



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE BIOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

JORGE CÁ

ESTOQUES DE C E N EM SISTEMAS SILVIPASTORIS DE ALTA E BAIXA
DIVERSIDADE ARBÓREA: EVIDÊNCIAS DE UM EXPERIMENTO DE CAMPO DE
VINTE E DOIS ANOS

FORTALEZA

2021

JORGE CÁ

ESTOQUES DE C E N EM SISTEMAS SILVIPASTORIS DE ALTA E BAIXA
DIVERSIDADE ARBÓREA: EVIDÊNCIAS DE UM EXPERIMENTO DE CAMPO DE
VINTE E DOIS ANOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ecologia e Recursos Naturais. Área de concentração: Ecologia e Recursos Naturais; Linha de Pesquisa: Conservação e Manejo de Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. Teogenes Senna de Oliveira.

Coorientador: Pesq. Dr. Carlos Renato Tavares Castro.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C11e Cá, Jorge.
Estoques de C e N em sistemas silvipastoris de alta e baixa diversidade arbórea : evidências de um experimento de campo de vinte e dois anos / Jorge Cá. – 2021.
48 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Teogenes Senna de Oliveira .
Coorientação: Pesq. Dr. Carlos Renato Tavares de Castro .
1. Integração pecuária-silvicultura. 2. Matéria orgânica lábil no solo. 3. Leguminosas. 4. estabilidade do C e N. 5. $\delta^{13}C$. I. Título.

CDD 577

JORGE CÁ

ESTOQUES DE C E N EM SISTEMAS SILVIPASTORIS DE ALTA E BAIXA
DIVERSIDADE ARBÓREA: EVIDÊNCIAS DE UM EXPERIMENTO DE CAMPO DE
VINTE E DOIS ANOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ecologia e Recursos Naturais. Área de concentração: Conservação e Manejo de Recursos Naturais.

Aprovada em: 09/07/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Teogenes Senna de Oliveira (Orientador)
Universidade Federal de Viçosa (UFV)

Pesq. Dr. Carlos Renato Tavares de Castro (Coorientador)
Embrapa Gado de Leite (EMBRAPA)

Profª. Dra. Emanuelle Mercês Barros Soares
Universidade Federal de Viçosa (UFV)

Pesq. Dr. José Ferreira Lustosa Filho
Universidade Federal de Viçosa (UFV)

A Deus.

Aos meus pais Ivone, Abapinte. Aos meus irmãos Mário Cá, Ramiro Lima Té (N, bai), Augustinho Cá (Matchú). Aos meus pais adotivos Michaela e Plauto Junior e a minha esposa Rebeca.

AGRADECIMENTOS

Gostaria primeiramente de agradecer a Deus pela salvação e pelo favor não merecido que me proporcionou chegar até aqui e a Santa Rita de Cássia pela minha saúde, e especialmente pela sua colaboração comigo durante momento difícil na vida.

Aos meus pais biológicos, Abapinte e Ivone (Mú) e a minha madrinha Ellen Jessica Castro que, com toda humildade e naturalidade, ensinaram-me a ser uma pessoa humilde, a respeitar às pessoas e buscar meus sonhos de forma honrada e feliz. Gostaria de poder retribuir todo esse ensinamento que por mim foi obtido.

À minha companheira, grande amiga e esposa, Rebeca, pela paciência imensurável e ao mesmo tempo compreensão nas inúmeras vezes que agi sob estresse, pela força, apoio moral e a confiança que sempre vêm me dando para não desistir de meu sonho.

Aos meus queridos irmãos Jorge Ximenes (Timor-Leste), Mario Cá, José Popú Cá, Augustinho Cá (Matchú), Albate Abipinte Té, Tonito da Silva, Paulo Fernandes Miguel, Januário Almeida (primo) e meus amigos em Redenção-CE, Eric Renan Tabosa, Elieuda Castro, Letícia Kenia Bessa Oliveira, Rafael Santiago da Costa, mãe Regina Uchôa Gomes e seu marido Paulo Silva Gomes, ao casal Michaela Brirgit Kauderer Demétrio e Plauto Junior Demétrio que sempre me apoiaram e me ajudaram em toda a minha vida da formação.

A todos os meus caros colegas e amigos do Programa de Pós-graduação em Ecologia e Recurso Naturais, em particular da minha turma, 2019.2, pelo respeito e amizade cultivados ao longo desses anos. Em especial, ao meu grande amigo irmão Carlos Eduardo Carvalho (Kdu), meu concidadão Luís Campili, Maria Conceição Sousa, Felipe Alecrim Dourado Moitinho, Luana Mateus de Sousa, Antonio Elves Barreto da Silva, Luanderson da Silva Alencar, Sergio Heleno Barbosa, Aline Vasconcelos Cavalcante, Nathália Araújo Magalhães, Andrieli Lima da Silva, Milena Gonçalves da Silva, Karoline Alves Ramos e Magno Gonçalves, por me proporcionarem oportunidades de trocar ideias com vocês.

Aos meus amigos e colegas do Laboratório da Matéria Orgânica e Resíduos- UFV, Neilson Rocha, pela generosidade de compartilhar comigo seus conhecimentos, dando todos seus apoios incondicionais nas coletas no campo e nos momentos difíceis, obrigado pela amizade e o almoço oferecido com os pratos da paraense. Obrigado pela convivência. Ao Marllon Castro e Anaclaudia Alves Primo, pelo apoio nas inúmeras dúvidas sobre análises. Obrigado pela nova amizade. Também deixo meu agradecimento e carinho ao Stallone Soares (Mulher), Elias Frederico Lopes Mam, Claudino Cofite, Inácio Barbosa, Rugna Mbaná,

Leopold Sedar Domingos Mane (Estamos) por estarem sempre disponíveis para ajudar na execução desse trabalho; Vanessa Schiavon Lopes, Jônatas Pedro, Elisa Ramos e a Rosemary Firmino dos Santos, minhas conterrâneas de longa data, Jackeline de Oliveira, Hugo Filipe da Silva, Raiane dos Santos e Marcel Thomas, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

Ao Instituto de Desenvolvimento Rural-IDR da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira-UNILAB, na pessoa da professora Maria Ivanilda de Aguiar, Fred Denilson Barbosa da Silva e Daniela Queiroz Zuliani, aos quais devo muito respeito e gratidão. Agradeço a todos pela oportunidade de ter sido guiado na graduação, transmitindo os seus conhecimentos e de ter trabalhado como bolsista no projeto de sistemas agroflorestais piloto “Desenvolvimento participativo de sistema agroflorestal: alternativa para produção sustentável da agricultura familiar”.

Ao casal José Cláudio Santana e Rita de Cassia Pereira Santana, bem como Terezinha de Jesus Pereira da Conceição, Tia Neusa Maria Rodrigues, Maria de Lourdes Silva Costa, Roydivickson Ywnas Siga, Jaqueline Beatriz Silva Costa, Lainesse B. Samussone e Clementino M. Inácio pela amizade e por abrirem as portas de sua casa em Viçosa-MG, nos acolhendo e proporcionados momentos de descanso e confraternização. A vocês, meu respeito, carinho e agradecimento.

À Universidade Federal do Ceará (UFC), pela oportunidade de realização de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais-PPGERN. Aos professores de PPGERN e servidores técnicos vinculados ao PPGERN e Departamento de Ciências do Solo que de alguma forma contribuíram na minha formação, sobretudo à Coordenadora do PPGERN, Professora Francisca Soares de Araújo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FUNCAP, por meio da concessão de bolsas de estudo e auxílio financeiro para o desenvolvimento das atividades de dissertação.

Ao Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa-UFV, tendo como apoio principal o Laboratório de Matéria Orgânica e Resíduos, além dos demais laboratórios do Departamento como o Laboratório de Isótopos Estáveis e Física. Agradeço ao Técnico Dr João Milagres e ao Prof. Rafael Teixeira pelos inúmeros apoios nos materiais consultados sobre análises e planilhas repassadas, meu respeito, meu carinho e admiração por vocês.

A todos os funcionários da Embrapa Gado de Leite em Coronel Pacheco-MG, que nunca hesitaram em me ajudar quando necessário na condução das coletas de experimento. Deixo meu respeito e agradecimentos, na pessoa de responsável da logística Diogo Guedes Baldi e todos do corpo técnicos, Clebio Avelar Fonseca, Leonardo de Oliveira Reis, Evandro Liguori de Oliveira e Reginaldo Neves Santos, pela ajuda nas coletas de campo.

Meus agradecimentos a minha amiga Daiane Lopes Leis pela carona valiosa, sobretudo na hora de se deslocar para Coronel Pacheco. Obrigado pelo carinho e respeito. A minha querida Amaná Obolari pelo apoio na coleta e Taciana Diavão pela convivência.

Ao professor Dr. Teogenes Senna de Oliveira, pela orientação, apoio financeiro-acadêmica e fundamentação teórica sobre matéria orgânica do solo e conselhos nas nossas habituais reuniões. Obrigado pelo carinho e paciência por aceitar o desafio de me orientar em um momento de enormes dificuldades, pela amizade e conhecimento partilhados. Obrigado pela oportunidade, pelos inúmeros ensinamentos, tanto na vida acadêmica quanto no pessoal.

Ao meu querido coorientador Pesquisador da Embrapa Gado de Leite, Dr. Carlos Renato Tavares de Castro, por ter me orientado e dado suporte para as coletas de dados e acompanhamento no campo. Agradeço por todas as partilhas de informações e pelo legado dos experimentos de longa duração que tornaram possível a execução desse trabalho, sob uma perspectiva de manejo de conservação dos recursos naturais com destaque à matéria orgânica, meu respeito, carinho e agradecimento, e por todas as contribuições ao meu crescimento pessoal e da vida profissional. Obrigado naturalmente pela calorosa recepção e pela amizade e apoio nos momentos tão complexos da minha estadia ali.

Aos professores participantes da banca examinadora Emanuelle Mercês Barros Soares e Carlos Renato Tavares pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

À Técnica do Laboratório de Matéria Orgânica e Resíduos-UFV, Paloma Fernandes de Oliveira, agradeço imensamente por todo apoio na execução de análises dentro do laboratório e pela sua carinhosa contribuição neste trabalho.

Ao Dr. José Ferreira Lustosa Filho, pela sua modesta contribuição na minha formação, na organização dos dados, pelo apoio e paciência na troca de milhares de e-mails. Me inspirei muito na sua qualidade acadêmica e pessoal, ajudando nos momentos difíceis com bons conselhos. Meu muito obrigado Dr. José Ferreira Lustosa Filho, por ter aceitado participar na construção da minha dissertação.

Ao Professor Dr. Hugo Víctor Alvarez V. e Júlio César Lima Neves, pela valiosa orientação na análise estatística e sugestões que contribuíram de forma plena para melhorar qualidade do trabalho.

Aos estagiários da Embrapa de Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia-IFRO-Campus Colorado do Oeste, Letícia Vieira Rossi, Ricardo José Ortiz, Ronaldo Júlio da Silva Rufino e Kleber José Bayer Bazzi pelo auxílio prestado nas coletas de dados de campo e troca de conhecimentos.

A todos que passaram por minha vida durante este mestrado e que de alguma forma contribuíram direta ou indiretamente comigo.

Muito obrigado a todos!!

Ninguém nasce odiando outra pessoa pela cor da sua pele, por sua origem ou ainda por sua religião. Para odiar, as pessoas precisam aprender, e se podem aprender a odiar, elas podem ser ensinadas a amar. (Nelson Mandela).

RESUMO

Os sistemas agropecuários integrados são uma das principais estratégias para reduzir ou compensar as emissões de carbono (C) da agricultura brasileira, com melhoria simultânea na eficiência da produção. Entre outros, os sistemas silvipastoris têm sido promovidos como modelos sustentáveis que combinam pecuária e silvicultura na mesma área. O objetivo deste trabalho foi avaliar os estoques de C e N e a abundância natural de ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$) nas frações da matéria orgânica do solo, assim como C lábil do solo, em experimento de longa duração (1997-2019) com sistemas silvipastoris com faixas de baixa e alta diversidade arbórea no bioma Mata Atlântica. Amostras deformadas e indeformadas de solo foram coletadas em transectos perpendiculares às faixas de árvores a cada cinco metros (0, 5, 10 e 15 m de distância), nas profundidades: 0.0-0.10, 0.10-0.30, 0.30-0.60, 0.60-1.0 m. Avaliaram-se a serapilheira, densidade de raízes, teores de C orgânico e N total, os valores de $\delta^{13}\text{C}$ das frações da matéria orgânica particulada (POM) e associada aos minerais (MAOM) e o C lábil do solo, sendo posteriormente calculados os estoques. A produção de serapilheira foi substancialmente maior no sistema de alta diversidade em todas as distâncias, exceto a 5 m da faixa de árvores. Contrariamente à serapilheira, maior densidade de raízes foram observadas nas maiores distâncias das árvores (10 e 15 m). O sistema silvipastoril de alta diversidade arbórea aumentou os estoques de TOC na camada superficial (0.0-0.10 m, distâncias 0 e 10 m) e de C-MAOM na superfície (0.0-0.10 m, distância 10 m) e na subsuperfície (0.10-0.30 m, distância 0 m). Além disso, os estoques de N total ou associado a MAOM e POM na camada de 0.0-1.0 m foram superiores no sistema de alta diversidade arbórea. Os aumentos foram de 37, 36 e 63%, respectivamente para N total, N-MAOM e N-POM. Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ menos negativos, ou seja, a contribuição da gramínea (C4) para a matéria orgânica do solo, na camada superficial do solo (0.0-0.30 m) e na profundidade 0.0-1.0 m na distância 15 m no sistema de alta diversidade, em ambas as frações (MAOM e POM), evidencia o papel do capim-braquiária na incorporação de TOC. No geral, o sistema silvipastoril de alta diversidade arbórea mostrou potencial para armazenar C nas camadas superiores do solo e N do solo até 1 m de profundidade. O sistema silvipastoril composto por capim-braquiária consorciado com espécies arbóreas leguminosas pode ser considerada uma estratégia viável para aumentar os estoques de C e N do solo.

Palavras-chave: integração pecuária-silvicultura; matéria orgânica lábil no solo; leguminosas; estabilidade do C e N; $\delta^{13}\text{C}$.

ABSTRACT

Integrated farming systems are one of the main strategies to reduce or compensate carbon emissions (C) of Brazilian agriculture, with simultaneous improvement in production efficiency. Among others, forestry systems have been promoted as sustainable models that combine livestock and forestry in the same area. The objective of this study was to evaluate the stocks of C and N and the natural abundance of ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$) in the organic matter fractions of the soil, as well as the labile C of the soil, in long-term experiment (1997-2019) with silvipastoral systems with low and high tree diversity in the Atlantic Forest biome. Deformed and undeveloped soil samples were collected in transects perpendicular to the tree ranges every five meters (0, 5, 10 and 15 m away), at depths: 0.0-0.10, 0.10-0.30, 0.30-0.60, 0.60-1.0 m. We evaluated the burlap, root density, organic C contents and total N, the $\delta^{13}\text{C}$ values of the fractions of particulate organic matter (POM) and associated minerals (MAOM) and the labile C of the soil, and later we calculated the stocks. The production of burlap was substantially higher in the high diversity system at all distances, except 5 m from the tree range. Contrary to the burlap, higher density of roots were observed in the largest distances of the trees (10 and 15 m). The high diversity arboreal forestry system increased the stocks of OCD in the surface layer (0.0-0.10 m, distances 0 and 10 m) and of C-MAOM in the surface (0.0-0.10 m, distance 10 m) and in the subsurface (0.10-0.30 m, distance 0 m). In addition, the total or associated N stocks of MAOM and POM in the 0.0-1.0 m layer were higher in the high diversity tree system. The increases were 37, 36 and 63%, respectively for total N, N-MAOM and N-POM. The less negative $\delta^{13}\text{C}$ values, that is, the contribution of the graminea (C4) to the soil organic matter, in the soil surface layer (0.0-0.30 m) and in the depth 0.0-1.0 m in the distance 15 m in the high diversity system, in both fractions (MAOM and POM), highlights the role of grass-brachiaria in the incorporation of OCD. Overall, the high diversity arboreal forestry system has shown potential to store C in the upper layers of the soil and N of the soil up to 1 m deep. The silvipastoral system composed of grass-brachiaria consorting with leguminous tree species can be considered a viable strategy to increase the C and N stocks of the soil.

Keywords: livestock-forestry integration; arable organic matter; legumes; stability of C and N; $\delta^{13}\text{C}$

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Representação esquemática da área de estudo e da coleta de amostras em experimento de longa duração com sistemas silvipastoris de baixa e alta diversidade, Coronel Pacheco – MG, Brasil durante ano 2020..... 22
- Figura 2 – Produção de serapilheira (A) e densidade de raízes na profundidade de 0.0-0.10 m (B) em sistemas silvipastoris de baixa e alta diversidade. Letras maiúsculas comparam sistemas silvipastoris em cada distância e as minúsculas comparam as distâncias em cada sistema silvipastoril. Quando as letras são iguais, as médias são semelhantes estatisticamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade..... 27
- Figura 3 – Estoques médios de C da matéria orgânica associada a minerais (C-MAOM) (A), da matéria orgânica particulada (C-POM) (B) e orgânico total (TOC) (C) em sistemas silvipastoris de baixa e alta diversidade nas profundidades de 0.0-0.10, 0.10-0.30, 0.30-0.60, 0.60-1.0 e 0.0-1.0 m. Letras maiúsculas comparam sistemas silvipastoris em cada profundidade e as minúsculas comparam as distâncias em cada sistema silvipastoril, também em cada profundidade. Quando as letras são iguais, as médias são semelhantes estatisticamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade..... 28
- Figura 4 – Estoques médios de N da matéria orgânica associado aos minerais - N-MAOM (A), da matéria orgânica particulada - N-POM (B) e total – NT (C) em sistemas silvipastoris de baixa e alta diversidade nas profundidades de 0.0-0.10, 0.10-0.30, 0.30-0.60, 0.60-1.0 e 0.0-1.0 m. Letras maiúsculas comparam sistemas silvipastoris em cada profundidade e as minúsculas comparam as distâncias em cada sistema silvipastoril, também em cada profundidade. Quando as letras são iguais, as médias são semelhantes estatisticamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade..... 30
- Figura 5 – Estoques médios de C lábil (A) e não lábil (B) em sistemas silvipastoris de baixa e alta diversidade nas profundidades de 0.0-0.10, 0.10-0.30, 0.30-0.60, 0.60-1.0 e 0.0-1.0 m. Letras maiúsculas comparam sistemas silvipastoris em cada profundidade e as

minúsculas comparam as distâncias em cada sistema silvipastoril, também em cada profundidade. Quando as letras são iguais, as médias são semelhantes estatisticamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade..... 33

Figura 6 –

Relações C/N médias na matéria orgânica associada aos minerais (MAOM C/N ratio) (A), particulada (POM C/N ratio) (B) e total (Total C/N) (C) em sistemas silvipastoris de baixa e alta diversidade nas profundidades de 0.0-0.10, 0.10-0.30, 0.30-0.60, 0.60-1.0 e 0.0-1.0 m. Letras maiúsculas comparam sistemas silvipastoris em cada profundidade e as minúsculas comparam as distâncias em cada sistema silvipastoril, também em cada profundidade. Quando as letras são iguais, as médias são semelhantes estatisticamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade..... 33

Figura 7 –

Estoques e contribuições de C oriundos de rotas fotossintéticas C3 e C4 na matéria orgânica associada a minerais (C-MAOM) (A e C) e da matéria orgânica particulada (C-POM) (B e C) em sistemas silvipastoris de baixa e alta diversidade nas profundidades de 0.0-0.10, 0.10-0.30, 0.30-0.60, 0.60-1.0 e 0.0-1.0 m..... 36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades químicas e físicas de Latossolo Vermelho-Amarelo sob sistemas silvipastoris de baixa e alta diversidade arbórea, Coronel Pacheco – MG, Brasil.....	20
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FUNCAP	Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
SAF	Sistema Agroflorestal
SIBI	Sistema Integrado de Bibliotecas
SPD	Sistema de plantio direto
SSPA	Sistema Silvopastoril
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFV	Universidade Federal de Viçosa

LISTA DE SÍMBOLOS

COT	Carbono Orgânico Total
CO	Carbono Orgânico
δ	Delta
MO	Matéria Orgânica
MOS	Matéria Orgânica do Solo
N	Nitrogênio
C	Carbono
CBM	Carbono da Biomassa Microbiana
^{13}C	Isotópicas estável do carbono
^{15}N	Isotópicas estável do nitrogênio
CO ₂	Dióxido de carbono
cm	Centímetro
Mg	Megagrama
M	Metro
‰	Partes por mil
N ₂ O	Ácido nitroso

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	MATERIAL E MÉTODOS	20
2.1	Áreas de estudo	20
2.2	Amostragem de solo, serapilheira e raiz	22
2.3	Fracionamento da matéria orgânica do solo (MOS) e C lábil	24
2.4	Estoques de C da POM, MAOM, total e lábil e N total no solo	24
2.5	Análise isotópica	25
2.6	Análises estatísticas	26
3	RESULTADOS	27
3.1	Produção de serapilheira e densidade de raízes	27
3.2	Estoques de C e N	28
3.3	Relação carbono/nitrogênio	34
3.4	Contribuição para matéria orgânica do solo pelos sistemas silvipastoris	36
4	DISCUSSÃO	38
4.1	Produção de serapilheira e densidade de raízes	38
4.2	Estoques de carbono e nitrogênio	39
4.3	Relação carbono/nitrogênio	42
4.4	Contribuição para matéria orgânica do solo pelos sistemas silvipastoris	43
5	CONCLUSÕES	44
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

O aumento da população humana global no último século promoveu a exploração intensiva dos recursos naturais. No Brasil, o desmatamento e a conversão para agricultura em biomas distintos levaram o país a estar entre os 10 maiores emissores de dióxido de carbono (CO₂) do mundo (SANDERMAN *et al.*, 2017). A Mata Atlântica, um dos ecossistemas da floresta tropical do Brasil e o quarto hotspot de biodiversidade no mundo (MYERS *et al.*, 2000), é um bioma comprometido pelo desmatamento, restando apenas 28% de sua cobertura original (REZENDE *et al.*, 2018). Grande parte da área desmatada neste bioma foi convertida em pastagens.

A pecuária desempenha papel significativo para a economia, respondendo por cerca de 32% do Produto Interno Bruto (PIB) do agronegócio brasileiro em 2019. O Brasil é o segundo maior exportador de carne bovina do mundo, com o maior rebanho comercial, estimado em cerca de 222 milhões de cabeças (ABIEC, 2019). No entanto, as pastagens degradadas são um grande problema para a pecuária brasileira, uma vez que a produção ocorre principalmente em sistemas exclusivamente pastoris, sendo que apenas 12,6% do rebanho é confinada (ABIEC, 2019).

A Zona da Mata mineira, parte do bioma Mata Atlântica, possui em torno 2,07 milhões de hectares de pastagens, dos quais 42,5% encontram-se degradados, 28,8% moderadamente degradados, 23,1% levemente degradados, enquanto as pastagens não degradadas representam apenas 5,6% da área total (INAES, 2015). Dada a área de pastagens no Brasil, reduções nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) ou aumento no sequestro de carbono (C) nesse agroecossistema teriam impactos significativos no balanço de C.

Citados como modelos da agricultura de baixo C, os sistemas integrados de produção têm sido um dos precursores das ações em prol da conservação e melhoria da qualidade dos solos brasileiros, podendo combinar pecuária, silvicultura e lavoura em uma mesma área, praticadas em rotação, sucessão ou consórcio (ALMEIDA *et al.*, 2021). Dentre os sistemas integrados, o silvipastoril (SSP) é uma opção ecologicamente sustentável para a criação de gado, além de permitir ao produtor rural aumentar seus rendimentos, seja pelo controle da vegetação do sub-bosque (planta invasoras), eliminando assim a necessidade de roçadas, seja pela venda de madeira ou de animais e seus subprodutos (ALMEIDA *et al.*, 2021). Ademais, os SSPs promovem maior aproveitamento da mão-de-obra e aumentam a oferta de

empregos, além dos benefícios ambientais de melhorar a conservação dos solos e aumentar a biodiversidade local (LANDHOLM *et al.*, 2019).

Os sistemas silvipastoris (SSPs) possibilitam, também, o uso eficiente dos recursos naturais, a redução de insumos externos e dos custos em recomposição florestal, a maior qualidade dos alimentos, a adequação a diversos grupos socioeconômicos e a maior ciclagem de nutrientes e fixação de C, resultando num sistema produtivo e sustentável (LANDHOLM *et al.*, 2019; LIRA JUNIOR *et al.*, 2020; VARSHA *et al.*, 2019). Neste sentido, diante das potencialidades, os SSPs foram incluídos no plano para a consolidação para uma economia de baixa emissão de C na agricultura (o Plano ABC) da Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC (Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009) com o objetivo de incrementar ações que proporcionem adaptações às mudanças climáticas (BRASIL, 2009; MANZATTO *et al.*, 2020).

Alguns estudos sugerem que a adoção dos SSPs além de aumentar o armazenamento de C e N nas camadas superficiais do solo, também cria reservatórios estáveis desses elementos em camadas mais profundas do solo, contribuindo com a conservação dos recursos naturais e da água. Por exemplo, Lira Junior *et al.* (2020) ao avaliarem os estoques de C e N em SSPs com gliricídia (*Gliricidia sepium*) e sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia*) consorciados em pastagens de capim-braquiária (*Uroclhoa decumbens*), verificaram que, após quatro anos, os estoques de C do solo aumentaram nas camadas superiores em ambos os SSPs quando comparado às pastagens exclusivas de capim-braquiária, enquanto os estoques de N aumentaram em todas as profundidades (até 1 m). No entanto, os autores citados, destacaram o potencial para armazenamento crescente de C nesse SSP ao longo do tempo.

É de grande importância conhecer os estoques de C e N no solo em SSPs e o papel potencial que árvores representam na captura de CO₂ visando reduzir os impactos ambientais da pecuária, especialmente como estratégia de recuperação de pastagens degradadas. Neste sentido, existem poucos estudos que associam a influência da diversidade do componente arbóreo sobre os estoques de C e N. Assim, pressupõe-se, como hipótese para este trabalho, que o SSPs com maior diversidade arbórea proporcione maiores estoques de C e N em frações da MOS, tanto em profundidade quanto em proximidade das faixas de árvores. Neste contexto, objetivou-se, com o presente estudo, avaliar os estoques de C e N e os valores de $\delta^{13}\text{C}$ das frações da matéria orgânica particulada (POM) e associada a minerais (MAOM), assim como C lábil em experimento de longa duração (1997-2019) com sistema silvipastoris implantados com faixas de baixa e alta diversidade arbórea.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Áreas de estudo

O presente estudo foi conduzido no Campo Experimental José Henrique Bruschi, pertencente à Embrapa Gado de Leite, em Coronel Pacheco, Minas Gerais-MG (21° 33'22''S e 43° 06'15''O, altitude de 410 m). Na área em estudo, de 16 ha, predomina o relevo ondulado e a classe de Latossolo Vermelho-Amarelo (Embrapa, 2018), cujas propriedades químicas e físicas são descritas na Tabela 1. O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Cwa (mesotérmico), com precipitação média anual ao redor de 1500 mm, distribuídos irregularmente, e somente 13% desse total ocorre durante os meses de maio a setembro, considerado como o período da seca (MOURA *et al.*, 2021; PACIULLO *et al.*, 2021). A temperatura média do ar é de 17° C, de abril a setembro, e de 24° C, de outubro a março (BRETAS *et al.*, 2020).

Tabela 1 – Propriedades químicas e físicas de Latossolo Vermelho-Amarelo sob sistemas silvipastoris de baixa e alta diversidade arbórea, Coronel Pacheco – MG, Brasil

Atributos	Valores
pH H ₂ O ^a	4,7
Available P (mg dm ⁻³) ^b	3,4
Available K (mg dm ⁻³) ^b	52
Available S (mg dm ⁻³) ^c	0,22
Exchangeable Ca ⁺² (cmol _c dm ⁻³) ^d	0,68
Exchangeable Mg ⁺² (cmol _c dm ⁻³) ^d	0,35
Exchangeable Al ⁺³ (cmol _c dm ⁻³) ^d	0,9
H ⁺ +Al ⁺³ (cmol _c dm ⁻³) ^e	6,93
Sum of bases (cmol _c dm ⁻³) ^f	1,16
Effective CEC (cmol _c dm ⁻³) ^g	2,06
CEC _{pH7} (cmol _c dm ⁻³) ^h	8,09
Base saturation (%) ⁱ	14,3
Al saturation (%) ^j	43,7
Available Cu (mg dm ⁻³) ^b	1,8
Available Mn (mg dm ⁻³) ^b	17,8
Available Fe (mg dm ⁻³) ^b	112,7
Available Zn (mg dm ⁻³) ^b	1,2
P remaining (mg L ⁻¹) ^k	16,7
Soil organic carbon (g kg ⁻¹) ^l	11,3
Total nitrogen (g kg ⁻¹) ^m	1,6
Clay (g kg ⁻¹) ⁿ	570
Silt (g kg ⁻¹) ⁿ	110
Sand (g kg ⁻¹) ⁿ	320
Soil bulk density (g cm ⁻³) ^o	0,95
Particle density (g cm ⁻³) ^p	2,65
Total porosity (cm ³ cm ⁻³) ^q	12,6

Soil chemical analysis following Teixeira et al. (2017). ^a Measured by a potentiometer in a 1:2.5 soil/water suspension. ^b Available P, K, Cu, Mn, Fe and Zn extracted by Mehlich-1. ^c extracted by Monocalcium phosphate in acetic acid. ^d Exchangeable Al³⁺, Ca²⁺ and Mg²⁺ extracted by 1.0 mol KCl L⁻¹(1:10, v/v). ^e extracted with calcium acetate solution 0.5 mol L⁻¹ buffered at pH = 7.0. ^f = Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺. ^g = effective cation exchange capacity = Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺ + Al³⁺. ^h Cation exchange capacity at pH 7.0 as calculated by combining H⁺ + Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ and K⁺. ⁱ = (Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺) / (CEC_{pH7}) × 100. ^j = Al³⁺ / (effective CEC) × 100. ^k after adding 60 mg L⁻¹ of P (Alvarez V. et al., 2000). ^l Walkley-Black (Yeomans and Bremner, 1988). ^m Kjeldahl digestion (Tedesco et al., 1995). ⁿ particle size analysis with the pipette method (Ruiz, 2005). ^o volumetric ring method (Teixeira et al., 2017). ^p volumetric-flask method (Teixeira et al., 2017). ^q = 1 - (Soil bulk density / Particle density).

Experimento foi implantado em novembro de 1997 em área de pastagens degradadas, sendo composto por dois sistemas (tratamentos) que se caracterizavam por faixas de árvores com 10 m de largura intercaladas por 30 metros de pastagens estabelecidas com braquiária decumbens cv. Basilisk (sinonímia *Urochloa decumbens*, (Stapf) consorciada com estilosantes (*Stylosanthes guianensis* (Aubl.) Sw. cv. Mineirão. No primeiro sistema, denominado de alta diversidade, as faixas de árvores eram constituídas por quatro espécies de

leguminosas (*Acacia mangium* Willd., *Acacia angustissima* (Mill.) Kuntze, *Mimosa artemisiana* Heringer & Paula, *Leucaena leucocephala* (Lam.) e uma Myrtaceae, *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. O outro sistema, caracterizado como de baixa diversidade arbórea, foi implantado em condições semelhantes ao de alta diversidade, porém as faixas de árvores foram compostas exclusivamente por *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. Em ambos os sistemas, as faixas de árvores foram estabelecidas em nível, em espaçamento de 3 x 3 m entre árvores, sendo que no tratamento de alta diversidade, a distribuição de espécies foi alternada, uma após a outra, de forma que árvores da mesma espécie ficaram distantes 15 m entre si.

O estabelecimento da pastagem foi realizado em novembro de 1997, quando foram aplicados nas faixas de 30 m: 1000 kg ha⁻¹ de calcário dolomítico, 600 kg ha⁻¹ de fosfato natural de rocha, 25 kg ha⁻¹ de superfosfato simples, 100 kg ha⁻¹ de KCl e 30 kg ha⁻¹ de micronutrientes (FTE BR-16). Após a implantação dos sistemas não foi realizada outra calagem ou realizada qualquer adubação. Entre 1998 e 2000, a área experimental permaneceu fechada ao pastejo pelos animais, a fim de se garantir o crescimento inicial das espécies arbóreas e, em 2001 e 2002, as pastagens foram utilizadas para uso por vacas não lactantes, respeitando-se períodos de ocupação de 5 dias e descanso de 45 dias. por vacas não lactantes, respeitando-se períodos de ocupação de 5 dias e descanso de 45 dias.

2.2 Amostragem de solo, serapilheira e raiz

O estudo abrangeu duas faixas de pastagens de 30 m de largura cada, as quais eram delimitadas pelas faixas de árvores de cada tratamento (alta e baixa diversidade), sendo duas linhas de árvores laterais e uma central (Figura 1). Em cada faixa de pastagens foram estabelecidos três transectos, dois situados a partir das faixas de árvores laterais e o terceiro a partir da linha central, totalizando seis transectos por sistema (alta e baixa diversidade). Nos transectos perpendiculares às faixas de árvores foram estabelecidos quatro pontos de amostragem a cada cinco metros (0, 5, 10 e 15 m) partindo da parte central das faixas de árvores. Em cada ponto de coleta, toda biomassa verde e morta sobre a superfície foi colhida e quantificada quanto a sua massa seca, considerando uma área de 0,5 m x 0,5 m. Posteriormente, o material vegetal foi seco em estufa de ar forçado a 55 °C por 72 h e pesado para determinar a massa seca. Nesses pontos do transecto foram coletadas amostras de solos deformadas e indeformadas em quatro profundidades (0.0-0.10, 0.10-0.30, 0.30-0.60 e 0.60-1.0 m respectivamente). Para tanto, trincheiras foram abertas nos pontos selecionados para a

coleta de amostras deformadas. Todas as amostras de solo foram secas ao ar, trituradas, peneiradas e armazenadas para posteriores análises (<2 mm, TFSA).

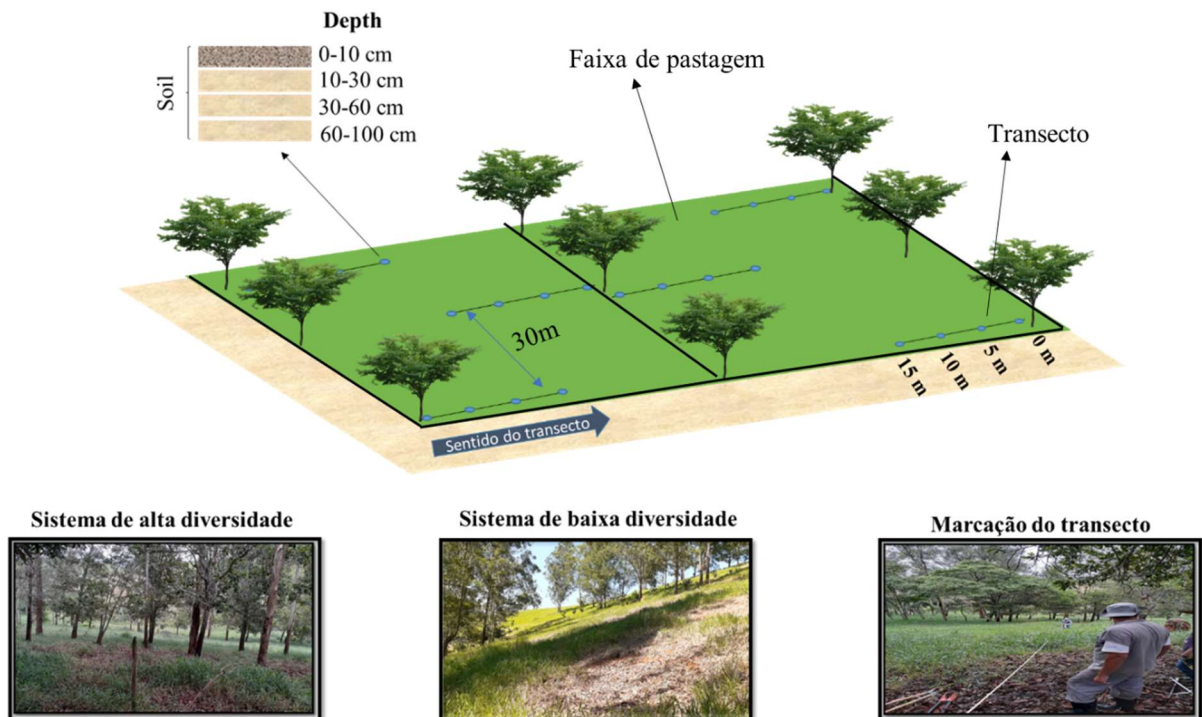
A densidade de raízes foi determinada utilizando-se um bloco de solo com dimensões (0.5 m de comprimento x 0.5 m de largura x 0.1 m de altura) em cada distância e sistema. O bloco de solo foi peneirado em malha de 2 mm de diâmetro para separação das raízes. As raízes retidas foram secas em estufa a 65 °C por 48 h para determinação da massa seca das raízes. Em seguida, a densidade da raiz (t ha⁻¹) foi obtida de acordo com a equação abaixo:

$$\text{Densidade de raiz} = \frac{\text{RDM}}{\text{V}} \times \text{BD} \times 2 \quad (1)$$

onde: RDM é a massa seca da raiz (g); V é o volume de solo seco (dm³); BD é a densidade do solo na camada de 0.0-0.10 m.

Amostras indeformadas foram coletadas com amostrador de Uhland usando anéis com 0.05 m de diâmetro interno e 0.05 m de altura, nas mesmas camadas de solo e posições descritas acima. Essas amostras foram utilizadas para determinar a densidade do solo pelo método do anel volumétrico (TEIXEIRA *et al.*, 2017)

Figura 1 – Representação esquemática da área de estudo e da coleta de amostras em experimento de longa duração com sistemas silvipastoris de baixa e alta diversidade, Coronel Pacheco – MG, Brasil.



2.3 Fracionamento da matéria orgânica do solo (MOS) e C lábil

O fracionamento da MOS foi realizado conforme procedimentos descritos por Cambardella and Elliott (1992). Para isso, foram utilizados 10 g de terra fina seca ao ar (TFSA) em tubo de centrífuga (50 ml) e adicionado 30 mL de hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}), agitado durante 15 horas em agitador horizontal 120 rpm. Após agitação, a solução com solo em suspensão foi passada em peneira de malha de 0,053 mm. O material retido na peneira equivale à matéria orgânica particulada (POM) e o que passou na peneira é denominada matéria orgânica associada aos minerais (MAOM). Ambas as frações foram secas em estufa a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ para evaporação da água. Após a secagem o material foi pesado, macerado em almofariz de ágata e em seguida, passado em peneira de 100 mesh (0,149 mm) para posterior determinação dos teores de C e N da POM e da MAOM.

Nessas frações foram determinados os teores de C orgânico e N total. O C orgânico total (TOC) foi determinado por oxidação via úmida de acordo com (YEOMANS; BREMNER, 1988) utilizando $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ($0,167 \text{ mol L}^{-1}$) em excesso e em meio ácido (H_2SO_4) com posterior titulação do $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ excedente com $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ($0,5 \text{ mol L}^{-1}$). O N total foi determinado por digestão com H_2SO_4 concentrado na presença de Na_2SO_4 e CuSO_4 , seguido da destilação com NaOH (10 mol L^{-1}) e titulação com HCL ($0,02 \text{ mol L}^{-1}$) Kjeldahl (TEDESCO *et al.*, 1995).

Além disso, foi determinado o C da fração lábil da MOS de acordo com Blair *et al.*, (1995). Para tanto, foram pesadas 1 g de solo ($<0,149 \text{ mm}$) em tubos de centrífuga com tampa de rosca e adicionados 25 mL de KMnO_4 ($0,033 \text{ mol L}^{-1}$) em cada tubo. Todos os tubos foram hermeticamente fechados e agitados por 1h a 60 rpm e em seguida centrifugados por 5 min a 2000 rpm. A determinação do C lábil foi realizada em espectrofotômetro com comprimento de onda de 565 nm, utilizando 1 mL do sobrenadante pipetado em balão de 250 mL com volume completado com água deionizada Kjeldahl (TEDESCO *et al.*, 1995). Todas as etapas de extração com KMnO_4 foram realizadas na ausência de luz, evitando-se a fotoxidação.

2.4 Estoques de C da POM, MAOM, total e lábil e N total no solo

Os estoques de C orgânico e N total foram determinados para as frações POM e MAOM e o C lábil do solo utilizando o método proposto por Ellert and Bettany (1995). Nesse método considera-se a massa de solo equivalente, corrigindo a espessura da camada de solo de acordo com alterações na densidade do solo (d_s), considerando a área de vegetação natural

como referência. A massa do solo de cada profundidade em cada tratamento é calculada pela equação:

$$M_{solo} = ds \times E \times A \quad (2)$$

em que, M_{solo} é a massa do solo por unidade de área em cada camada avaliada ($Mg \text{ ha}^{-1}$); ds é a densidade do solo em cada camada coletada ($g \text{ cm}^{-3}$); E é a espessura de solo de cada camada (m); A é a unidade de área a ser utilizada ($1 \text{ ha} = 10.000 \text{ m}^2$). Posteriormente foi realizado o cálculo de espessura de camada a ser adicionada ou subtraída dos diferentes tratamentos em relação a mata nativa, utilizando a seguinte equação:

$$E_{(ad|sub)} = (M_{ref.} - M_{area}) \times fha \div ds_{\text{área}} \quad (3)$$

em que, $E_{(ad|sub)}$ é a espessura da camada de solo a ser adicionada (+) ou subtraída (-) a camada da área (m); $M_{ref.}$ é a massa equivalente do solo do tratamento referência ($Mg \text{ ha}^{-1}$); M_{area} é a massa equivalente do solo de cada tratamento ($Mg \text{ ha}^{-1}$); fha é o fator de conversão de ha para m^2 ($0,0001 \text{ ha m}^{-2}$); $ds_{\text{área}}$ é a densidade do solo na camada da área de estudo ($Mg \text{ m}^{-3}$). A partir da determinação da espessura de camada de solo a ser adicionada ou subtraída pela equação 3, foram, então, calculados os estoques de TOC e C lábil e o N total, de acordo com a seguinte equação:

$$ECS = C_{conc} \times ds \times (E \pm E_{(ad|sub)}) \times 10 \quad (4)$$

em que, ECS é o estoque de C orgânico total ou C lábil ou N total do solo em $Mg \text{ ha}^{-1}$; C_{teor} é o teor C orgânico total ou C lábil ou N total do solo da camada avaliada expresso ($g \text{ kg}^{-1}$); E é a espessura da camada de solo (m); $E_{(ad|sub)}$ é a espessura da camada de solo a ser adicionada (+) ou subtraída (-) à camada da área (m); 10 é o fator de conversão das unidades utilizadas para $Mg \text{ ha}^{-1}$.

Os estoques totais de C orgânico e N total do solo foram obtidos pela soma dos estoques obtidos nas frações da MOS.

2.5 Análise isotópica

A assinatura isotópica de ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$) das frações da matéria orgânica (POM e MAOM) foram determinados em analisador elementar (Flash 2000 IRMS, Thermo Fisher Scientific, Bremen, Germany) acoplado a um espectrômetro de massas de razão isotópica (DELTA V Advantage, Thermo Fisher Scientific, Bremen, Germany). Essas determinações

foram realizadas para amostras compostas de cada profundidade e distância coletada no transecto (n=6) em ambos os SSPs. Na determinação da assinatura isotópica foi utilizado um padrão de pó de trigo com valor V-PDB de $-26,43 \pm 0,08$ (Iso-Analytical, Cheshire, UK) intercalado entre cada 10 amostras experimentais de forma que as amostras padrão e experimental fossem submetidas a condições de análise idênticas. A razão isotópica foi então expressa em partes por mil (‰) em relação ao padrão internacional Viena-Pee Dee Belemnite (VPDB), de acordo com a equação:

$$\delta^{13}C = \left(\frac{\frac{13C}{12C} amostra - \frac{13C}{12C} padrão}{\frac{13C}{12C} padrão} \right) \times 1000 \quad (5)$$

O compartimento de C derivado de planta C4 foi calculado conforme Vitorello *et al.* (1989):

$$\%C_4 = \left(\frac{(\delta - \delta_S)}{\delta_P - \delta_S} \right) \times 100 \quad (6)$$

em que % C₄ é a porcentagem de C derivado de planta C₄; δ é assinatura natural do ¹³C nas frações POM e MAOM; δ_S é a assinatura isotópica do ¹³C em amostras de solos sem nenhuma contribuição das plantas C₄ para cada uma das situações estudadas. Foram usados os valores da razão isotópica das amostras coletadas na camada de 0.60-1.0 m, na distância zero das faixas de alta diversidade (-24,6750‰ e -27,8130‰, respectivamente para as frações MAOM e POM) e baixa diversidade arbórea (-23,1400‰ e -27,6260‰, respectivamente para as frações MAOM e POM). O δ_P é a assinatura isotópica do ¹³C nas amostras das plantas C₄ com valor de -13,5190‰, proveniente da serapilheira da área de braquiária.

A contribuição percentual do C originário de planta C₃ foi calculada conforme equação abaixo:

$$\%C_3 = 100 - C_{C4} \quad (7)$$

em que: %C₃ é a porcentagem de C derivado de planta C₃ e % C₄ é a porcentagem de C derivado de planta C₄.

2.6 Análises estatísticas

A análise estatística dos dados foi realizada em um fatorial 2 x 4 x 4, sendo dois sistemas de manejo (baixa e alta diversidade), quatro distâncias (0, 5, 10 e 15 m) e quatro

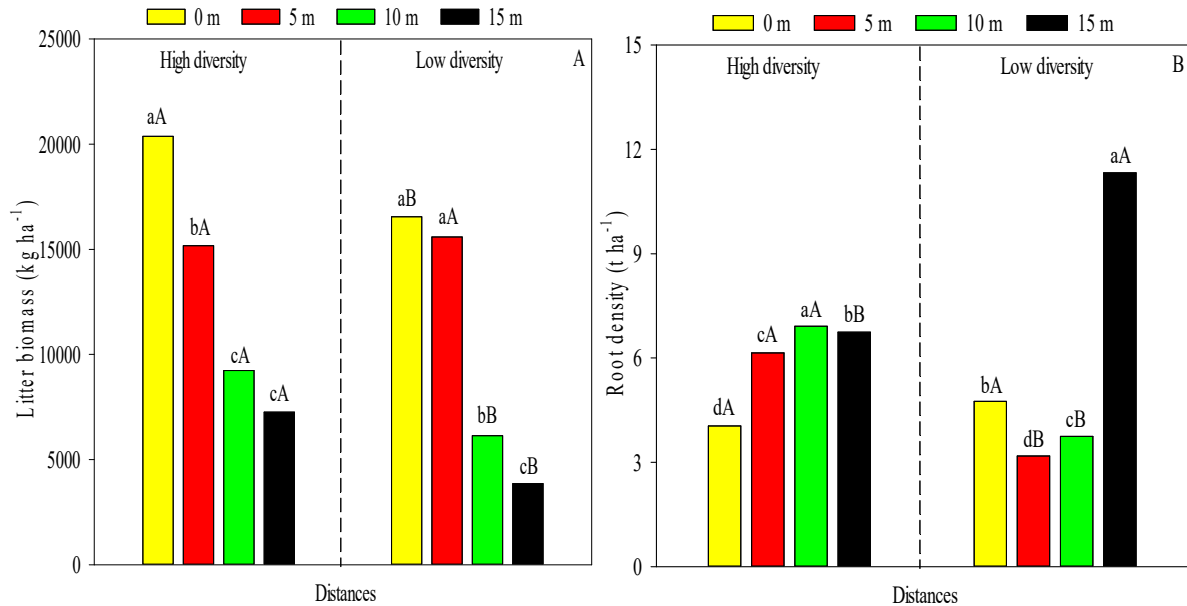
profundidades (0.0-0.10, 0.10-0.30, 0.30-0.60 e 0.60-1.0 m). Os sistemas de alta e baixa diversidade foram distribuídos em delineamento sistemático (ALVAREZ; ALVAREZ, 2013; CALZADA BENZA, 1964), considerando os seis transectos como repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância e o desdobramento das interações sistema silvipastoril x distâncias em cada profundidade foi realizado independentemente de significância. As médias dos tratamentos em cada profundidade foram comparadas pelo teste Tukey, até 5% de probabilidade, utilizando-se os erros apropriados para cada tipo de comparação.

3 RESULTADOS

3.1 Produção de serapilheira e densidade de raízes

A distância da faixa de árvores influenciou a quantidade de serapilheira depositada pelo componente arbóreo, assim como a densidade de raízes em ambos os SSPs (Figura 2). No sistema de alta diversidade observou-se uma relação inversamente proporcional entre a deposição de serapilheira e a distância da faixa de árvores, ou seja, na menor distância (0 m) verificou-se maior produção de serapilheira, sendo a 5 m intermediário entre 0 m e as duas maiores distâncias (10 e 15 m). No sistema baixa diversidade, as maiores médias de serapilheira foram observadas para as distâncias 0 e 5 m, enquanto na maior distância (15 m) observou-se menor ($P>0.05$) produção de serapilheira. Na comparação entre os SSPs para cada distância, constatou-se que, com exceção da distância de 5 m, em que não houve diferença significativa ($P>0.05$), nas demais distâncias o sistema de alta diversidade produziu maior quantidade de serapilheira. A densidade de raízes seguiu comportamento inverso ao da serapilheira em ambos os SSPs. No sistema de alta diversidade a distância de 10 m da faixa de árvores obteve maior média, enquanto no sistema de baixa diversidade maior média ($P<0.05$) de densidade de raízes foi observada na distância 15 m. Quando se comparou os SSPs em cada distância verificou-se maiores médias nas distâncias 5 e 10 m para o sistema de alta diversidade, enquanto o inverso foi observado na maior distância (15 m), onde sistema de baixa diversidade teve maior densidade de raízes. Na distância mais próxima a faixa de árvores (0 m) não houve diferença ($P>0.05$) entre os SSPs.

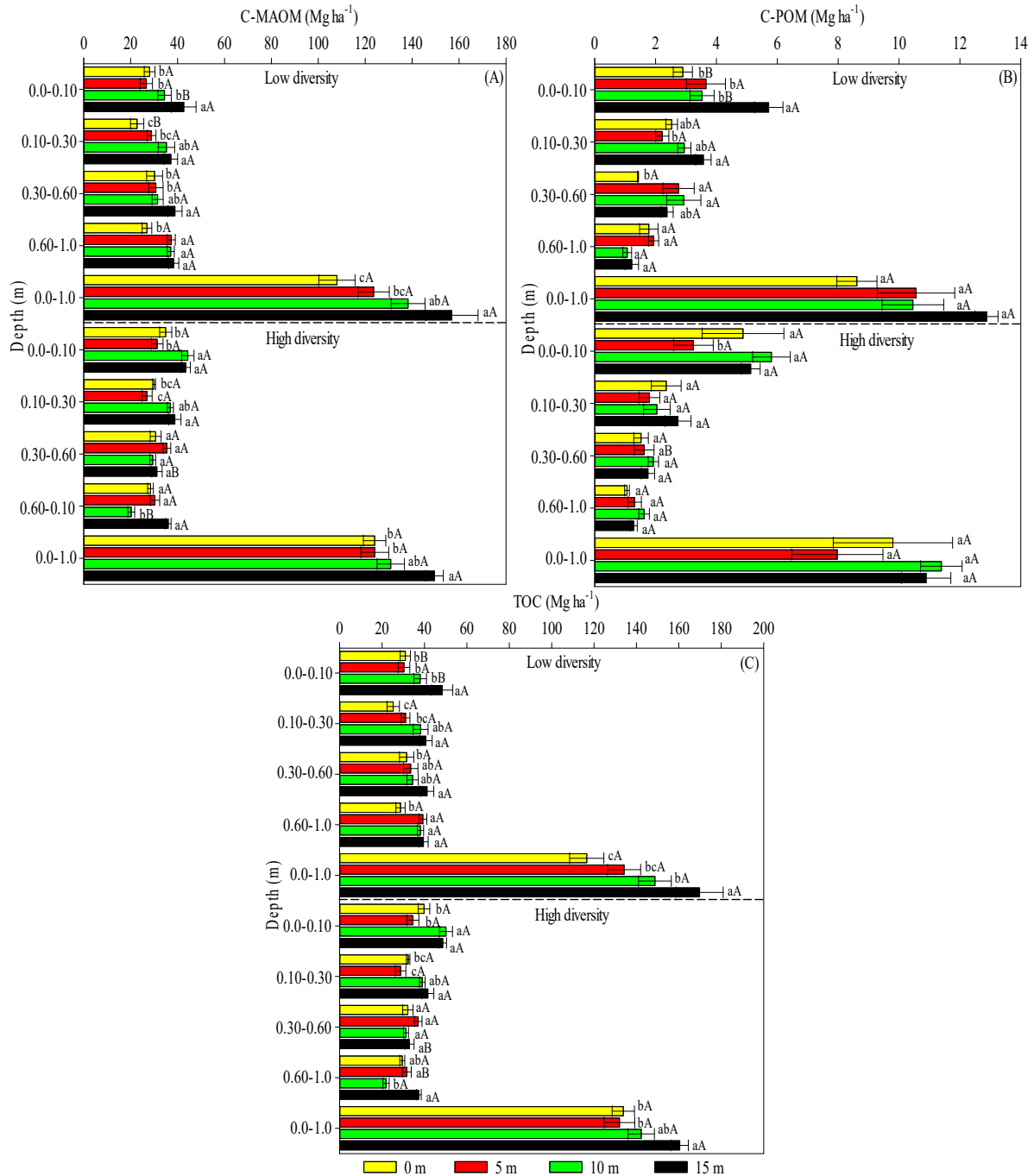
Figura 2 – Produção de serapilheira (A) e densidade de raízes na profundidade de 0.0-0.10 m (B) em sistemas silvipastoris de baixa e alta diversidade. Letras maiúsculas comparam sistemas silvipastoris em cada distância e as minúsculas comparam as distâncias em cada sistema silvipastoril. Quando as letras são iguais, as médias são semelhantes estatisticamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.



3.2 Estoques de C e N

Os resultados avaliados na profundidade de 0.0-1.0 m indicaram a semelhança ($P < 0,05$) dos estoques de C orgânico total (TOC) e nas frações MAOM e POM entre os sistemas de alta e baixa diversidade arbórea em todas as distâncias avaliadas. Por outro lado, os estoques de N total foram semelhantes ($P < 0,05$) somente nas distâncias 0 e 5 m (N-total e N-MAOM), sendo nas demais distâncias (10 e 15 m) superiores ($P < 0,05$) no sistema de maior diversidade. O N-POM apresentou maiores médias ($P < 0,05$) em todas as distâncias no sistema de alta diversidade (Figuras 3 e 4). Quanto ao comportamento dos estoques de C orgânico e N total em relação às distâncias das faixas, tanto nos sistemas de alta ou baixa diversidade de árvores, observou-se que também, de 0.0-1.0 m, no geral, os estoques de C orgânico e N total são maiores nas distâncias de 10 e 15 m (C e N totais, C-MAOM e N-POM), comparativamente a 0 e 5 m ($P < 0,05$), podendo ser similares ($P < 0,05$) entre si ou não, mas sempre com os maiores valores observados em 15 m (TOC, C-MAOM, C-POM). Entre as médias das distâncias de 0 e 5 m, em grande maioria, as variáveis dos estoques de C orgânico e N total são semelhantes ($P < 0,05$) e, quando não o são, estas são menores na distância 0 ($P < 0,05$). Somente para C-POM, as médias apresentaram-se similares ($P < 0,05$) entre as distâncias em ambos os sistemas silvipastoris.

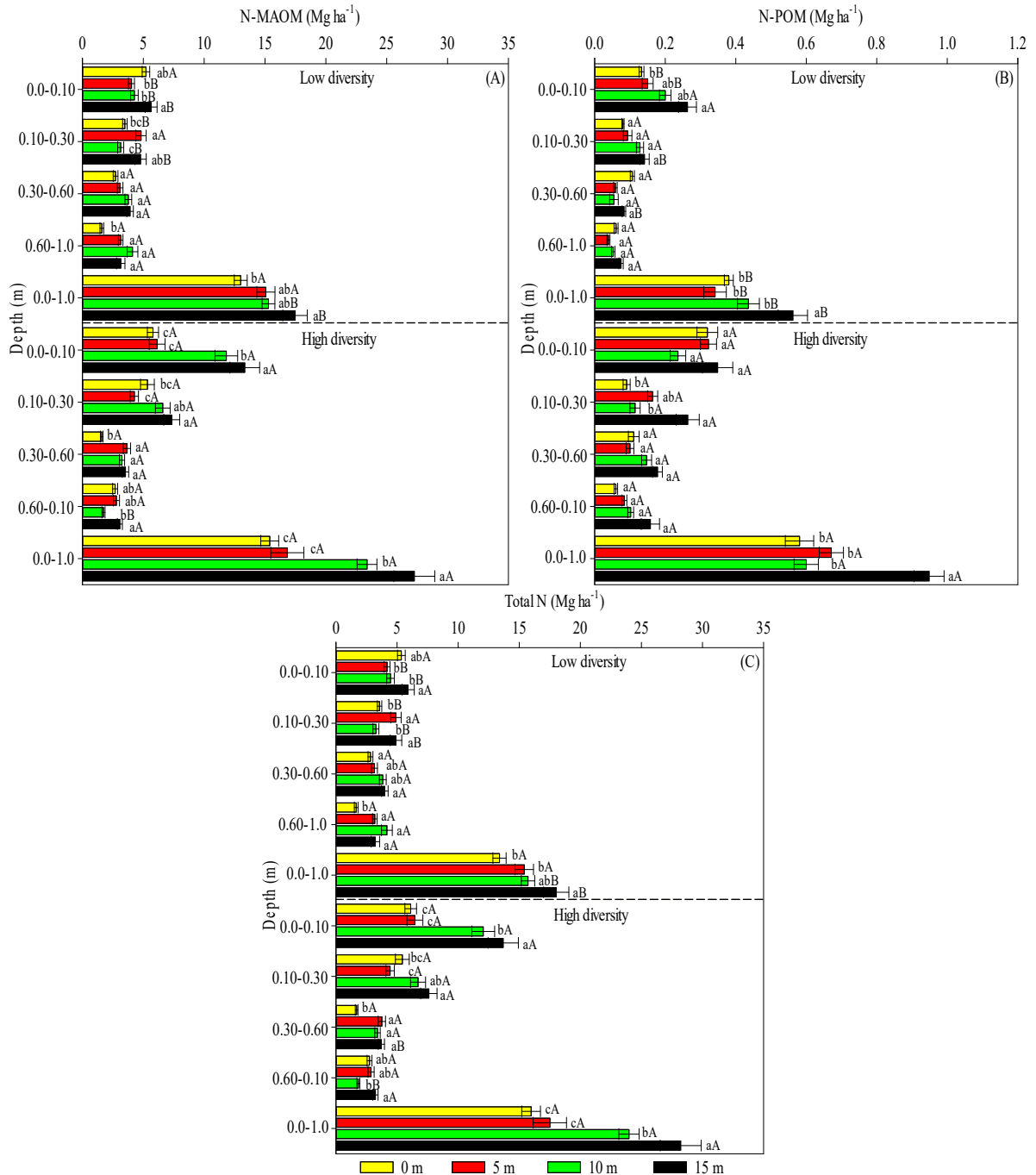
Figura 3 – Estoques médios de C da matéria orgânica associada a minerais (C-MAOM) (A), da matéria orgânica particulada (C-POM) (B) e orgânico total (TOC) (C) em sistemas silvipastoris de baixa e alta diversidade nas profundidades de 0.0-0.10, 0.10-0.30, 0.30-0.60, 0.60-1.0 e 0.0-1.0 m. Letras maiúsculas comparam sistemas silvipastoris em cada profundidade e as minúsculas comparam as distâncias em cada sistema silvipastoril, também em cada profundidade. Quando as letras são iguais, as médias são semelhantes estatisticamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.



Ao avaliar os resultados de estoques de C orgânico e N total no solo e nas frações da matéria orgânica por profundidade de coleta, obtidos em cada distância das faixas de alta e

baixa diversidade de árvores, observou-se também o mesmo comportamento geral verificado em 0.0-1.0 m, ou seja, poucas diferenças significativas ($P < 0,05$) entre sistemas silvipastoris. Quando houve diferenças significativas ($P < 0,05$), constatou-se algumas situações distintas quanto a superioridade de um ou outro sistema e da ocorrência em número de casos, considerando profundidades, distâncias das faixas de diversidade de árvores e variáveis consideradas.

Figura 4 – Estoques médios de N da matéria orgânica associado aos minerais - N-MAOM (A), da matéria orgânica particulada - N-POM (B) e total – NT (C) em sistemas silvipastoris de baixa e alta diversidade nas profundidades de 0.0-0.10, 0.10-0.30, 0.30-0.60, 0.60-1.0 e 0.0-1.0 m. Letras maiúsculas comparam sistemas silvipastoris em cada profundidade e as minúsculas comparam as distâncias em cada sistema silvipastoril, também em cada profundidade. Quando as letras são iguais, as médias são semelhantes estatisticamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.



A primeira situação foi o grande número de casos em que os estoques de TOC e C-MAOM foram maiores ($P < 0,05$) ocorreram no sistema silvipastoril com faixas de baixa

diversidade de árvores, grande parte dos casos nas camadas inferiores (0.30-0.60 e 0.60-1.0 m) e nas distâncias > 5 m (exceção para a distância 0 m e C-MAOM em 0.60-1.0 m). Quando maiores ($P < 0,05$), os estoques de TOC e C-MAOM ocorreram no sistema de faixas de alta diversidade de árvores, porém mais superficialmente: 0.0-0.10 m para 0 e 10 m de distância (TOC e C-MAOM) e 0.10-0.30 m para 0 m de distância (C-MAOM). Os estoques de N total e N-MAOM apresentaram comportamento contrário ao observado para as variáveis equivalentes anteriores, pois os estoques foram maiores ($P < 0,05$) em um número considerável de profundidades e distâncias no sistema com faixas de alta diversidade de árvores, em grande parte das distâncias > 10 m {exceções ocorreram para distâncias de 0 (N-MAOM: 0.10-0.30 m) e 5 (N total: 0.0-10 e 0.60-1.0 m; N-MAOM: 0.0-0.10 e 0.10-0.30 m; N-POM: 0.0-0.10 m)}. Os maiores estoques de N total e N-MAOM nos sistemas de baixa diversidade de árvores ocorreram nas profundidades inferiores (0.30-0.60 e 0.60-1.00 m) em todas as distâncias avaliadas. C-POM e N-POM apresentaram maiores estoques ($P < 0,05$) no sistema silvipastoril com faixas de alta diversidade de árvores, qualquer que seja a profundidade e distâncias avaliadas, especialmente nas camadas superficiais (0.0-0.10 e 0.10-0.30 m) e indistintamente em distâncias < 10 m. Exceção ocorreu com os maiores valores de ambas variáveis na camada de 0.30-0.60 m.

Em relação às profundidades, os maiores estoques de C e N da MAOM, POM e COT e N total no solo tiveram comportamento diferenciado para a maioria das situações analisadas. De forma consistente, quando se compararam os dois sistemas, observaram-se maiores estoques no sistema de alta diversidade arbórea para todas as situações e profundidades 0.0-0.10, 0.10-0.30, 0.30-0.60, 0.60-1.0 e 0.0-1.0 m. Esse aumento para as profundidades de 0.0-0.10 e 0.10-0.30 m está relacionado à grande deposição de matéria orgânica, que é a maior neste sistema de alta diversidade devido também ao aporte de resíduos vegetais (serapilheira) (Figura 2).

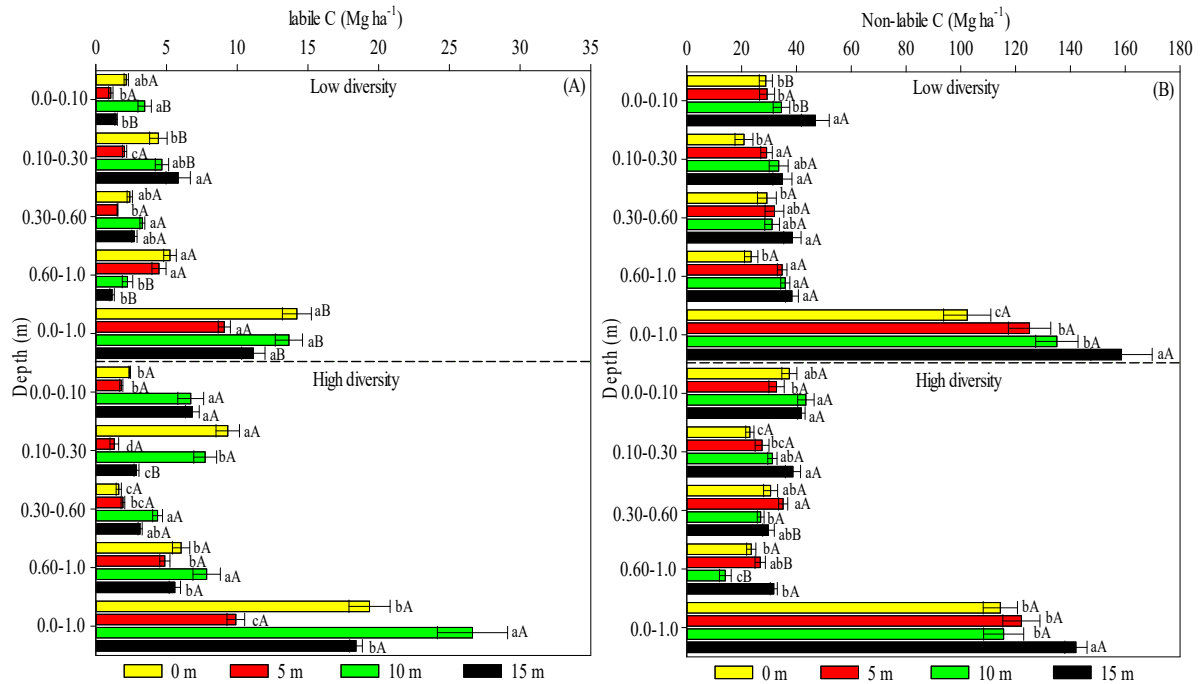
Os estoques de C lábil e não-lábil de 0.0-1.0 m dos sistemas silvipastoris com faixas de alta e baixa diversidade de árvores corresponderam de 13,07% a 8,45% e 86,93 a 91,55%, respectivamente, dos estoques totais de C observados nessas mesmas condições.]

Constatou-se que, de 0.0-1.0 m, os estoques de C lábil apresentaram comportamento diferenciado do observado com o C-não lábil quanto a comparação entre sistemas silvipastoris. Para o C-não lábil verificou-se semelhanças ($P > 0,05$) entre sistemas em cada distância avaliada, enquanto para o C lábil os estoques foram maiores ($P < 0,05$) no sistema

silvipastoril com faixas de alta diversidade de árvores em todas as distâncias avaliadas, exceto na distância de 5 m. Entre as distâncias, o sistema silvipastoril com faixas de árvores de baixa diversidade apresentaram semelhanças estatísticas ($P > 0,05$) quanto a C lábil, enquanto o de alta diversidade, nas distâncias de 10 m e de 5 m, foram encontrados os maiores e os menores estoques, respectivamente, estando os estoques das demais distâncias com valores intermediários. Quanto ao C não lábil, os estoques foram maiores na distância de 15 m em ambos os sistemas silvipastoris ($P < 0,05$), sendo que no de alta diversidade de árvores não foram constatadas diferenças entre as demais distâncias. Já, no sistema silvipastoril de baixa diversidade de árvores, os estoques na distância de 0 m foram os menores, sendo 5 e 10 intermediários entre 0 e 15 m de distância.

Ao avaliar os resultados dos estoques de C lábil e não lábil para as demais profundidades de coleta, observou-se diferenças significativas ($P < 0,05$) para as maiorias das situações avaliadas em cada sistema silvipastoril. Comparando cada distância entre os SSPs em cada profundidade observou-se que, no geral, os estoques de C lábil foram superiores ($P > 0,05$) no sistema de alta diversidade. A única exceção foi na profundidade de 0.10-0.30 m (distância 15 m) em que o maior estoque de C lábil foi observado no sistema de baixa diversidade. Os estoques de C lábil no sistema de baixa diversidade foram superiores na distância de 10 m, camada superficial do solo (0.0-0.10 m), assim como também nas camadas de 0.10-0.30 e 0.30-0.60 m, nestes casos similares ($P < 0,05$) a distância de 15 m. Já na camada de 0.60-1.0 m, maiores médias de C lábil foram observadas nas distâncias de 0 e 5 m. No sistema de alta diversidade, os maiores estoques de C lábil nas profundidades de 0.0-0.10 e 0.30-0.60 m foram constatados nas maiores distâncias (10 e 15 m), enquanto para as profundidades 0.10-0.30 e 0.60-1.0 m, os maiores estoques de C lábil foram observados nas distâncias de 0 e 10 m, respectivamente. Maiores estoques de C não lábil no sistema de baixa diversidade de árvores foram obtidos na distância de 15 m, no entanto, não diferiram estatisticamente das distâncias 5 e 10 m e nas camadas subsuperficiais (0.10-0.30, 0.30-0.60 e 0.60-1.0 m). Na área de alta diversidade, novamente a distância de 15 m nas três primeiras camadas (0.0-0.10, 0.10-0.30 e 0.30-0.60 m) obteve maiores médias, não diferindo ($P < 0,05$) da distância 10 m até 0.30 m e das distâncias 0 e 5 m na camada de 0.30-0.60 m. Na camada de 0.60-1.0 m, maior média ($P < 0,05$) foi observada na distância de 5 m.

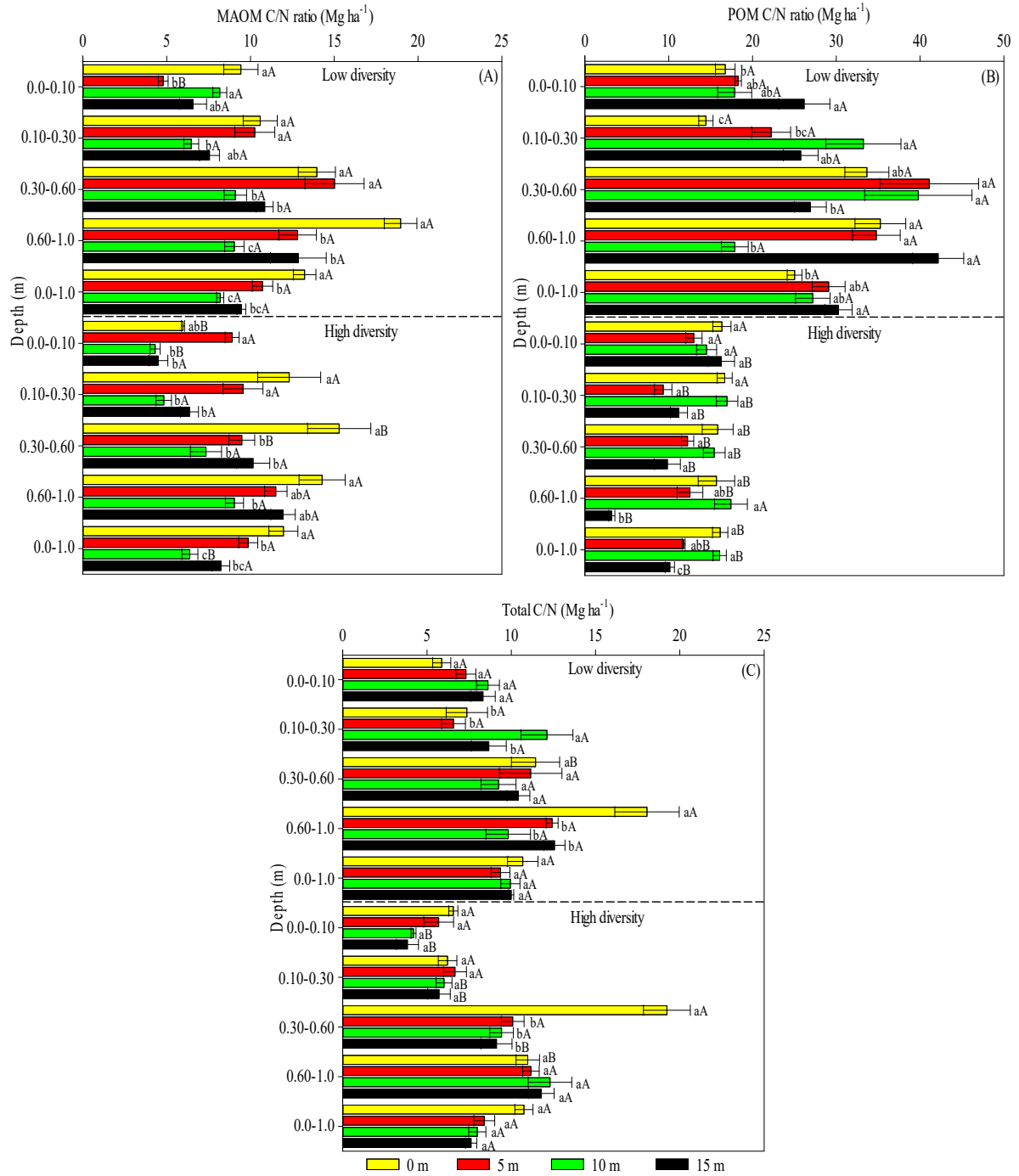
Figura 5 – Estoques médios de C lábil (A) e não lábil (B) em sistemas silvipastoris de baixa e alta diversidade nas profundidades de 0.0-0.10, 0.10-0.30, 0.30-0.60, 0.60-1.0 e 0.0-1.0 m. Letras maiúsculas comparam sistemas silvipastoris em cada profundidade e as minúsculas comparam as distâncias em cada sistema silvipastoril, também em cada profundidade. Quando as letras são iguais, as médias são semelhantes estatisticamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.



3.3 Relação carbono/nitrogênio

A relação C/N foi estimada considerando os estoques de COTe N total e das frações POM e MAOM. Quando avaliam-se os resultados obtidos para 0.0-1.0 m no caso dos estoques totais, observou-se que ambos os sistemas silvipastoris apresentaram-se similares ($P > 0,05$) quanto aos valores das relações C/N. O mesmo aconteceu em relação às distâncias, ou seja, as relações C/N a 0, 5, 10 e 15 m de distância das faixas, tanto de baixa quanto de alta diversidade, são similares ($P < 0,05$). Em ambas as situações, a relação C/N não ultrapassa 42.16. Comportamento semelhante foi observado quando avaliaram-se cada uma das profundidades, sistemas e distâncias, tanto em uma ou outra situação, ou seja, a similaridades das relações C/N utilizando os estoques totais ($P > 0,05$) em grande parte das situações estudadas. Destacam-se como exceções os maiores valores na distância de 0 m (0.60-1.0 m) e 10 m (0.10-0.30 m) no sistema silvipastoril de baixa diversidade e 0 m (0.30-0.60 m) no de alta diversidade.

Figura 6 - Relações C/N médias na matéria orgânica associado aos minerais (MAOM C/N ratio) (A), particulada (POM C/N ratio) (B) e total (Total C/N) (C) em sistemas silvipastoris de baixa e alta diversidade nas profundidades de 0.0-0.10, 0.10-0.30, 0.30-0.60, 0.60-1.0 e 0.0-1.0 m. Letras maiúsculas comparam sistemas silvipastoris em cada profundidade e as minúsculas comparam as distâncias em cada sistema silvipastoril, também em cada profundidade. Quando as letras são iguais, as médias são semelhantes estatisticamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.



Quanto às frações da matéria orgânica, constataram-se os maiores valores ($P < 0,05$) para os sistemas silvipastoris com faixas de baixa diversidade de árvores tanto para as relações C/N na MAOM quanto POM em 0.0-1.0 m. A única exceção foi no sistema de alta diversidade e a 10 m em que a relação C/N da MAOM foi maior ($P < 0,05$). Entre as distâncias constatou-se que os valores de relação C/N da POM e MAOM são em geral decrescentes ($P < 0,05$), à medida que aumenta a distância das faixas de árvores, às vezes invertendo as posições intermediárias, mas, no geral, a 0 m ocorrem os maiores valores ($P < 0,05$), enquanto os menores estão associados a 10 ou 15 m de distância ($P < 0,05$). Contudo, houve uma inversão de valores no sistema de baixa diversidade de árvores e C/N-POM, pois observou-se os maiores valores da relação C/N nas maiores distâncias da faixa de árvores ($15 \geq 10 \geq 5 \geq 0$).

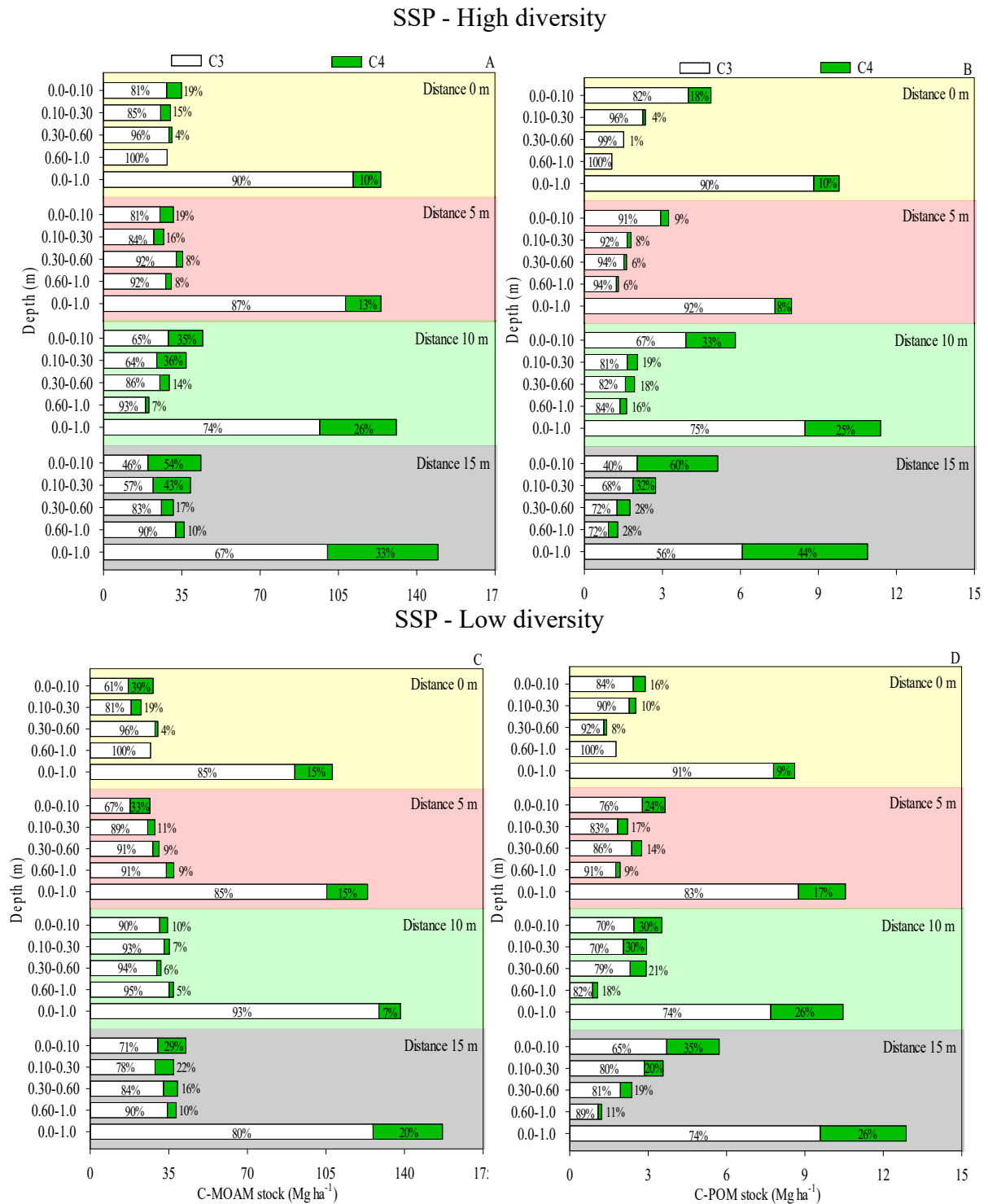
Entre os sistemas, em cada distância e profundidade, constataram-se dois comportamentos diferentes: as relações C/N dos sistemas silvipastoris de baixa diversidade de árvores nas faixas foram, em grande parte, similares aos de alta diversidade ($P < 0,05$) quando consideraram-se os valores obtidos na MAOM. Quando diferenças ocorrem, as relações C/N foram maiores no sistema silvipastoril de baixa diversidade, especialmente em 0.0-0.10 m, nas distâncias de 0 m, e em 0.30-0.60 m nas mesmas distâncias de 0 e 5 m. Também nos sistemas de baixa diversidade, as relações foram menores na MAOM em 0.0-0.10 m e nas distâncias de 5 e 10 m. Porém, quando avaliaram-se os valores na POM constatou-se que a grande maioria das situações avaliadas ocorreram maiores valores de relação C/N no sistema de baixa diversidade, sendo que as poucas exceções ficaram associadas aos valores similares das relações como são os casos de 0-10 m (a 0, 5 e 10 m de distância), 10-30 (0 m de distância) e 60-100 (10 m de distância).

3.4 Contribuição para matéria orgânica do solo pelos sistemas silvipastoris

As proporções de C oriundo de rotas fotossintéticas C3 ou C4 da POM e MAOM, avaliadas pela razão isotópica do C (valores de $\delta^{13}\text{C}$), permitiram identificar que, em ambos os SSPs, alta ou baixa diversidade de árvores, os estoques de C-C4 aumentam à medida que a distância das faixas de árvores no transecto aumenta ($15 > 10 > 5 > 0$ m) (Figura 7). Esse comportamento foi evidente para as primeiras camadas, especialmente 0.0-0.10 m, o que também ocorre ao considerar a camada de 0.0-1.0 m. Os estoques C-C4 e suas proporções diminuem com a profundidade para ambas as frações da matéria orgânica do solo (MOS) em todas as distâncias avaliadas e SSPs. Contudo, no sistema de alta diversidade, especialmente

nas maiores distâncias (10 e 15 m), verificou-se maior contribuição de C4 com aumento da profundidade quando comparado ao de baixa diversidade.

Figura 7 – Estoques e contribuições de C oriundos de rotas fotossintéticas C3 e C4 na matéria orgânica associada a minerais (C-MAOM) (A e C) e da matéria orgânica particulada (C-POM) (B e C) em sistemas silvipastoris de baixa e alta diversidade nas profundidades de 0.0-0.10, 0.10-0.30, 0.30-0.60, 0.60-1.0 e 0.0-1.0 m.



Ao considerar a primeira camada como de maior reflexo dos efeitos do SSP sobre a MOS, constatou-se que nas primeiras distâncias dos transectos (0 e 5 m) a tendência é de superioridade do SSP de baixa diversidade quanto a contribuição do C-C4 para a MAOM (39 e 33%, respectivamente) em relação ao SSP de alta diversidade (19 e 19 %, respectivamente). Já nas distâncias de 10 e 15 m nos transectos, ocorre o contrário, ou seja, a tendência é das maiores proporções de C-C4 ocorrerem no SSP de alta diversidade arbórea, nesse caso 35 e 54%, enquanto no SSP de baixa diversidade foram de 30 e 29%, respectivamente. Por outro lado, quando se avalia o C-C4 na POM, não se constata tendências evidentes como observado para MAOM, a não ser a superioridade do C-C4 na POM na distância de 15 m no SSP de alta diversidade, 60%, enquanto no SSP de baixa diversidade é de 35% (o que ocorre também na profundidade de 0.0-1.0 m, no caso 44% para o SSP de alta diversidade e 26% no SSP de baixa diversidade).

4 DISCUSSÃO

4.1 Produção de serapilheira e densidade de raízes

A proximidade da faixa de árvores promoveu claramente maior deposição de serapilheira em ambos os SSPs (Figura 2). Esse comportamento está relacionado à maior contribuição das árvores (folhas, galhos finos, galhos grossos e miscelânea) na composição da serapilheira nas posições próximas à projeção da copa. Além disso, nas distâncias mais próximas das árvores, a predominância de material lenhoso associado a um ambiente com menor insolação e maior retenção de umidade contribui para uma menor taxa de decomposição do material orgânico (BAHAMONDE *et al.*, 2012; PIERISTÈ *et al.*, 2019). Nas áreas mais centrais onde a influência da sombra das árvores é menos acentuada, há maior exposição do solo às altas temperaturas e, conseqüentemente, há aumento da decomposição do material orgânico (RADOMSKI; RIBASKI, 2012). As quantidades totais de serapilheira produzida são superiores (alta diversidade, distancia 0 m) ou similares (baixa diversidade, distância 0 m e ambos os SSPs, distância 5 m) às relatadas em florestas tropicais e outros ecossistemas altamente produtivos, que podem atingir a faixa de 10 a 17 t ha⁻¹ (LEÓN; OSORIO, 2014).

Os resultados desse estudo mostram que a produção de serapilheira foi substancialmente maior no sistema de alta diversidade em todas as distâncias, exceto a 5 m da faixa de árvores. Esses resultados evidenciam a maior eficiência do sistema de alta diversidade arbórea para a produção e deposição de material vegetal no solo, em comparação com o de

baixa diversidade. Essa maior deposição de serapilheira no solo no sistema de alta diversidade pode ser devido à maior produtividade primária líquida das várias espécies de árvores que compõem esse sistema em comparação com apenas uma espécie arbórea (baixa diversidade), visto que sistemas multi-estratos têm maior absorção de nutrientes e capacidade fotossintética (CHAPIN *et al.*, 2011). Contrariamente à serapilheira, maiores densidades de raízes foram observadas nas maiores distâncias das árvores (10 e 15 m), onde praticamente não há influência do sombreamento. A gramínea apresenta grande concentração de raízes, em parte porque quando estão em interação direta com a luz solar, são estimuladas a se desenvolver o máximo possível (LOPES *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2009), o que provavelmente aconteceu no presente estudo.

4.2 Estoques de carbono e nitrogênio

O sistema silvipastoril (SSP) de alta diversidade arbórea não aumentou os estoques de TOC ou o C associado às frações MAOM e POM na camada de 0.0-1.0 m quando comparado ao de baixa diversidade. No entanto, os solos do sistema de alta diversidade de árvores mostraram aumentos nos estoques de TOC na camada superficial (0.0-0.10 m, distâncias 0 e 10 m), e C-MAOM na superfície (0.0-0.10 m, distância 10 m) e na subsuperfície (0.10-0.30 m, distância 0 m). O aumento nos estoques de TOC no sistema de alta diversidade de árvores não foi detectado em camadas abaixo de 0.30 m (Figura 3), sugerindo que o benefício no sequestro de TOC neste sistema é limitado à camada superficial. Portanto, esses dados não suportam a primeira hipótese desse estudo, em que esperava-se que o sistema com maior diversidade de árvores aumentasse os estoques de TOC quando as camadas mais profundas do solo fossem analisadas. Outros estudos também mostraram que o plantio de árvores em pastagens não afetou os estoques de TOC tanto quanto era esperado, devido aos altos estoques iniciais de TOC sob a vegetação de pastagem existente (BECKERT *et al.*, 2016; CARDINAEL *et al.*, 2017; LIM *et al.*, 2018; UPSON *et al.*, 2016). De acordo com Upson *et al.* (2016) os estudos de C do solo sempre correrão o risco de baixo poder experimental, pois a magnitude da variação entre os pontos de amostragem e profundidades é alta em relação à magnitude das mudanças nos estoques de TOC. Assim, segundo os mesmos autores, as mudanças médias no C do solo diminuem com a profundidade, sendo difícil detectar diferenças em maiores profundidades. Além disso, a ausência de significância das diferenças nos estoques de TOC do solo na camada de 0.0-1.0 m de profundidade entre os sistemas no presente estudo poderia ser potencialmente atribuída ao manejo dos animais em pastejo, já que eles não foram separados entre os sistemas,

potencialmente eliminando qualquer diferença sistemática no retorno de excrementos e entrada de C nos solos.

Contrariamente aos dados de C e confirmando parte da hipótese do presente estudo, os estoques de N total ou associado a MAOM e POM na camada de 0.0-1.0 m foram superiores no sistema de alta diversidade arbórea. Os aumentos foram de 37, 36 e 63 %, respectivamente para N total, N-MAOM e N-POM. Tais resultados indicam que o N foi provavelmente introduzido no sistema pelas leguminosas (*Acacia mangium*, *Acacia angustissima*, *Mimosa artemisiana* e *Leucaena leucocephala*), devido a maior deposição de serapilheira (Figura 2). A adição desse material (serapilheira) com baixa relação C:N resulta em sua rápida decomposição e mineralização (APOLINÁRIO *et al.*, 2015), aumentando assim, os teores de nutrientes do solo, principalmente N. Outra razão para os maiores estoques de N no solo é sua adição por meio da simbiose entre as espécies leguminosas e as bactérias fixadoras de N (CAMELO *et al.*, 2021). Lira Junior *et al.* (2020) atribuíram o maior armazenamento de N no solo em sistemas silvipastoris com leguminosas arbóreas (*Gliricidia sepium* e *Mimosa caesalpiniaefolia*), que podem triplicar os estoques de N em comparação com capim-braquiária em monocultura, à presença de bactérias diazotróficas de vida livre e simbióticas (Barros *et al.*, 2018). Xavier *et al.* (2014), ao avaliaram a ciclagem de N no sistema de alta diversidade do presente estudo, estimaram que a entrada de N a partir de folhas senescentes de leguminosas variou entre 15,4 e 19,7 kg ha⁻¹ ano⁻¹. Essa quantidade adicional de N disponível, além de aumentar os estoques totais de N, contribuiu com maior produção de biomassa pela gramínea entre as faixas de árvores (Figura 2).

Os maiores estoques de TOC foram observados nas profundidades superficiais (até 0.30 m) e gradualmente diminuiu conforme a profundidade aumentou, variando de 48-63 %, distâncias 5 e 10 m, respectivamente no sistema de alta diversidade e 46-52 %, distâncias 5 e 15 m, respectivamente no sistema de baixa diversidade. Para o N total, esse comportamento foi mais evidente, em que os estoques na camada de 0.30 m (média das 4 distâncias) representaram 72 e 59 % do total, respectivamente, para os sistemas de alta e baixa diversidade de árvores. Portanto, tais resultados indicam que o N introduzido no sistema de alta diversidade pelas leguminosas, provavelmente através da fixação biológica de N, estava mais concentrado na camada superficial do solo e superou possíveis perdas por lixiviação. Segundo Lira Junior *et al.* (2020) a eficiência de armazenamento de N está fortemente relacionada à comunidade bacteriana específica que vive em solos de leguminosas consorciados com capim-braquiária.

O aumento significativo nos estoques de TOC, N total, C-MAOM e N-POM na camada de 0.0-1.0 m nas distâncias ≥ 10 m, em ambos os sistemas, pode estar associada a maior produção biomassa de forragem e maior deposição de serapilheira pelo capim-braquiária nos pontos mais distantes das árvores. Na mesma área do presente estudo, Paciullo *et al.* (2021) observaram que sombreamento reduziu a produção de forragem e pode ter promovido um desequilíbrio na assimilação de C e N, uma vez que a absorção de N excede as necessidades metabólicas da planta. Sob sombra, os processos fotossintéticos das gramíneas são alterados e há redução na assimilação de CO₂, conseqüentemente reduz a produção de caules e folhas (SANTIAGO-HERNÁNDEZ *et al.*, 2016). Como o crescimento do capim-braquiária é reduzido drasticamente sob baixa disponibilidade de luz (BAPTISTELLA *et al.*, 2020), o componente arbóreo proporcionou similaridades entre os SSPs até 5 m das faixas de árvores. Além disso, esses resultados podem ser justificados em função da estrutura das copas das espécies nos dois sistemas. No sistema de baixa diversidade a espécie arbórea (*Eucalyptus grandis*) possui copas cônicas que limita a área de sombreamento na faixa de pastagem até 5 m de distância. Já no sistema de alta diversidade, os arranjos de copas cônicas dos eucaliptos juntamente com copas arredondadas das leguminosas atingem influência de sombreamento próximo a 10 m, justificando assim, semelhanças entre os estoques de C até 5 m de distância da faixa de árvores. Santos *et al.* (2019) ao avaliaram os estoques de C do solo após a conversão da vegetação nativa em pastagens de *Urochloa brizantha* (cv. Arapoti e cv. Xaraés) verificaram que os estoques de TOC até 1.0 m de profundidade aumentaram em 20 Mg ha⁻¹ após 15 anos de implantação da pastagem. Portanto, a *Urochloa* produz grandes quantidades de biomassa e têm um sistema radicular vigoroso, abundante e profundo, o que não só protege o solo, mas também aumenta armazenamento de C (BAPTISTELLA *et al.*, 2020).

O reservatório de C lábil é uma fração do TOC com taxas de rotatividade mais rápidas, responsável por fornecer energia e C aos microrganismos do solo, portanto, influencia muito a ciclagem de nutrientes visando manter a qualidade do solo e sua produtividade (DATTA *et al.*, 2018; MANDAL *et al.*, 2007). Na camada de 0.0-1.0 m, os estoques de C lábil foram substancialmente mais altos no sistema de alta diversidade de árvores (média 13,07%) quando comparado ao de baixa diversidade (média de 8,45%). Em geral, a diversidade arbórea afetou significativamente os estoques de C lábil tanto em superfície como em subsuperfície. Por exemplo, na camada de 0.0-0.10 m, os valores de C lábil nas distâncias 0 e 5 m foram de 6.82 e 6.71 Mg ha⁻¹, respectivamente no sistema de alta diversidade de árvores, enquanto no sistema de baixa diversidade foram 1.43 e 3.45 Mg ha⁻¹, respectivamente. Esse mesmo comportamento

também foi observado na camada de 0.60-1.0 m, em que nestas mesmas distâncias os estoques de C lábil no sistema de alta diversidade de árvores (5.5 e 7.84 Mg ha⁻¹, respectivamente) mais do que triplicaram em comparação com o sistema de baixa diversidade (1.15 e 2.24 Mg ha⁻¹, respectivamente). O aumento do C lábil na superfície do solo pode estar relacionado à qualidade da biomassa de leguminosas depositada na serapilheira, que apresenta uma rápida taxa de decomposição (dados não avaliados) facilitando o acúmulo de C em formas orgânicas altamente lábeis. O aumento do C lábil nas camadas mais profundas do solo pode ser atribuído à liberação de compostos orgânicos de baixo peso molecular pelo sistema radicular das leguminosas (DHAKAL; ISLAM, 2018) que, devido à sua estrutura, é capaz de atingir as camadas mais profundas do solo (KUMAR *et al.*, 2018). Esta diferença significativa nos estoques de C lábil entre os dois sistemas indica que esta fração pode ser usada como um indicador sensível às alterações nas práticas de manejo em SSPs.

No geral, tanto os estoques de C lábil como não lábil foram superiores nas maiores distâncias (≥ 10 m) da faixa de árvore em ambos os sistemas. Possivelmente, nestas distâncias a radiação fotossintética ativa foi maior, propiciando aumento na produção de biomassa pela gramínea. Além disso, as entradas contínuas de C no solo pelas raízes mortas e exsudatos radiculares liberados pela gramínea, excedem a capacidade de decomposição dos microrganismos, resultando no acúmulo de frações do TOC menos humidificadas (BIELUCZYK *et al.*, 2020; BORDONAL *et al.*, 2017).

4.3 Relação carbono/nitrogênio

As mudanças distintas de C e N no perfil do solo foram refletidas na relação C/N de ambas as frações da MOS. A fração MAOM, comparado a POM, é dominada por compostos ricos em N de baixo peso molecular e, portanto, tende a ter uma relação C/N mais baixa (JILLING *et al.*, 2020). Os valores da relação C/N da MAOM variaram de 4,31-15,30 no sistema de alta diversidade e 4,79 a 18,96 na baixa diversidade. Altas quantidades de C-MAOM com baixa relação C/N em ambos os SSPs, sugerem uma estabilidade biogeoquímica bastante alta e baixa taxa de rotatividade do TOC (PUISSANT *et al.*, 2017). Na POM a relação C/N foi mais elevada e aumentou com a distância da faixa de árvores, especialmente no sistema de baixa diversidade. A alta relação C/N no sistema de baixa diversidade, principalmente nas distâncias 10 e 15 m da faixa de árvores, pode ser explicada pela maior relação C/N da serapilheira do capim-braquiária. Bretas *et al.* (2020), ao avaliaram a relação C/N da serapilheira de pastagem de capim-braquiária e de um SSP com *Acacia mangium* e *Eucalyptus*

grandis, no mesmo campo experimental do presente estudo, verificaram que a relação C/N da pastagem (45.08) era mais que o dobro do SSP (20.01). A maior relação C/N sob sistema de baixa diversidade de árvores em comparação com alta diversidade, tanto na POM quanto na MAOM (em algumas situações), de fato indica uma maior recalcitrância destas frações no sistema de baixa diversidade, consistente com sua origem de serapilheira.

4.4 Contribuição para matéria orgânica do solo pelos sistemas silvipastoris

Em ambos os SSPs, a origem do C orgânico mudou em função da distância da faixa de árvores (Figura 7). Os menores valores de $\delta^{13}\text{C}$ encontrados nas distâncias 0 e 5 m da faixa de árvores, especialmente no sistema de alta diversidade, composto *Eucalyptus grandis* e por quatro espécies de leguminosas, indicam a influência dos resíduos orgânicos das espécies arbóreas, uma vez que o $\delta^{13}\text{C}$ das plantas C3 varia entre 20 e 34 ‰ (DIEFENDORF *et al.*, 2010; MARTINELLI *et al.*, 1998).

A principal fonte de entrada de C para o solo, geralmente, é a biomassa da raiz, que é transformada em MOS pelos microrganismos (PROMMER *et al.*, 2020). Em comparação com árvores, as gramíneas geralmente desenvolvem sistemas radiculares superficiais ou, alternativamente, alocam a biomassa da raiz principal para as camadas superiores do solo, apesar que as raízes simples podem atingir profundidades superiores a 1.0 m (HAILE *et al.*, 2010). Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ mostraram uma tendência geralmente decrescente (tornam-se mais negativos) com a profundidade do solo, tanto para MAOM quanto MOP, ou seja, a contribuição da gramínea (C4) nas camadas subsuperficiais foi reduzida. O sistema radicular profundo do componente arbóreo tem maior probabilidade de aumentar a assinatura C3 ou diminuir (mais negativo) os valores de $\delta^{13}\text{C}$ com a profundidade, conforme observado também por Kramer e Gleixner (2008) e Haile *et al.* (2010).

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ menos negativos na camada superficial do solo (0.0-0.30 m) e na profundidade 0.0-1.0 m na distância 15 m no sistema de alta diversidade, em ambas as frações (MAOM e POM), sugerem que o capim-braquiária foi a principal fonte vegetal do TOC. Essa maior contribuição de C4 na distância de 15 m no sistema de alta diversidade pode ser explicada pela maior produção de biomassa/serapilheira neste sistema (Figura 2). O enriquecimento da camada superficial do solo devido ao estabelecimento de gramíneas também foi relatado por Sant-Anna *et al.* (2017). De acordo com Silva *et al.* (2013), as gramíneas podem

contribuir com até 50 % do C aportado ao solo anualmente, resultando em enriquecimento do $\delta^{13}\text{C}$. A quantificação da incorporação progressiva de um “novo C” nas frações orgânicas do solo fornece um meio poderoso para elucidar as vias de transformações e estabilizações de C (HAILE *et al.*, 2010). No entanto, é importante destacar que o método ^{13}C é incapaz de distinguir entre C residual da 'floresta primária' e o C derivado do componente de arbóreo no sistema silvipastoril (GILLSON *et al.*, 2004).

5 CONCLUSÕES

O presente estudo avaliou os estoques de C e N e a abundância natural de ^{13}C ($\delta^{13}\text{C}$) nas frações da MOS em até um metro de profundidade em sistema silvipastoris implantados com faixas de baixa e alta diversidade arbórea. Os resultados encontrados neste estudo, após 22 anos de implantação dos sistemas silvipastoris, confirmam que a diversidade do componente arbóreo e a distância da linha de plantio das árvores influenciam a deposição de serapilheira e os estoques de C e N do solo. Os estoques de C do solo aumentaram nas camadas superiores do solo, enquanto os estoques de N do solo aumentaram em todas as profundidades (até 1 m) no sistema de alta diversidade quando comparado ao de baixa diversidade arbórea, evidenciando que a introdução de espécies leguminosas no sistema silvipastoris foi uma estratégia eficiente para aumentar os estoques de C e N de pastagens, confirmando nossa hipótese.

A composição isotópica da matéria orgânica do solo próximo a faixa das árvores, especialmente no sistema de alta diversidade, composto *Eucalyptus grandis* e por quatro espécies de leguminosas indica um efeito diferencial dessas espécies. Além disso, constou-se maior contribuição da gramínea (C4) na distância de 15 m no sistema de alta diversidade, o que provavelmente está associado a maior deposição de serapilheira neste sistema. Portanto, recomenda-se o sistema silvipastoril composto por capim-braquiária consorciado com espécies arbóreas à base de leguminosas para armazenar C e principalmente N no solo e contribuir para o aumento da produtividade do sistema de produção, contribuindo para diminuir a expansão futura de extensas pastagens na Mata Atlântica.

REFERÊNCIAS

- ABIEC. **Perfil da Pecuária no Brasil**. São Paulo, 2019.
- ALMEIDA, Luana Larrisa de Souza *et al.* Soil carbon and nitrogen stocks and the quality of soil organic matter under silvopastoral systems in the Brazilian Cerrado. **Soil And Tillage Research**, [s.l.], v. 205, p. 104785, jan. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2020.104785>.
- ALVAREZ, V. V. H. *et al.* Determinação e uso do fósforo remanescente. **Bol. Inf.** p. 25, 27–33, 2000.
- ALVAREZ, V. V. H.; ALVAREZ, G. A. M. Reflexões sobre a utilização de estatística para pesquisa em ciência do solo. **Bol. Inf. da Soc. Bras. Ciência do Solo**, n. 38, p. 28–35, 2013
- APOLINÁRIO, Valéria X. O. *et al.* Tree Legumes Provide Marketable Wood and Add Nitrogen in Warm - Climate Silvopasture Systems. **Agronomy Journal**, [s.l.], v. 107, n. 5, p. 1915-1921, set. 2015. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj14.0624>.
- BAHAMONDE, Héctor A. *et al.* Litter decomposition and nutrients dynamics in Nothofagus antarctica forests under silvopastoral use in Southern Patagonia. **Agroforestry Systems**, [S.L.], v. 84, n. 3, p. 345-360, 24 jan. 2012. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-012-9479-7>.
- BAPTISTELLA, J. L. C. *et al.* Urochloa in Tropical Agroecosystems. **Frontiers from Sustainable Food System**. v. 4, p. 1–17, 2020. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00119>
- BECKERT, Marvin R. *et al.* Soil and tree biomass carbon sequestration potential of silvopastoral and woodland-pasture systems in North East Scotland. **Agroforestry Systems**, [s.l.], v. 90, n. 3, p. 371-383, 31 out. 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-015-9860-4>.
- BIELUCZYK, Wanderlei *et al.* Integrated farming systems influence soil organic matter dynamics in southeastern Brazil. **Geoderma**, [s.l.], v. 371, p. 114368, jul. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114368>.
- BLAIR, G. J.; LEFROY, R. D. B.; LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. **Australian Journal Of Agricultural Research**, [s.l.], v. 46, n. 7, p. 1459, 1995. CSIRO Publishing. <http://dx.doi.org/10.1071/ar9951459>.
- BORDONAL, Ricardo de Oliveira *et al.* Changes in quantity and quality of soil carbon due to the land-use conversion to sugarcane (*Saccharum officinarum*) plantation in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s.l.], v. 240, p. 54-65, mar. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.016>.
- BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. **Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima-PNMC e dá outras providências**. Diário Oficial da União, Seção 1, Edição Extra, p. 109-110, 2009. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/clima/politica-nacional-sobre-mudanca-do-clima>. Acesso em: 13 ago. 2021.

- BRETAS, Igor L. *et al.* Nitrous oxide, methane, and ammonia emissions from cattle excreta on *Brachiaria decumbens* growing in monoculture or silvopasture with *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis*. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s.l.], v. 295, p. 106896, jun. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2020.106896>.
- CALZADA BENZA, J. **Metodos estadisticos para la investigacion**. 1964.
- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate Soil Organic - Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. **Soil Science Society Of America Journal**, [s.l.], v. 56, n. 3, p. 777-783, maio 1992. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>.
- CAMELO, Dayanne *et al.* Soil Microbial Activity and Biomass in Semiarid Agroforestry Systems Integrating Forage Cactus and Tree Legumes. **Agronomy**, [s.l.], v. 11, n. 8, p. 1558, 5 ago. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy11081558>.
- CARDINAEL, Rémi *et al.* Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: a survey of six different sites in france. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s.l.], v. 236, p. 243-255, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.011>.
- CHAPIN, F. S.; MATSON, P. A.; VITOUSEK, P. M. **Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology**. New York: Springer, 2011.
- DATTA, Ashim *et al.* Interrelationship of biomass yield, carbon input, aggregation, carbon pools and its sequestration in Vertisols under long-term sorghum-wheat cropping system in semi-arid tropics. **Soil And Tillage Research**, [s.l.], v. 184, p. 164-175, dez. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2018.07.004>.
- DHAKAL, Dhruva; ISLAM, M. Grass-Legume Mixtures for Improved Soil Health in Cultivated Agroecosystem. **Sustainability**, [s.l.], v. 10, n. 8, p. 2718, 2 ago. 2018. <http://dx.doi.org/10.3390/su10082718>.
- DIEFENDORF, A. F. *et al.* Global patterns in leaf ^{13}C discrimination and implications for studies of past and future climate. **Proceedings Of The National Academy Of Sciences**, [s.l.], v. 107, n. 13, p. 5738-5743, 15 mar. 2010. Proceedings of the National Academy of Sciences. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0910513107>.
- ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal Of Soil Science**, [s.l.], v. 75, n. 4, p. 529-538, 1 nov. 1995. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.4141/cjss95-075>.
- EMBRAPA. **Brazilian Soil Classification System**. 5 ed. Brasília: EMBRAPA, 2018.
- GILLSON, L.; WALDRON, S.; WILLIS, K. J. Interpretation of soil $\delta^{13}\text{C}$ as an indicator of vegetation change in African savannas. **Journal Of Vegetation Science**, [s.l.], v. 15, n. 3, p. 339-350, 24 fev. 2004. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1654-1103.2004.tb02270.x>.
- HAILE, Solomon G.; NAIR, Vimala D.; NAIR, P. K. Ramachandran. Contribution of trees to carbon storage in soils of silvopastoral systems in Florida, USA. **Global Change Biology**, [s.l.], v. 16, n. 1, p. 427-438, jan. 2010. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01981.x>.

INAES. **Estado da arte das pastagens em minas gerais**. Belo Horizonte, 2015.

JILLING, Andrea *et al.* Rapid and distinct responses of particulate and mineral-associated organic nitrogen to conservation tillage and cover crops. **Geoderma**, [s.l.], v. 359, p. 114001, fev. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114001>.

KRAMER, Christiane; GLEIXNER, Gerd. Soil organic matter in soil depth profiles: distinct carbon preferences of microbial groups during carbon transformation. **Soil Biology And Biochemistry**, [s.l.], v. 40, n. 2, p. 425-433, fev. 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.09.016>.

KUMAR, S. *et al.*, 2018. Role of Legumes in Soil Carbon Sequestration. *In*: MEENA, R. S. *et al* (eds.). **Legumes for Soil Health and Sustainable Management**. Cingapura: Springer Singapore, p. 109 - 138, 2018.

LANDHOLM, David M *et al.* Reducing deforestation and improving livestock productivity: greenhouse gas mitigation potential of silvopastoral systems in caquetá. **Environmental Research Letters**, [s.l.], v. 14, n. 11, p. 114007, 22 out. 2019. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ab3db6>.

LEÓN, Juan D.; OSORIO, Nelson W. Role of Litter Turnover in Soil Quality in Tropical Degraded Lands of Colombia. **The Scientific World Journal**, [s.l.], v. 2014, p. 1-11, 2014. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/693981>.

LIM, Sang-Sun *et al.* Soil organic carbon stocks in three Canadian agroforestry systems: from surface organic to deeper mineral soils. **Forest Ecology And Management**, [s.l.], v. 417, p. 103-109, maio 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2018.02.050>.

LIRA JUNIOR, Mario Andrade *et al.* Legume-based silvopastoral systems drive C and N soil stocks in a subhumid tropical environment. **Catena**, [s.l.], v. 189, p. 104508, jun. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2020.104508>.

LOPES, Clenardo Macedo *et al.* Plant morphology and herbage accumulation of signal grass with or without fertilization, under different light regimes. **Ciência Rural**, [s.l.], v. 47, n. 2, p. 1-7, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20160472>.

MANDAL, B. *et al.* The potential of cropping systems and soil amendments for carbon sequestration in soils under long-term experiments in subtropical India. **Global Change Biology**, [s.l.], v. 13, n. 2, p. 357-369, fev. 2007. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01309.x>.

MANZATTO, C. V. *et al.* **Mitigação das emissões de Gases de Efeitos Estufa pela adoção das tecnologias do Plano ABC**: estimativas parciais. Embrapa Meio Ambiente, 2020.

MARTINELLI, L. A. *et al.* Stable carbon isotope ratio of tree leaves, boles and fine litter in a tropical forest in Rondônia, Brazil. **Oecologia**, [s.l.], v. 114, n. 2, p. 170-179, 1 abr. 1998. <http://dx.doi.org/10.1007/s004420050433>.

MOURA, André Morais *et al.* Nutritive value and in vitro methane production of *Urochloa brizantha* cv. Marandu under fixed time or variable stocking cycles. **Grass And Forage Science**, [s.l.], v. 76, n. 3, p. 427-439, 12 jan. 2021. <http://dx.doi.org/10.1111/gfs.12509>.

MYERS, Norman *et al.* Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, [s.l.], v. 403, n. 6772, p. 853-858, fev. 2000. <http://dx.doi.org/10.1038/35002501>.

PACIULLO, Domingos S.C. *et al.* Pasture and animal production in silvopastoral and open pasture systems managed with crossbred dairy heifers. **Livestock Science**, [s.l.], v. 245, p. 104426, mar. 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104426>.

PIERISTÈ, Marta *et al.* Solar UV-A radiation and blue light enhance tree leaf litter decomposition in a temperate forest. **Oecologia**, [s.l.], v. 191, n. 1, p. 191-203, 30 jul. 2019. <http://dx.doi.org/10.1007/s00442-019-04478-x>.

PROMMER, Judith *et al.* Increased microbial growth, biomass, and turnover drive soil organic carbon accumulation at higher plant diversity. **Global Change Biology**, [s.l.], v. 26, n. 2, p. 669-681, 28 ago. 2019. <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.14777>.

PUISSANT, Jérémy *et al.* Climate change effects on the stability and chemistry of soil organic carbon pools in a subalpine grassland. **Biogeochemistry**, [s.l.], v. 132, n. 1-2, p. 123-139, jan. 2017. <http://dx.doi.org/10.1007/s10533-016-0291-8>.

RADOMSKI, Maria Izabel; RIBASKI, Jorge. Fertilidade do solo e produtividade da pastagem em sistema silvipastoril com *Grevillea robusta*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, [s.l.], v. 32, n. 69, p. 53-62, 30 mar. 2012. <http://dx.doi.org/10.4336/2012.pfb.32.69.53>.

REZENDE, C. L. *et al.* From hotspot to hopespot: an opportunity for the brazilian atlantic forest. **Perspectives In Ecology and Conservation**, [s.l.], v. 16, n. 4, p. 208-214, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecon.2018.10.002>.

RUIZ, Hugo Alberto. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (Silte + Argila). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 29, n. 2, p. 297-300, abr. 2005. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832005000200015>.

SANDERMAN, Jonathan; HENGL, Tomislav; FISKE, Gregory J. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. **Proceedings Of The National Academy Of Sciences**, [s.l.], v. 114, n. 36, p. 9575-9580, 21 ago. 2017. Proceedings of the National Academy of Sciences. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1706103114>.

SANT-ANNA, Selenobaldo A. C. de *et al.* Changes in soil organic carbon during 22 years of pastures, cropping or integrated crop/livestock systems in the Brazilian Cerrado. **Nutrient Cycling In Agroecosystems**, [s.l.], v. 108, n. 1, p. 101-120, 9 dez. 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/s10705-016-9812-z>.

SANTIAGO-HERNÁNDEZ, Francisco *et al.* Physiological and production responses of four grasses from the genera *Urochloa* and *Megathyrsus* to shade from *Melia azedarach* L. **Agroforestry Systems**, [s.l.], v. 90, n. 2, p. 339-349, 10 out. 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-015-9858-y>.

SILVA, Vinicius Evangelista *et al.* Composição lignocelulósica e isotópica da vegetação e da matéria orgânica do solo de uma turfeira tropical: i - composição florística, fitomassa e acúmulo de carbono. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 37, n. 1, p. 121-133, fev. 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832013000100013>.

TEDESCO, H. J.; VOLKWEISS, S. J.; BOHNEN, H. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1985.

TEIXEIRA, Paulo César *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília: Embrapa Solos, 2017.

UPSON, M.A.; BURGESS, P.J.; MORISON, J. I. L. Soil carbon changes after establishing woodland and agroforestry trees in a grazed pasture. **Geoderma**, [s.l.], v. 283, p. 10-20, dez. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.002>.

VARSHA, K. M. *et al.* High density silvopasture systems for quality forage production and carbon sequestration in humid tropics of Southern India. **Agroforestry Systems**, [s.l.], v. 93, n. 1, p. 185-198, 3 jan. 2017. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-016-0059-0>.

VITORELLO, V. A. *et al.* Organic Matter and Natural Carbon-13 Distribution in Forested and Cultivated Oxisols. **Soil Science Society Of America Journal**, [s.l.], v. 53, n. 3, p. 773-778, maio 1989. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300030024x>.

WANG, Q. *et al.* Changes in carbon and nitrogen of Chernozem soil along a cultivation chronosequence in a semi-arid grassland. **European Journal Of Soil Science**, [s.l.], v. 60, n. 6, p. 916-923, 11 set. 2009. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01174.x>.

XAVIER, Deise F. *et al.* Nitrogen cycling in a Brachiaria-based silvopastoral system in the Atlantic forest region of Minas Gerais, Brazil. **Nutrient Cycling In Agroecosystems**, [s.l.], v. 99, n. 1-3, p. 45-62, 16 maio 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10705-014-9617-x>.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications In Soil Science And Plant Analysis**, [s.l.], v. 19, n. 13, p. 1467-1476, out. 1988. <http://dx.doi.org/10.1080/00103628809368027>.