura 8 - Relações entre o carbono associado às frações das substâncias húmicas da MOS sob diferentes sistemas de uso e manejo em Francisco Sá – MG. As barras verticais seguidas de letras minúsculas comparam tratamentos e as maiúsculas profundidades. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Para a relação C-FAH/C-FAF não foi verificada interação significativa. VN, Vegetação Nativa; SSP1, Sistema integrado com eucalipto cloeziana e capim-marandu; SSP2, Sistema integrado com eucalipto urograndis e capim-marandu; ER, Estrato regenerante. Relação entre o carbono das frações alcalino-solúveis C-FAH/C-FAF e entre o extrato alcalino (EA = FAH+FAF) e humina (HUM) EA/HUM.

4.1.3.4 Atributos microbiológicos do solo

A atividade dos microrganismos no solo, avaliada pela determinação do carbono microbiano e respiração basal do solo, sofreu alteração em função das épocas de avaliação (Tabela 3). Nos sistemas avaliados, o carbono microbiano (Cmic) e o quociente microbiano (qMIC) foram superiores no período quente e úmido (janeiro) em relação ao período frio e seco, época em que verificou-se baixo valores de respiração basal do solo (RBS) e quociente metabólico (qCO₂), indicando maior estabilidade dos microrganismos do solo. Já no mês de julho, período frio e seco, observou-se altas taxas de respiração e baixo conteúdo de C imobilizado. O sistema SSP2 apresentou resultado diferente, com valores superiores de Cmic na camada 0-5 cm em julho.

Tabela 2 - Atributos microbiológicos do solo em janeiro sob diferentes sistemas de uso e manejo no município de Francisco Sá – MG

Sistemas	Janeiro		
	⁽⁵⁾ Cmic (mg kg ⁻¹)		
	Profundidades (cm)		
	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm
VN ⁽¹⁾	366,30 aAB	373,72 Aa	227,20 bB
SSP1 ⁽²⁾	341,30 aA	356,4 abA	424,71 aA
SSP2 ⁽³⁾	144,29 bA	241,80 abA	259,13 abA
ER ⁽⁴⁾	282,64 abA	186,86 bA	186,36 bA
	⁽⁶⁾ RBS (mg C-CO ₂ kg ⁻¹ solo dia ⁻¹)		
VN	3,60 bA	2,88 aB	2,40 bB
SSP1	3,60 bA	3,12 aA	3,12 abA
SSP2	3,84 bA	2,88 aB	3,84 aA
ER	5,28 aA	3,12 aB	2,64 bB
	⁽⁷⁾ qCO ₂ (mg C-CO ₂ g Cmic dia ⁻¹)		
VN	0,42 bA	0,34 aA	0,46 aA
SSP1	0,47 bA	0,43 aA	0,33 aA
SSP2	2,00 aA	0,54 aB	0,62 aA
ER	0,83 bA	0,84 aA	0,94 aA
	⁽⁸⁾ qMIC (%)		
VN	1,39** ⁽¹⁰⁾	1,96**	1,30**
SSP1	2,02	2,33	2,87
SSP2	0,94	1,88	2,11
ER	2,63	3,46	3,76

⁽¹⁾vegetação nativa, ⁽²⁾ Sistema integrado com eucalipto cloeziana e capim-marandu, ⁽³⁾Sistema integrado com eucalipto urograndis e capim-marandu, ⁽⁴⁾estrato regenerante, ⁽⁵⁾carbono microbiano, ⁽⁶⁾respiração basal do solo; ⁽⁷⁾quociente metabólico; ⁽⁸⁾quociente microbiano. ⁽¹⁰⁾Não foi verificado efeito para interação (sistemas x profundidades). Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna indicam semelhança entre tratamentos e, as maiúsculas, igualdade entre profundidades pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 3 - Atributos microbiológicos do solo em julho sob diferentes sistemas de uso e manejo no município de Francisco Sá - MG

Sistemas	Julho		
	⁽⁵⁾ Cmic (mg kg ⁻¹)		
	Profundidades (cm)		
	0 - 5 cm	5 - 10 cm	10 - 20 cm
VN ⁽¹⁾	318,53 aA	147,01 aB	81,67 abB
SSP1 ⁽²⁾	285,86 abA	138,84 aB	57,17 Bb
SSP2 ⁽³⁾	212,35 abA	236,85 aA	204,18 aA
ER ⁽⁴⁾	187,85 ba	114,34 aA	106,17 abA
⁽⁶⁾ RBS (mg C-CO ₂ kg ⁻¹ solo dia ⁻¹)			
VN	13,92 aA	13,2 aA	11,52 bB
SSP1	11,52 bB	12,24 aAB	13,68 aA
SSP2	14,4 aA	13,20 aA	11,28 bB
ER	12,24 abAB	13,44 aA	11,52 bB
⁽⁷⁾ qCO ₂ (mg C-CO ₂ g Cmic dia ⁻¹)			
VN	1,88 aB	3,09 abB	6,27 abA
SSP1	1,74 aB	3,96 abB	16,47 aA
SSP2	2,99 aA	2,45 bA	2,94 bA
ER	3,23 aA	5,41 aA	4,22 bA
⁽⁸⁾ qMIC (%)			
VN	** ⁽¹⁰⁾ 1,23 aA	0,77 bA	0,43 bcA
SSP1	1,69 aA	0,90 bAB	0,37 cB
SSP2	1,39 aA	1,84 abA	1,61 bA
ER	2,20 aA	2,15 Aa	3,28 aA

⁽¹⁾vegetação nativa, ⁽²⁾integração pecuária-floresta com eucalipto cloeziana, ⁽³⁾integração pecuária-floresta com eucalipto urograndis, ⁽⁴⁾estrato regenerante, ⁽⁵⁾carbono microbiano, ⁽⁶⁾respiração basal do solo; ⁽⁷⁾quociente metabólico; ⁽⁸⁾quociente microbiano.⁽¹⁰⁾Não foi verificado efeito para interação (sistemas x profundidades). Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna indicam semelhança entre tratamentos e, as maiúsculas, igualdade entre profundidades pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A partir do quarto ano de condução dos sistemas (2016), observou-se maior queda das folhas das árvores de eucalipto nos sistemas integrados. A maior deposição de resíduos orgânicos associada à manutenção da umidade do solo observada no eucalipto urograndis (SSP2) pode ter influenciado na ativação da microbiota do solo, permitindo um maior acúmulo de C na camada 0-5 cm em julho de 2017.

Em janeiro de 2017, os valores de Cmic variaram entre 144,29 e 424,71 mg kg⁻¹ solo dia⁻¹ e em julho entre 57,17 e 318,53 mg Kg⁻¹ solo dia⁻¹ (Tabela 3). Verificou-se que, em janeiro, o ER apresentou resultados semelhantes à VN nas camadas 0-5 e 10-20 cm de profundidade. A estabilidade do ambiente edáfico, proporcionado pela ausência de operações agrícolas e interferência antrópica influenciaram na atividade específica dos microrganismos do solo, com menores distúrbios para população, justificando os baixos índices de qCO₂ e altos Cmic para os ambientes avaliados.

A umidade e temperatura da época úmida (janeiro) influenciaram na degradação do material orgânico pela microbiota do solo, interferindo na ciclagem de nutrientes e imobilização do C no tecido microbiano.

Os valores do Cmic aumentaram nas camadas subsuperficiais nos sistemas integrados com eucalipto cloeziana (SSP1) e urograndis (SSP2) no período chuvoso. A gradagem realizada em 2014

nos sistemas integrados, com incorporação dos resíduos remanescentes de capim-marandu, pode ter contribuído para o aumento da população microbiana nas camadas mais profundas de solo.

Os valores da RBS variaram entre 2,40 e 5,28 mg C-CO₂ Kg⁻¹ solo dia⁻¹ na estação úmida (janeiro/2017) e entre 11,28 a 14,4 mg C-CO₂ Kg⁻¹ solo dia⁻¹ na estação seca (julho/2017) (Tabela 3). Os baixos valores observados em janeiro indicaram a estabilidade da BMS, evidenciada pelos baixos valores do qCO₂ em relação a julho.

As maiores variações na RBS para os dois períodos avaliados foram observados nas camadas 0-5 e 10-20 cm de profundidade, provavelmente porque abrangem regiões de influência próximas à superfície (aporte de resíduos) e rizosfera (liberação de compostos orgânicos), respectivamente.

Os altos valores de qCO₂ no SSP1 (0,23 mg C-CO₂ Kg⁻¹ solo dia⁻¹) em julho refletiu um ambiente de alta perturbação e com maiores distúrbios para a microbiota do solo pela baixa imobilização do CO pela microbiota do solo (qMiC) e alta RBS.

4.1.3.5 Efluxo de CO₂ do solo

A respiração do solo do solo sofreu interferência do clima, com efluxo de CO₂ variando entre 0,19 e 0,84 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ no mês de julho (período seco) e entre 0,92 e 1,60 em janeiro (período chuvoso), respectivamente (Figura 9).

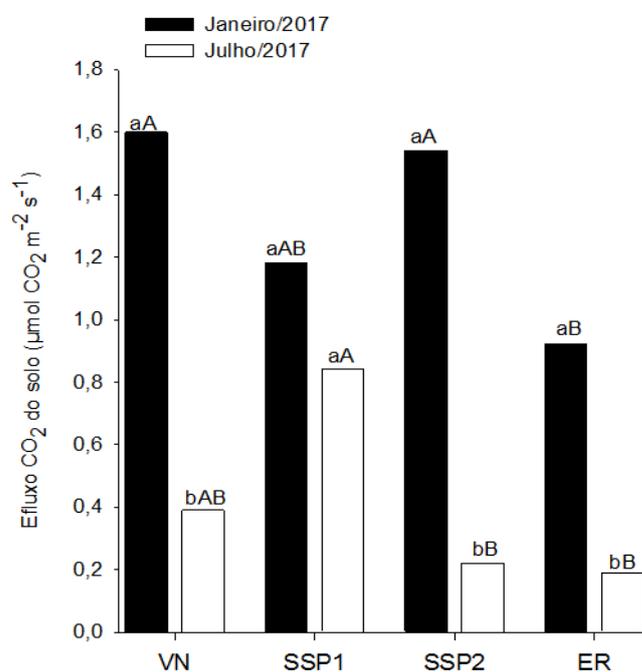


Figura 9 - Efluxo de CO₂ (μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) do solo em janeiro e julho de 2017 (estações úmida e seca) sob diferentes sistemas de uso e manejo em Francisco Sá – MG. As barras verticais seguidas da mesma letra minúscula (tratamentos para mesma época) e maiúscula (tratamentos entre as épocas avaliadas) não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (p<0,05). VN, Vegetação Nativa; SSP1, Sistema integrado com eucalipto cloeziana e capim-marandu; SSP2, Sistema integrado com eucalipto urograndis e capim-marandu; ER, Estrato regenerante.

Em janeiro o maior efluxo de CO₂ pode ser explicado, em parte, pela intensa atividade biológica do solo. A respiração do solo foi superior em VN, SSP1 e SSP2 em relação à ER, uma vez que esta última área possui menor diversidade vegetal, o que contribuiu para uma menor atividade dos organismos no solo. Em julho os valores reduziram consideravelmente em função das menores temperaturas e umidade do solo, evidenciando o efeito sobre a respiração dos organismos no solo.

4.1.4 Discussão

4.1.4.1 Teores e estoques de C e N nos diferentes sistemas de uso e manejo do solo

Após quatro anos de implantação dos sistemas integrados de produção (SSP1 e SSP2) em Cambissolo Háplico, pode-se observar aumento dos teores de C e N do solo em relação ao Estrato regenerante (ER) (Figura 4). Esses resultados podem ser atribuídos ao manejo inicial de implantação do sistema, o qual foi realizado sem revolvimento do solo (plantio direto), com cultivo de sorgo nos dois primeiros anos e posterior incorporação da palhada. Além disso, a condução do capim-marandu promoveu boa cobertura do solo e renovação constante do sistema radicular, e as operações de desrama dos eucaliptos também contribuíram para o aporte de serapilheira ao solo, promovendo a elevação dos teores de C e N em relação à área não manejada (ER).

Os baixos valores da relação C:N refletiram a disponibilidade de N no solo e, conseqüentemente, maior oferta de substrato para a os microrganismos do solo, favorecendo assim a ciclagem de nutrientes e as reservas de C e N nos sistemas (Silva; Mendonça [2007](#)). Estudo realizado por Souza et al. ([2009](#)) em sistemas de integração lavoura-pecuária com sistema de plantio direto (SPD) constatou aumento dos estoques de C e N do solo igual a 3,47 Mg ha⁻¹ e 0,345 Mg ha⁻¹, respectivamente.

Os estoques de C e N (Figura 5) na camada superficial (0-10 cm) dos sistemas SSP1 (25,85 Mg ha⁻¹ e 2,35 Mg ha⁻¹) e SSP2 (26,15 Mg ha⁻¹ e 2,20 Mg ha⁻¹) foram superiores aqueles encontrados por Wendling et al. ([2011](#)) em Latossolo Vermelho distrófico após três (18,54 Mg ha⁻¹ e 1,26 Mg ha⁻¹), seis (20,57 Mg ha⁻¹ e 1,54 Mg ha⁻¹) e dez (22,85 Mg ha⁻¹ e 1,49 Mg ha⁻¹) anos de implantação de sistemas integrados de produção cultivados com eucalipto e braquiária. O constante aporte de resíduos nesses sistemas, embora inferior ao observado em VN, aliado a diminuição do revolvimento, contribuiu também para o incremento de C e N nas camadas mais profundas, resultado que pode ser atribuído a alta capacidade de adição do carbono pelas raízes das gramíneas do gênero *Urochloa* inseridas nos sistemas integrados de produção (Rosseti e Centurion [2015](#)).

A dinâmica do C e N no solo pode ser alterada ao longo do tempo, pela maior sustentabilidade conferida pelo sistema, resultante da maior interação entre os componentes vegetais e animais com o solo, influenciando nos estoques de C e N do solo (Sacramento et al. [2013](#)). Os resultados encontrados neste estudo, após quatro anos de implantação dos sistemas integrados de produção (SSP1 e SSP2), confirmam o potencial de acúmulo de C e N do solo, porém esse tempo ainda não foi suficiente para promover o aumento dos estoques (0-40 cm) até os níveis encontrados em VN. Diante do exposto, é necessário o acompanhamento contínuo para verificar o acúmulo do C e N no médio e longo prazo.

4.1.4.2 Preservação do C nas frações da MOS

Frações granulométricas

Observou-se em todas as áreas avaliadas que o carbono encontra-se ocluído nas frações granulométricas mais estáveis da MOS, que possuem interações com as partículas minerais (silte e argila) do solo (Figura 6). Resultados semelhantes aos encontrados neste estudo foram observados por Guardiola et al. (2017) após sete anos da implantação de sistemas integrados de produção na região Centro-Sul do estado de Roraima. Os valores do C associado à Fsilte+argila na ILP (11,5 g kg⁻¹) e na ILPF (10,3 g kg⁻¹) foram próximos aos observados no presente estudo para SSP1 (10,55 g kg⁻¹) e SSP2 (9,21 g kg⁻¹) na camada 0-10 cm profundidade, indicando a importância das frações silte e argila para agregação do material orgânico no solo.

Estudo realizado por Martins, Coringa e Weber (2009), avaliando sistemas agrossilvipastoris no Norte do Mato Grosso, comprovou que solos com maior teor de silte e argila contribuem para uma proteção física do C no solo, com aumento progressivo ao longo do tempo. Da mesma forma, outros estudos comprovaram aumento dos teores de C associado Fsilte+argila de Latossolos quando adotados sistemas conservacionistas de manejo (Guareschi, Pereira e Perin 2013; Gazolla et al. 2015).

Frações húmicas

O maior conteúdo de carbono associado à FHUM nos diferentes sistemas avaliados (Figura 7) deve-se a pouca mobilidade desta fração no solo e a complexidade estrutural de sua molécula (Silva et al. 2011). Além disso, sistemas mais conservacionistas apresentam solos menos perturbados por práticas agrícolas e tendem a proporcionar condições adequadas para reações complexas de condensação e polimerização, permitindo a formação de SH mais estáveis no solo (Ebeling et al. 2011). Resultados semelhantes aos observados neste estudo, principalmente em relação ao SSP2, também foram encontrados por Gazolla et al. (2015) que, avaliando diferentes sistemas de manejo no Sudoeste de Goiás, verificaram melhores respostas de aumento da FHUM na área manejada com integração lavoura-pecuária com 19 anos de implantação.

Os sistemas integrados apresentaram maiores conteúdos de carbono nas frações mais estáveis da MOS (Figura 8). Resultados semelhantes foram encontrados Valladares et al. (2008) em camadas superficiais de solos sob Floresta Nativa em Cambissolo de textura média, sendo de 2,19 para a relação (FAH/FAF) e inferior a 1,0 para relação (FAF+FAH)/HUM, apontando a influência da cobertura e do tipo de solo para formação do material húmico mais estável no solo. O SSP2 obteve o menor valor (0,20) para relação (FAF+FAH)/HUM em relação aos demais sistemas avaliados. Os baixos índices encontrados nesta pesquisa são indicativos da maior presença da FHUM no solo, resultando em menor degradação e permanência desta no solo (Fontana et al. 2011), o que pode ser atribuído ao maior aporte de resíduos no SSP2 pelo eucalipto *urograndis* através da qualidade da serrapilheira adicionada (Matos et al. 2017). Martins, Coringa e Weber (2009) avaliando sistemas integrados de produção na região Norte do Estado do Mato Grosso encontraram resultados semelhantes aos deste estudo, e os autores destacaram a importância do substrato orgânico para

permanência da MO no solo, pela maior recalcitrância das moléculas orgânicas a degradação microbiana. Fontana et al. (2017), em estudos realizados em Floresta Nativa sob Cambissolo cujas coletas de solo foram amostrados no terço inferior, indicaram maior percentual do C protegido na FHUM, o que correspondeu a 67% do CO do solo.

4.1.4.3 Atividade microbiana do solo

Os resultados deste estudo comprovam que na época úmida (janeiro) houve maior atividade microbiana nos diferentes sistemas avaliados (Tabela 3). De acordo com Oliveira et al. (2016), a sazonalidade climática influencia na umidade e temperatura do solo, o que estimula uma maior degradação do material orgânico pela microbiota do solo, interferindo na ciclagem de nutrientes e imobilização do C no tecido microbiano.

A maior deposição de serrapilheira no sistema com eucalipto urograndis (SSP2) na época seca pode ter influenciado na ativação da microbiota do solo, permitindo assim um maior acúmulo de resíduos orgânicos na camada 0-5 cm do solo. Estudos realizados por Matos et al. (2017) em três fisionomias do Cerrado no Distrito Federal corroboram com esse potencial do eucalipto urograndis em aportar MO para o solo e a sua contribuição para equilíbrio ecológico em ecossistemas cultivados, com maior intensidade na estação seca. Comportamento semelhante foi observado por Stieven et al. (2014) em sistemas integrados de produção com eucalipto urograndis em renques duplos cultivados em Latossolos no estado do Mato Grosso, apresentando maior acúmulo do Cmic na época seca e em superfície.

Os microrganismos do solo no ER conseguiram imobilizar e converter quantidades consideráveis de carbono orgânico em Cmic (Tabela 3), provavelmente por serem adaptados às condições locais e utilizarem com eficiência os recursos limitantes (luz, água e nutrientes) do sistema para crescimento e manutenção da comunidade microbiana (Neto et al. 2014). Já os sistemas integrados de produção (SSP1 e SSP2), apresentaram aumento do Cmic em camadas mais profundas na época chuvosa, posteriormente as operações de manejo das áreas com incorporação dos resíduos e ressemeadura do capim-marandu. Oliveira et al. (2016) em estudo realizado em Brasília também verificaram o aumento do Cmic em subsuperfície, após dois anos da integração lavoura-pecuária (ILP), no período chuvoso.

De forma geral, observou-se a estabilidade da biomassa microbiana do solo na estação úmida (janeiro), evidenciada pelos baixos valores do qCO_2 em relação a julho (Tabela 3). Assim, menos carbono foi perdido por respiração (C-CO₂) e houve maior acúmulo do carbono no tecido microbiano (imobilização). Os menores valores observados para o mês de janeiro sugerem eficiência na utilização do substrato orgânico como fonte de energia para manutenção do metabolismo microbiano e estabilidade do sistema nestas condições, uma vez que altos índices de qCO_2 indicam ineficiência do sistema pela maior perda de C para atmosfera, prejudicando desta forma a diversidade microbiana no solo (Tótola e Chaer 2002; Yan et al. 2009). Assim como observado por Frazão et al. (2010), alguns autores discutem que a elevada RBS em períodos de déficit hídrico é uma resposta a condição de estresse e pouca eficiência na conversão do carbono orgânico em Cmic, pelo maior gasto de C (energia) para manutenção dos microrganismos no solo (Anderson e Domsch 1993; Islam

e Weil [2000](#)). No entanto, a baixa atividade respiratória pode ser indício de baixa atividade específica da microbiota do solo (Almeida et al. [2016](#)).

O qMIC, indicador de qualidade do solo, apontou que diferentes épocas de amostragem (período úmido e seco) interferem, no equilíbrio da população microbiana no solo, principalmente nos sistemas integrados e em camadas mais profundas, no período com menor temperatura e baixa disponibilidade de água no solo (período seco) (Tabela 3). Sendo assim, os valores inferiores a 1%, no mês de julho, indicaram a existência de fatores limitantes à atividade dos microrganismos no solo, sendo que os valores situados no intervalo de 2% a 5% (qMIC), já utilizados como referência em trabalhos sobre MOS foram considerados adequados para o respectivo estudo (Jenkinson; Ladd [1981](#); Jakelaitis et al. [2008](#)).

4.1.4.4 Efluxo CO₂ do solo

O maior efluxo de CO₂ na época úmida foi influenciado pelas condições ideais de temperatura e umidade do mês de janeiro (Figura 9), permitindo intensa degradação dos resíduos orgânicos com liberação de CO₂, além da respiração das raízes e organismos presentes nos diferentes ambientes avaliados, fatores que contribuem para uma maior respiração do solo (Arevelo et al. [2010](#); Valentini et al. [2015](#)). Observou-se que o SSP1 apresentou altos valores de Cmic na camada superficial (0-5cm) na época úmida, fato que pode justificar o alto efluxo de CO₂ neste período de avaliação.

Assim como observado para os valores de Cmic, o efluxo de CO₂ foi superior nas áreas com maior aporte de resíduos ao longo do tempo (VN, SSP1 e SSP2). Porém a baixa umidade do solo em julho diminuiu a atividade microbiana e o efluxo de CO₂ em todos os sistemas avaliados. Resultados semelhantes foram encontrados por Pinto-Junior et al. ([2009](#)) em áreas sob pastagem de *Urochloa* sp. Cultivadas no Estado de Mato Grosso, observando maiores efluxos no período úmido (6,32 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e seu declínio no período seco (2,16 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). De acordo com os autores, a baixa umidade no solo limita a degradação da MOS pelos microrganismos do solo, reduzindo as perdas de C-CO₂ do solo para atmosfera.

4.1.5 Conclusões

Os sistemas integrados de produção promoveram aumento dos estoques de C e N do solo após quatro anos de implantação, porém é necessário o monitoramento de longo prazo para verificar se haverá o acúmulo até alcançar níveis próximos aos encontrados na vegetação nativa.

Observou-se que a maior parte do carbono do solo encontra-se protegido nas frações mais estáveis da MOS (FHUM e F-silte+argila) e em subsuperfície para todos os sistemas avaliados.

Os sistemas integrados de produção contribuíram com aumento do Cmic do solo devido à diversidade do substrato ofertado para o crescimento da população microbiana e atividade do solo, refletindo em aumento da eficiência na ciclagem de nutrientes e manutenção dos estoques de N.

4.1.6 Agradecimentos

Este trabalho contou com o apoio do Programa Nacional de Cooperação Acadêmica da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES / Brasil (Processo nº 88881.068513 / 2014-01); Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - Fapemig (Subsídio número APQ-00953-14, PPM-00133-15) e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (Processo nº 430097 / 2016-6). Agradecemos à Pró-Reitoria de Pesquisa da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) pelo auxílio no idioma. Agradecemos também à Fazenda Barra pelo apoio logístico dado durante este estudo.

4.1.7 Referências

- Almeida, LS, Ferreira, VAS, Fernandes, LA, Frazão, LA, Oliveira, ALG, Sampaio, RA (2016) Indicadores de qualidade do solo em cultivos irrigados de cana-de-açúcar. *Pesq Agropec Bras*, 51:1539-1547. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900053>
- Anderson, TH, Domsch, KH (1993) The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effect of environmental condition, such as pH on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biol Biochem*, 25:393-395. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90140-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90140-7)
- Arevalo, CBM, Bhatti, JS, Chang, SX, Jassal, RS, Sidders, D (2010) Soil respiration in four different land use systems in north central Alberta, Canada. *J Geoph Res: Biog*, 115:1-10. <https://doi.org/10.1029/2009JG001006>
- Carvalho, JLN, Rauti, GS, Cerri, CEP, Berbox, M, Feigl, BJ, Wruck, FJ, Cerri, CC (2010) Impact of pasture, agriculture and crop-livestock systems on soil C stocks in Brazil. *Soil Tillage Res*, 110:175-186. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.07.011>
- Ebeling, AG, Anjos, LHC, Pereira, MG, Pinheiro, EFM, Valladares, GS, (2011) Substâncias húmicas e relação com atributos edáficos. *Bragantia*, 70:157-165. <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052011000100022>
- Embrapa (1997) Manual de métodos de análise de solo. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Rio de Janeiro, pp 212
- Embrapa (2014) Sistema brasileiro de classificação de solos, 4rd ed. Embrapa Solos, Brasília, pp 376
- Fontana, A, Pereira, MG, Bernini, TA, Anjos, LHC, Wadt, PGS, Santos, LL (2017) Compartimentos da matéria orgânica de solos sob floresta no Estado do Acre. *Rev Ambient*, 24:1-8. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.057113>
- Fontana, A, SILVA, CF, Pereira, MG, Loss, A, Brito, RJ, Benites, VM (2011) Avaliação dos compartimentos da matéria orgânica em área de Mata Atlântica. *Acta Sci Agron*, 33:545-550. <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v33i3.5169>
- Frazão, LA, Piccolo, MC, Feigl, BJ, Cerri, CC, Cerri, CEP (2010) Inorganic nitrogen, microbial biomass and microbial activity of a sandy Brazilian Cerrado soil under different land uses. *Agri, Ecos & Environ*, 135: 161-167. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.09.003>
- Gazolla, PR, Fernandes Guareschi, R, Perin, A, Pereira, MG, Rossi, CQ (2015) Frações da matéria orgânica do solo sob pastagem, sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária. *Semina: Ciências Agrárias*, 36: 693-704. <https://bit.ly/2IIXiKy>
- Guardiola, MDE, Vale Júnior, JF, Silva, EE, Rossi, CQ, Pereira, MG (2017) Chemical and physical fractions of soil organic matter under various management regimes in Roraima, Brazil. *Semina: Cienc Agrar*, 38:2419-2432. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2017v38n4Supl1p2419>
- 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. *Seminário: Ciências Agrárias* 34:693-793. <https://bit.ly/2koNlaJ>
- Islam, KR, Weil, RR (2000) Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. *Agri, Ecos & Environ* 79:9-16. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00145-0](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00145-0)
- Jakelaitis, A, Silva, AA, Santos, JB, Vivian, R (2008) Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. *Pesq Agropec Trop*, 38:118- 127. <https://doi.org.ez27.periodicos.capes.gov.br/10.5216/pat.v38i2.4171>

- Jenkinson, DS, Ladd, JN (1981) Microbial biomass in soil: measurement and turnover. In: Paul, EA, Ladd, JN (eds) *Soil Biochem.* MerceL Dekker, New York, pp 415-471
- Jenkinson, DS, Powlson, DS (1976) The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. *Soil Biol. Biochem* 8:167-177. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(76\)90005-5](https://doi.org/10.1016/0038-0717(76)90005-5)
- Martins, EL, Coringa, JES, Weber, OLS (2009) Carbono orgânico nas frações granulométricas e substâncias húmicas de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico – LVAd sob diferentes agrossistemas. *Acta Amazon*, 39:655-660. <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672009000300021>
- Matos, NM, Ribeiro, FP, Gatto, A, Bussinguer, AP (2017) Estoque de Serapilheira em Três Fisionomias no Cerrado do Distrito Federal. *Floresta Ambient*, 24:1-9. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.126215>
- Neto, SEA, Silva, AN, Kusdra, JF, Kolln, FT, Andrade Neto, RC (2014) Atividade biológica de solo sob cultivo múltiplo de maracujá, abacaxi, milho, mandioca e plantas de cobertura. *Rev Cienc Agron*, 45: 650-658. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=195331351003>
- Oliveira, WRD, Ramos, MLG, Carvalho, AM, Coser, TR, Silva, AMM, Lacerda, MM, Souza, KW, Marchão, RL, Vilela, L, Pulrolnik, K (2016) Dynamics of soil microbiological attributes under integrated production systems, continuous pasture, and native cerrado. *Pesq Agropec Bras*, 51: 1501-1510. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900049>
- Pegoraro, RF, Silva, IR, Novais, RF, Barros, NF, Fonseca, S (2011) Fenóis derivados da lignina, carboidratos e aminoaçúcares em serapilheira e solos cultivados com eucalipto e pastagem. *Rev Arv*, 35:359-370. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622011000200020>
- Pinto-Junior, OB, Sanches, L, Dalmolin, AC, Nogueira, JS (2009) Efluxo de CO₂ do solo em floresta de transição Amazônia Cerrado e em área de pastagem. *Acta Amazon*, 39:813-821. <https://doi-org.ez27.periodicos.capes.gov.br/10.1590/S0044-59672009000400009>
- Rosa, R, Sano, EE, Rosendo, JS (2014) Estoque de carbono em solos sob pastagens cultivadas na bacia hidrográfica do rio Paranaíba. *Soc & Nat*, 26:333-351. <http://dx.doi.org/10.1590/1982-451320140210>
- Rossetti, KV, Centurion, JF (2015) Estoque de carbono e atributos físicos de um Latossolo em cronosequência sob diferentes manejos. *Rev Bras Eng Agric Ambiental*, 19:252-258. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n3>
- Sacramento, JAAS, Araújo, ACM, Escobar, MEO, Xavier, FAS, Cavalcante, ACR, Oliveira, TS (2013) Soil carbon and nitrogen stocks in traditional agricultural and agroforestry systems in the semiarid region of Brazil. *Rev Bras Cienc Solo*, 37:784-795. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000300025>
- Silva, EE, Azevedo, PHS, De-Polli, H (2007) Determinação do carbono da biomassa microbiana do solo (BMS-C). *Embrapa Agrobiologia* <https://bit.ly/2LCNfsq>
- Silva, EE, Azevedo, PHS, De-Polli, H (2007) Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO₂). *Embrapa Agrobiologia* <https://bit.ly/2sil4VF>
- Silva, EF, Lourente, EPR, Marchetti, ME, Mercante, FM, Ferreira, AKT, Fujii, GC (2011) Frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica em solos sob integração lavoura-pecuária. *Pesq. agropec. bras.*, 46: 1321-1331. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000028>
- Silva, IRS, Mendonça, ES (2007) Matéria orgânica do solo. In: Novais, RF, Alvarez VV H, Barros, NF, Fontes, RLF, Cantarutti, RB, Neves, JCL (ed). *Fertilidade do solo.* Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, pp 275-374

- Souza, E D, Costa, SEVGA, Anghinoni, I, Carvalho, PCDF, Andrigueti, M, Cao, E (2009) Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. *Rev Bras Cienc Solo*, 33:1829-1836. <https://bit.ly/2KkFndJ>
- Stieven, AC, Oliveira, DA, Santos, JO, Wruck, FJ, Campos, DTS (2014) Impacts of integrated crop-livestock-forest on microbiological indicators of soil. *Rev Bras Cienc Agrar*, 9:53-58. <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v9i1a3525>
- Tótola, MR, Chaer, GM (2002) Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. In: Alvarez VVH, Schaefer, CEGR, Barros, NF, Mello, JWV, Costa, LM (ed) *Tópicos em ciência do solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, pp196-276
- Valentini, CMA, Martínez, MM, Paulo, SR (2015) Estimativa de efluxo de CO₂ do solo, de um florestão de transição no noroeste do estado de Mato Grosso, utilizando regressão múltipla. *Cerne*, 14:9-16. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=74414102>
- Valladares, GS, Gomes, EG, Mello, JCCBS, Pereira, MG, Anjos, LHC, Ebeling, AG, Benites, VM (2008) Análise dos componentes principais e métodos multicritério ordinais no estudo de organossolos e solos afins. *Rev Bras Cienc Solo*, 32:285-296. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-6832008000100027>
- Wendling, B, Jucksch, I, Mendonça, ES, Vinhal-Freitas, IC (2011). Mudanças no carbono e nitrogênio em diferentes compartimentos da matéria orgânica sob sistema agrossilvipastoril. *Cienc Florestal*, 21:641-653. <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/4509>
- Yan, J, Zhang, D, Zhou, G, Liu, J (2009) Soil respiration associated with forest succession in subtropical forests in Dinghushan Biosphere Reserve. *Soil Biol Biochem*, 41:991-999. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.12.018>
- Swift, RS (1996) Method for extraction of IHSS soil fulvic and humic acids. In: Sparks, DL, Page, AL, Helmke, PA, Loeppert, RH, Soltanpour, PN, Tabatabai, MA, Johnston, CT, Summer, ME (eds). *Chemical methods*. Madison, Wisconsin, pp1018-1020
- Yeomans, JC, Bremner, JM (1988). A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Commun. Soil Sci. Plant. Anal.*, 19:1467-1476. <https://doi.org/10.1080/00103628809368027>

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização desta pesquisa contribuiu para informar sobre os benefícios da implantação dos sistemas integrados de produção em áreas provenientes de pastagens degradadas. As informações geradas sobre dinâmica de carbono do solo podem auxiliar nos cálculos de sequestro de carbono e diagnósticos de viabilidade para uma agricultura de baixo carbono.

Estudos complementares poderão ser realizados para responder questões sobre a atuação microbiota do solo (possíveis associações micorrízicas), dinâmica da matéria orgânica do solo no médio prazo, e modelagem matemática para predição dos acúmulos de carbono e nitrogênio no longo prazo.