

NAIARA OLIVEIRA FIGUEIREDO

**CAFEZAIS MANEJADOS SOB OS PRINCÍPIOS DA AGRICULTURA
NATURAL: APORTE DE NUTRIENTES, FORMAÇÃO E COMPOSIÇÃO DA
MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientadora: Emanuelle Mercês Barros Soares

Coorientadores: Irene Maria Cardoso

Rafael da Silva Teixeira

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

F475c Figueiredo, Naiara Oliveira, 1994-
2023 Cafezais manejados sob os princípios da agricultura natural:
aporte de nutrientes, formação e composição da matéria orgânica
do solo / Naiara Oliveira Figueiredo. – Viçosa, MG, 2023.
1 tese eletrônica (125 f.): il. (algumas color.).

Inclui anexos.

Orientador: Emanuelle Mercês Barros Soares.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Centro
de Ciências Agrárias, 2023.

Referências bibliográficas: f. 41-49.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.153>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Agricultura orgânica. 2. Cafeicultura. 3. Nutrientes.
4. Matéria orgânica do solo . I. Soares, Emanuelle Mercês,
1979-. II. Universidade Federal de Viçosa. Centro de Ciências
Agrárias. Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas. III. Título.

CDD 22. ed. 633.73

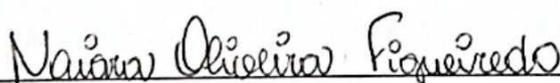
NAIARA OLIVEIRA FIGUEIREDO

**CAFEZAIS MANEJADOS SOB OS PRINCÍPIOS DA AGRICULTURA
NATURAL: APORTE DE NUTRIENTES, FORMAÇÃO E COMPOSIÇÃO DA
MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

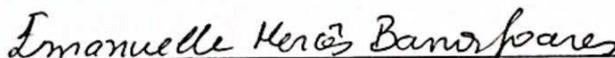
APROVADA: 21 de dezembro de 2023.

Assentimento:



Naiara Oliveira Figueiredo

Autora



Emanuelle Mercês Barros Soares

Orientadora

Dedico este trabalho a minha mãe, agricultora e maior apoiadora desta trajetória.

AGRADECIMENTOS

Com imensa gratidão em meu coração, elevo minha voz em louvor a Deus e ao universo, que generosamente permitiram que eu trilhasse este caminho. Por Ele e para Ele são todas as coisas.

Àqueles que foram a minha âncora, meus pais, Maria de Lourdes e Juarez, minhas fontes de inspiração e exemplo de resiliência diante das adversidades. Ao meu amado irmão Romário, e à doce Hannah, minha sobrinha, e aos tios e primos que estenderam suas mãos em apoio durante esta jornada desafiadora.

Ao meu noivo, Henderson, que com amor e apoio inabaláveis, foi meu porto seguro nos momentos mais turbulentos, permitindo-me perseverar sem jamais desistir.

Aos amigos que a vida me presenteou, mesmo quando a distância ou os desafios do cotidiano nos afastavam fisicamente, vocês permaneceram sempre presentes em meu coração. Edna, Daniella, Monalisa, suas mãos foram as que me seguraram, seus conselhos me ergueram. Amo-as profundamente.

À minha orientadora, Emanuelle, pela paciência e dedicação incansáveis, mesmo diante das dificuldades.

Ao meu coorientador, Rafael, por suas valiosas contribuições ao longo desta pesquisa.

A minha coorientadora Irene, grande exemplo de mulher pesquisadora na Agroecologia. Minha imensa gratidão pelo exemplo, pela dedicação nesses anos e principalmente por tornar essa pesquisa possível.

Agradeço ao Departamento de Solos pela infraestrutura e suporte essenciais para a realização deste trabalho. Ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, pelo apoio contínuo e prontidão em resolver os desafios que surgiram.

Ao professor Teogenes e à Paloma do Laboratório de Matéria Orgânica e Resíduos, pela colaboração e apoio fundamentais durante todo o desenvolvimento da pesquisa.

Aos técnicos do Laboratório de Física do Solo, Fertilidade do Solo e do Laboratório de Isótopos Estáveis, pelo suporte imprescindível fornecido.

Minha gratidão ao agricultor Edmar e seu filho Pedro Lucas de Araponga, por sua hospitalidade e disposição em auxiliar nas coletas, sempre animados com nossa presença.

Aos amigos e colegas de laboratório, Hugo, Neilson, Jônatas, Cintia, David, Peola e Vanessa, pela dedicação e apoio incansáveis na conclusão deste trabalho, e pela amizade construída ao longo dos anos.

Às minhas queridas amigas, Sara, Nancy, Fernanda e Clara, companheiras de jornada e desafios, cujo apoio mútuo foi fundamental para superarmos os obstáculos ao longo dos oito semestres de doutorado.

À Universidade Federal de Viçosa, por seu compromisso com o ensino de excelência e sua contribuição para a educação de qualidade em nosso país.

À CAPES, pelo investimento na pesquisa nacional e pela oportunidade concedida através da bolsa de estudo. Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

À gestão Lula-Dilma, que, através de várias políticas me permitiu ocupar este espaço.

Aos membros da banca examinadora, por sua disposição em avaliar este trabalho e por suas valiosas contribuições.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, minha eterna gratidão.

“Desistir? Eu já pensei seriamente nisso, mas nunca me levei realmente a sério. É que tem mais chão nos meus olhos do que cansaço nas minhas pernas, mais esperança nos meus passos do que tristeza nos meus ombros, mais estrada no meu coração do que medo na minha cabeça.”

- Cora Coralina

RESUMO GERAL

FIGUEIREDO, Naiara Oliveira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2023. **Cafezais manejados sob os princípios da agricultura natural: aporte de nutrientes, formação e composição da matéria orgânica do solo.** Orientadora: Emanuelle Mercês Barros Soares. Coorientadores: Irene Maria Cardoso e Rafael da Silva Teixeira.

A matéria orgânica do solo (MOS) desempenha relevante papel, em âmbito global por representar uma importante fonte armazenadora de C, e localmente em razão dos atributos do solo por ela influenciados. Sistemas conduzidos sob manejo agroecológico preconizam a conservação do solo, a manutenção da diversidade vegetal e biológica das áreas, contribuindo para estabilidade da MOS. Nesse contexto, a quantidade e composição bioquímica dos resíduos vegetais depositados na área desempenham um papel crucial nas transformações da MOS e suas frações. Desse modo, o objetivo geral deste estudo foi analisar o manejo da propriedade, a influência da aplicação de diferentes resíduos vegetais no aporte de nutrientes e na formação e composição da matéria orgânica do solo durante a transição agroecológica. Portanto, no capítulo 1 foi realizada a sistematização acerca do processo de transição agroecológica da propriedade. No capítulo 2, foi avaliado a composição bioquímica, dinâmica da decomposição e mineralização de nutrientes a partir de resíduos utilizados como fonte de adubação na propriedade. Para estudar a contribuição destes resíduos na composição molecular da MOS foi realizado a termoquimólise de amostras dos solos, de áreas de café em diferentes épocas de transição para o manejo sob os princípios da agricultura natural, apresentado no capítulo 3. Essas áreas de café estão localizadas no Sítio Pedra Redonda em Araçuaia-MG. O sítio possui 12 hectares distribuídos em nove talhões que são consorciados com árvores nativas, frutíferas e espécies anuais para consumo familiar e geração de renda. A sistematização foi realizada a partir de visitas e caminhadas transversais, além do uso da matriz de sistematização para compilar dados coletados e dados secundários. Para avaliar a dinâmica de decomposição dos resíduos vegetais, um experimento foi montado em condições controladas pelo período de seis meses. Análises foram realizadas ao longo do tempo para verificar a quantidade liberada de nutrientes, a taxa de decomposição e contribuição para as frações da matéria orgânica do solo. A caracterização da MOS foi feita por fracionamento físico, determinando-se as frações MOP e MOAM. A partir destas, foi feita a determinação dos teores de C, N, razão C/N e DSC. Para caracterizar bioquimicamente a MOS presente nessas frações e na vegetação, foi realizada análise de termoquimólise com identificação dos compostos por GC/MS com objetivo de analisar se há correlação entre a composição desses vegetais e a composição bioquímica da MOS. Em vinte anos de transição o agricultor alcançou um nível considerado de sucesso no processo de conservação de agroecossistemas, pois trabalha potencializando os processos ecológicos, não dependendo em nenhum momento de insumos externos e principalmente a partir da mão de obra familiar. A análise revelou uma maior liberação de nutrientes em solos de 0-20cm, influenciada pelo tempo de incubação e composição dos resíduos. Variações na saturação de carbono afetaram apenas a liberação de nitrogênio. Amendoim forrageiro e bananeira contribuíram significativamente para a mineralização de N, P, K e

Ca, enquanto o tambu se destacou para Mg. A serapilheira mostrou menor mineralização, indicando possível imobilização de nutrientes. Solos sem resíduos apresentaram redução nos teores de C-MOP, C-MOAM e N-MOP. Nas áreas de Agricultura Natural com maior tempo de manejo (9 e 5 anos), os teores de C-MOP, C-MOAM, N-MOP e N-MOAM na entrelinha assemelham-se à vegetação natural. A entrelinha é comumente usada para manejo de resíduos, exceto no talhão Araras (1 ano), onde são aplicados diretamente na linha. Essa diferença reflete-se na composição molecular da matéria orgânica, indicando que os compostos nas áreas mais cultivadas se aproximam mais da vegetação natural.

Palavras-chave: Agroecologia. Ciclagem de nutrientes. Decomposição. Manejo de resíduos. TMAH-GC-MS.

GENERAL ABSTRACT

FIGUEIREDO, Naiara Oliveira, D.Sc., Federal University of Viçosa, December, 2023. **Coffee plantations managed under the principles of natural agriculture: Nutrient input, formation, and composition of soil organic matter.** Advisor: Emanuelle Mercês Barros Soares. Co-advisors: Irene Maria Cardoso and Rafael da Silva Teixeira.

Soil organic matter (SOM) plays a significant role globally as an important carbon storage source, and locally due to its influence on soil attributes. Systems managed under agroecological practices advocate soil conservation and the maintenance of plant and biological diversity, contributing to SOM stability. In this context, the quantity and biochemical composition of plant residues deposited in the area plays a crucial role in SOM transformations and their fractions. Thus, the general objective of this study was to analyze farm management, the influence of applying different plant residues on nutrient input, and the formation and composition of soil organic matter during the agroecological transition. Therefore, Chapter 1 systematized the agroecological transition process of the farm. In Chapter 2, the biochemical composition, decomposition dynamics, and nutrient mineralization from residues used as fertilization sources on the farm were evaluated. To study the contribution of these residues to the molecular composition of SOM, soil samples from coffee areas at different stages of transition to management under the principles of natural agriculture were subjected to thermochemolysis, as presented in Chapter 3. These coffee areas are located at Sitio Pedra Redonda in Araponga, MG. The site has 12 hectares distributed in nine plots intercropped with native trees, fruit trees, and annual species for family consumption and income generation. Systematization was carried out through visits, transect walks, and the use of a systematization matrix to compile collected and secondary data. To assess the decomposition dynamics of plant residues, an experiment was set up under controlled conditions for six months. Analyses were conducted over time to verify the amount of released nutrients, decomposition rate, and contribution to soil organic matter fractions. SOM characterization was performed by physical fractionation, determining MOP and MOAM fractions. From these, C, N, C/N ratio, and DSC contents were determined. To biochemically characterize SOM present in these fractions and vegetation, thermochemolysis analysis was performed with compound identification by GC/MS to analyze if there is a correlation between the composition of these plants and the biochemical composition of SOM. In twenty years of transition, the farmer achieved a level of success considered in the conservation process of agroecosystems, as he works by enhancing ecological processes, not relying at any time on external inputs, and mainly based on family labor. The analysis revealed a greater release of nutrients in soils from 0-20 cm, influenced by incubation time and residue composition. Variations in carbon saturation affected only nitrogen release. Forage peanut and banana significantly contributed to the mineralization of N, P, K, and Ca, while elephant grass stood out for Mg. The litter showed lower mineralization, indicating possible nutrient immobilization. Soils without residues showed reductions in C-MOP, C-MOAM, and N-MOP contents. In Natural Agriculture areas with longer management time (9 and 5 years), C-MOP, C-MOAM, N-MOP, and N-MOAM contents in the interrows resembled natural vegetation. Interrows are commonly used for residue management, except in the Araras plot (1 year), where residues are applied directly to the row. This difference is reflected in the molecular composition of organic matter, indicating that compounds in more cultivated areas resemble natural vegetation more closely.

Keywords: agroecology. nutrient cycling. decomposition. residue management. TMAH-GC-MS.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	12
CAPÍTULO 1: TRANSIÇÃO AGROECOLÓGICA EM CAFEZAIS MANEJADOS SOB OS PRINCÍPIOS DA AGRICULTURA NATURAL	17
RESUMO	18
ABSTRACT	19
INTRODUÇÃO.....	20
METODOLOGIA.....	21
RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
REFERÊNCIAS	43
CAPÍTULO 2: MATERIAIS VEGETAIS CONTRIBUEM DE FORMA DISTINTA PARA A FORMAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA E LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES EM SOLOS SOB MANEJO SEGUINDO OS PRINCÍPIOS DA AGRICULTURA NATURAL	51
RESUMO	52
ABSTRACT	53
INTRODUÇÃO.....	54
METODOLOGIA.....	58
RESULTADOS	65
DISCUSSÃO.....	75
CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
REFERÊNCIAS	83
CAPÍTULO 3: MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO: QUANTIDADE, QUALIDADE E DÉFICIT DE SATURAÇÃO EM CAFEZAIS MANEJADOS SOB OS PRINCÍPIOS DA AGRICULTURA NATURAL	95
RESUMO	96
ABSTRACT	97
INTRODUÇÃO.....	98
METODOLOGIA.....	101
RESULTADOS	109
DISCUSSÃO.....	114
CONSIDERAÇÕES FINAIS	117
REFERÊNCIAS	118
COSIDERAÇÕES FINAIS.....	125

INTRODUÇÃO GERAL

A agricultura sempre representou um setor importante da sociedade, e a partir do aumento significativo na população entre 1940 e 1960 “avanços tecnológicos” foram implantados para “aumentar a produtividade”, tornando muitas propriedades dependentes de insumos externos como os fertilizantes (ROCKSTROM et al., 2019). Práticas inadequadas para a implantação de novas áreas, e de manejo do solo e das culturas, como o desmatamento, o uso de mecanização intensiva e o uso de agrotóxicos, podem levar a redução ou perda da capacidade produtiva do solo, perda da biodiversidade, desertificação, erosão e contaminação química (FOLEY et al., 2011; BARBOZA et al., 2012). Portanto, a obtenção de áreas produtivas de imediato pode resultar em problemas econômicos e ambientais ao longo do tempo (ABRAMOVAY, 2021).

Por outro lado, existem sistemas de produção mais próximos aos ecossistemas naturais. Nestes sistemas esforços são feitos para implementar agroecossistemas, que possibilitem a adequada manutenção da Matéria Orgânica do Solo (MOS) e com a biodiversidade. Para tanto, manejos que propiciem a fertilidade do solo resultante de processos biológicos são adotados a partir do desenho de agroecossistemas diversificados, como proposto pela agroecologia (FEIDEN, 2005; ALTIERI, 2012).

Estudos conduzidos nos agroecossistemas sob manejo agroecológico demonstram que há conservação de MOS (SOUZA et al., 2012), aumento da diversidade microbiana (CARDOSO et al., 2003; PRATES JÚNIOR et al., 2019; JÚNIOR et al., 2021) preservação da biodiversidade (TEIXEIRA et al., 2021), mitigação dos impactos das mudanças climáticas (SOUZA et al., 2012; GOMES et al., 2020) sem a diminuição da produtividade (SOUZA et al., 2010; LOPES et al., 2012). Na gestão destes agroecossistemas, estratégias saudáveis de manejo do solo são adotadas, em geral, em propriedades da agricultura familiar onde o trabalho é realizado especialmente pela mão de obra familiar. Nestas propriedades o cuidado com a terra não tem objetivo apenas econômico, mas também de produção de alimentos para a soberania alimentar da família e de cuidados com os recursos naturais, para que eles sejam conservados para a geração futura (PLOEG, 2009; PLOEG, 2014).

No cuidado com os solos, as famílias adotam e desenvolvem técnicas que seguem os princípios da agroecologia, dentre elas as práticas propostas pela agricultura natural. A agricultura natural foi desenvolvida por Mokiti Okada, que propõe um cultivo natural de alimentos em harmonia com o ambiente promovendo a saúde de todos os seres, com ênfase na espiritualidade (FUKUOKA, 1995). Essa dimensão espiritual marca

profundamente a identidade e a trajetória de desenvolvimento dessa abordagem agrícola. A expressão "agricultura natural" é a tradução latina de "shizen nôhô", em que "shizen" (natural) está associado a conceitos como "espontaneidade", "ser de si mesmo" ou "sem agir". Na abordagem de Mokiti Okada, "natural" significa otimizar os processos naturais com o mínimo gasto de energia, pois acredita-se que apenas os resíduos vegetais são suficientes para suprir as necessidades do solo. Não revolve o solo, não usa de agrotóxicos e não faz capina com objetivo de eliminar as plantas espontâneas, pois o foco é aproveitar a biomassa vegetal do local (FUKUOKA, 1995; ASSIS, 2005; BLANC & MARQUES, 2022).

Em Minas Gerais, o município de Araponga destaca-se pelas expressivas áreas cultivadas sob manejo agroecológico. Neste município, foram implantados Sistemas Agroflorestais (SAFs) na década de 90, em um processo de experimentação participativa, com o objetivo de melhorar a qualidade do solo, diversificar a produção e reduzir os custos e o impacto da bienalidade do café (CARDOSO et al., 2001). A partir dessa experiência muitas famílias priorizaram o manejo agroecológico e orgânico de suas propriedades e se preocuparam cada vez mais com a saúde do solo e dos cultivos. Nesse manejo, o material orgânico é incorporado com objetivo de estabilizar a temperatura, manter a umidade, e aumentar a atividade biológica, importante para toda a saúde do agroecossistemas, que se reflete, por exemplo, na baixa ocorrência de pragas e doenças nos cultivares e pelas boas colheitas (de JESUS et al., 2022).

A entrada constante de materiais orgânicos nesses sistemas, é a fonte primária de Carbono (C) para a formação da MOS, os materiais adicionados, e oriundos da parte aérea e das raízes das plantas tem papel fundamental na manutenção e melhoria das características físicas, químicas e biológicas do solo (CONTRUFO & LAVALLEE, 2022). A implementação de um manejo adequado dos resíduos vegetais é essencial para garantir que todos os benefícios decorrentes do uso desses materiais auxiliem positivamente no solo, promovendo assim, práticas agrícolas sustentáveis. Portanto, a compreensão dos processos de manejo das plantas e material orgânico em uma propriedade manejada segundo os princípios da agricultura natural, pode contribuir para estilos de agriculturas que não degradam os solos e que conservam os agroecossistemas.

A presente tese foi organizada em três capítulos. O primeiro capítulo teve como objetivo principal sistematizar as informações sobre o manejo da propriedade em transição agroecológica. O segundo capítulo teve como objetivo avaliar o potencial de materiais vegetais, com distintas composições bioquímicas, na liberação de nutrientes e

na formação da MOS, em distintas situações de déficit de C inicial dos solos. E o terceiro capítulo teve por objetivo avaliar as mudanças na quantidade e qualidade da MOS em lavouras de café, em transição para manejo sob os princípios da agricultura natural.

REFERÊNCIAS

- ABRAMOVAY, R. Desafios para o sistema alimentar global. **Ciência e Cultura**, v. 73, n. 1, p. 53-57, 2021
- ALTIERI, M. A. **Agroecologia: bases científicas para uma agricultura sustentável**. Rio de Janeiro: AS-PTA, 2012.
- ASSIS R L. de. **Agricultura orgânica e agroecologia: questões conceituais e processo de conversão**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2005. 35 p. (Embrapa Agrobiologia. Documentos, 196)
- BARBOZA, L.G.A.; THOMÉ, H.V.; RATZ, R.J.; MORAES, A.J. Para além do discurso ambientalista: percepções, práticas e perspectivas da agricultura agroecológica. **Ambiência, Guarapuava**, v.8, n.2, p.389-401, 2012.
- BLANC, J.; MARQUES, P. E. M. A Agricultura Natural de Mokiti Okada: uma experimentação moral e política como fonte de inovação de ordem ecológica. **Estudos Sociedade e Agricultura**, v. 30, n. 1, p. e2230104-e2230104, 2022.
- CARDOSO I.M, BODDINGTON C, JANSSEN BH, OENEMA O, KUYPER W, KUYPER TW. Distribution of mycorrhizal fungal spores in soils under agroforestry and monocultural coffee systems in Brazil. **Agrofor Syst**. 2003; 58: 33–43.
- CARDOSO, I.M. GUIJT, I. FRANCO, F.S. CARVALHO, A.F. e FERREIRA NETO, P.S. Continual Learning for Agroforestry System Design: University, NGO and farmer partnership in Minas Gerais, Brazil. **Agricultural Systems**, v.69, p.235-257, 2001.
- FEIDEN, A. Agroecologia: introdução e conceitos. In: AQUINO, A. M.; ASSIS, R. L. (Org.). **Agroecologia: princípios e técnicas para uma agricultura orgânica sustentável**. v. 1. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, p.49-70, 2005.
- FOLEY, J.A.; RAMANKUTTY, N.; BRAUMAN, K.A.; CASSIDY, E.S.; GERBER, J.S.; JOHNSTON, M.; MUELLER, N.D.; O'CONNELL, C.; RAY, D.K.; WEST, P.C.; BALZER, C.; BENNETT, E.M.; CARPENTER, S.R.; HILL, J.; MONFREDA, C.; POLASKY, S.; ROCKSTROM, J.; SHEEHAN, J.; SIEBERT, S.; TILMAN, D.; ZAKS, D.P.M. Solutions for a cultivated planet. **Nature**, Londres, v.478, p.337-342, 2011.
- FUKUOKA, M. **Agricultura Natural: teoria e prática da filosofia verde**. Nobel, 1995.
- GAMA-RODRIGUES, A. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; BARROS, N. F. Balanço de carbono e nutrientes em plantio puro e misto de espécies florestais nativas no sudeste da Bahia. **Revista Brasileira Ciência do Solo**. v. 32, n. 3, p. 1165-1179, 2008
- GOMES, L. C., BIANCHI, F. J. J. A., CARDOSO, I. M., FERNANDES, R. B. A., FERNANDES FILHO, E. I., & SCHULTE, R. P. O. (2020). Agroforestry systems can

mitigate the impacts of climate change on coffee production: a spatially explicit assessment in Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 294, 106858.

JÚNIOR, J. V., PEREIRA, R. C., SOTO, R. L., CARDOSO, I. M., MONDINO, E. A., BERBARA, R. L. L., & MENDONÇA, E. S. (2021). Organic fertilization influences nematode diversity and maturity index in coffee tree plantations using an agroforestry system. **Journal of nematology**, 53(1), 1-13.

LOPES, P. R. (2012). Producing agroecological coffee in Southern Minas Gerais: alternative systems for inten. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Pelotas, 7(1), 25-38.

PLOEG, J. D. van der. (2009). **Sete teses sobre a agricultura camponesa**. In: Agricultura familiar camponesa na construção do futuro. Número Especial, pp. 17-32.

PLOEG, J. D. van der. (2014). **Dez qualidades da agricultura familiar**. Trad. Flávia Londres e Paulo Petersen. Cadernos de Debate, nº 1, fev., 7-14.

PRATES JÚNIOR, P., MOREIRA, B. C., DA SILVA, M. D. C. S., VELOSO, T. G. R., STÜRMER, S. L., FERNANDES, R. B. A., ... & KASUYA, M. C. M. (2019). Agroecological coffee management increases arbuscular mycorrhizal fungi diversity. **PLoS One**, 14(1), e0209093.

ROCKSTRÖM, J., W. STEFFEN, K. NOONE, Å. PERSSON, F. S. CHAPIN, III, E. LAMBIN, T. M. LENTON, M. SCHEFFER, C. FOLKE, H. SCHELLNHUBER, B. NYKVIST, C. A. DE WIT, T. HUGHES, S. VAN DER LEEUW, H. RODHE, S. SÖRLIN, P. K. SNYDER, R. COSTANZA, U. SVEDIN, M. FALKENMARK, L. KARLBERG, R. W. CORELL, V. J. FABRY, J. HANSEN, B. WALKER, D. LIVERMAN, K. RICHARDSON, P. CRUTZEN, AND J. FOLEY. 2009. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. **Ecology and Society** 14(2): 32.

SOUZA, H.N.; CARDOSO, I.M.; DE SÁ MENDONÇA, E.; CARVALHO, A.F.; DE OLIVEIRA, G.B.; GJORUP, D.F.; BONFIM, V.R. Learning by doing: A participatory methodology for systematization of experiments with agroforestry systems, with an example of its application. **Agroforestry systems**. 2012, 85, 247–262.

SOUZA, H.N.; CARDOSO, I.M.; FERNANDES, J.M.; GARCIA, F.C.P.; BONFIM, V.R.; SANTOS, A.C.; CARVALHO, A.F.; MENDONÇA, E.S. Selection of 49 native trees for intercropping with coffee in the Atlantic Rainforest biome. **Agroforestry Systems**, v.80, p.1-16, 2010.

TEIXEIRA, H. M., BIANCHI, F. J., CARDOSO, I. M., TITTONELL, P., & PENACLOS, M. Impact of agroecological management on plant diversity and soil-based ecosystem services in pasture and coffee systems in the Atlantic forest of Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**. 2021. 305, 107171.

DE JESUS, J. C., SILVA, B. D., ANDALÓ, V., VASCONCELOS, B. N. F., DE ASSIS, G. A., & CARVALHO, F. J. (2022). Ocorrência de bicho-mineiro (*Leucoptera coffeella*) em cafeeiros cultivados em sistemas agroflorestal e convencional. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 17, n. 2, p. 90-100, 2022.

COTRUFO, M. F.; LAVALLEE, J. M. Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration. **Advances in agronomy**, v. 172, p. 1-66, 2022.

CAPÍTULO 1

TRANSIÇÃO AGROECOLÓGICA EM CAFEZAIS MANEJADOS SOB OS
PRINCÍPIOS DA AGRICULTURA NATURAL

CHAPTER 1

AGROECOLOGICAL TRANSITION IN COFFEE PLANTATIONS MANAGED
UNDER THE PRINCIPLES OF NATURAL AGRICULTURE

RESUMO

Para promover a sustentabilidade dos agroecossistemas a sociedade vem buscando cada vez mais modelos de agricultura que trabalhem em sinergia com a natureza, como é o caso da agricultura natural. Este modelo está entre os estilos que contribuem para a transição agroecológica. Na agricultura natural o manejo é focado na saúde do solo buscando ao máximo potencializar os processos ecológicos através da vivificação dos solos, utilizando apenas biomassa vegetal como fonte de nutrientes. Buscou-se nesse trabalho sistematizar a experiência do agricultor com manejo sob os princípios da agricultura natural, compreender o processo de transição agroecológica na propriedade e identificar os indicadores utilizados no manejo dos resíduos. O estudo foi realizado no sítio Pedra Redonda, no município de Araponga. Para isso foi realizado a sistematização da bibliografia disponível, visitas a propriedade, caminhadas transversais e a partir das informações disponíveis, foram criadas linhas do tempo que ajudaram a compreender o contexto local, o histórico do uso e ocupação da propriedade e o processo de transição agroecológica vivenciado. O agricultor possui mais de 20 anos de manejo agroecológico e em processo de transição desde então. Nos últimos 9 anos vem redesenhando o sistema e desde 2018 trabalha exclusivamente com o manejo sob os princípios da agricultura natural. Além de ter alcançado um nível considerado de sucesso no manejo de agroecossistemas ele desenvolveu seus próprios indicadores para avaliar e monitorar a qualidade do solo e das plantas, e o momento de manejar os resíduos vegetais. O manejo sob os princípios da agricultura natural além de beneficiar a saúde do solo e de todos os organismos presentes no sistema, promove também a melhoria na qualidade de vida do agricultor e de sua família.

Palavras-chave: Agroecologia, Etnopedologia, Sistematização de experiências.

ABSTRACT

To promote the sustainability of agroecosystems, society is increasingly seeking agricultural models that work in synergy with nature, such as natural agriculture. This model is among the styles that contribute to agroecological transition. In natural agriculture, management focuses on soil health, seeking to maximize ecological processes through soil vivification, using only plant biomass as a source of nutrients. This study aimed to systematize the farmer's experience with management under the principles of natural agriculture, understand the process of agroecological transition on the property, and identify the indicators used in residue management. The study was conducted at Pedra Redonda farm, in the municipality of Araçuaia. For this purpose, the available literature was systematized, visits to the property were made, transversal walks were conducted, and from the available information, timelines were created to help understand the local context, the history of land use and occupation of the property, and the experienced agroecological transition process. The farmer has been practicing agroecological management for over 20 years and has been in transition since then. In the last 9 years, he has been redesigning the system, and since 2018, he has been exclusively working with management under the principles of natural agriculture. In addition to achieving a level considered successful in agroecosystem management, he has developed his own indicators to assess and monitor soil and plant quality and the timing of managing plant residues. Management under the principles of natural agriculture not only benefits soil health and all organisms present in the system but also promotes improvement in the quality of life of the farmer and his family.

Keywords: Agroecology. Ethnopedology. Experience systematization.

1. INTRODUÇÃO

Os povos possuem conhecimentos valiosos a respeito dos solos e seu manejo, que fazem parte de um sistema de sabedoria ancestral, mas que não são reconhecidos pela ciência do solo. Entretanto, a integração entre conhecimento popular e o conhecimento científico permite uma melhor compreensão do solo e melhora as tomadas de decisões, pois, muitas práticas de manejo conhecidas e experimentadas pelos agricultores são baseadas em momentos, ou cenários de extrema necessidade. Este conhecimento representa um bem cultural da sociedade, mas que está sendo perdido, principalmente pela falta de reconhecimento dos saberes dos agricultores, mas também pelo deslocamento de jovens para as cidades (BARRERA-BASSOLS & ZINK, 2003; BARRIOS et al., 2011).

Estes saberes podem e devem ser sistematizados em processos de pesquisa-ação comprometida com a transformação social do meio rural (CARMO et al., 2018; CASALINHO & LIMA, 2018). A sistematização de experiências permite incentivar o diálogo entre os saberes, portanto é um processo de produção de conhecimento. Nela, a organização dos aprendizados e a articulação entre a teoria e a prática permite indicar lições que podem melhorar a prática. A intervenção a partir dos aprendizados obtidos com a sistematização pode confrontar o conhecimento teórico existente e contribuir para convertê-lo em uma ferramenta útil para transformar nossas realidades (HOLLIDAY, 2006). Este processo é importante pois, permite a reflexão do conhecimento gerado pelo agricultor, as lições e a divulgação do trabalho que pode ser difundido entre outros agricultores. A sistematização é útil para analisar experiências de manejo dos agroecossistemas, a exemplo daqueles que utilizam os princípios da agricultura natural.

A agricultura natural foi desenvolvida por volta de 1930, por Mokiti Okada, a partir de suas preocupações com uso intensivo de agrotóxicos na agricultura. A agricultura natural se desenvolveu inicialmente como um método, porém, mais tarde, se consolidou como uma corrente de pensamento filosófico. Neste estilo de agricultura, considera-se que o revolvimento do solo com arações e gradagens além de causar danos ao solo é uma prática cara para o agricultor e que a fertilização com produtos químicos pode levar à degradação da qualidade do solo e impactar negativamente o meio ambiente. Os praticantes da agricultura natural entendem que o solo tem todos os nutrientes de que precisam, sendo necessário apenas o manejo correto para permitir o pleno desenvolvimento da vida e sua disponibilização. Na agricultura natural os termos pragas e ervas daninhas não existem, pois os agroecossistemas estão em equilíbrio e os

organismos são controlados de forma natural, através do manejo feito pelo agricultor (FUKUOKA, 1978; FUKOAKA, 1995). A vegetação espontânea, por exemplo, cresce e são manejadas para proteger e fertilizar o solo. Elas são roçadas e incorporadas ou deixadas sobre os solos.

A agricultura natural está entre os estilos de agricultura que contribuem para a transição agroecológica. A agroecologia, entendida como ciência, prática e movimento, objetiva promover a transição para sistemas alimentares sustentáveis. A transição é um processo gradual que visa o desenho e a construção de agroecossistemas complexos que levem em consideração as particularidades de cada sistema, além do bem-estar do sujeito envolvido (COSTABEBER et al., 2013).

Na Zona da Mata mineira, um agricultor familiar agroecológico utiliza os princípios da agricultura natural no manejo de seu cafezal há nove anos (SOUZA, 2023). Esta experiência é única na região, e quem sabe no país. O manejo dos resíduos orgânicos, empregado através do estilo de agricultura desenvolvido na propriedade é a chave para a saúde de seus cafezais. O diálogo entre os conhecimentos científicos e o saber do agricultor tem facilitado os processos de transição que vem acontecendo na propriedade nos últimos anos. Estes diálogos precisam ser aprofundados para identificar e compreender os saberes do agricultor sobre o manejo e a qualidade do solo, fruto de experiência prática de campo (TEIXEIRA et al., 2018; CARMO et al., 2018).

Portanto o objetivo geral deste trabalho foi sistematizar as informações sobre o manejo de cafezais cultivados seguindo o princípio da agricultura natural, tendo como objetivos específicos: i) compreender o processo de transição para a agricultura natural que a propriedade se encontra; ii) apontar lições que contribuam para o manejo agroecológico do solo; e iii) identificar os indicadores de qualidade dos cafezais e em especial aqueles indicadores utilizados no manejo dos resíduos.

2. METODOLOGIA

2.1 Área de Estudo

O estudo foi realizado em Araponga, município localizado na região da Zona da Mata Mineira (Figura 1). A região está localizada no bioma Mata Atlântica onde os fragmentos de vegetação nativa estão intercalados com pastagem e áreas de café (Figura 2), formando um mosaico que se destaca no relevo montanhoso característico da região (GOMES et al., 2020). A região possui média anual de temperatura de 18°C, ideal, portanto, para cultivo de café arábica (*Coffea arábica*), que se desenvolve bem entre 18

e 22°C. A precipitação da região varia entre 1200 e 1800mm (CARVALHO et al., 2021). Os solos da região são Latossolos Vermelho-amarelo, considerados pela ciência do solo como ácidos e pobre em nutrientes (KER, 1997; GOMES et al., 2016). Especificamente onde a propriedade se encontra, bauxita é observada à superfície do solo. Estes solos necessitam de constantes aporte de material orgânico e da ciclagem de nutrientes para a manutenção da qualidade ao longo do tempo.

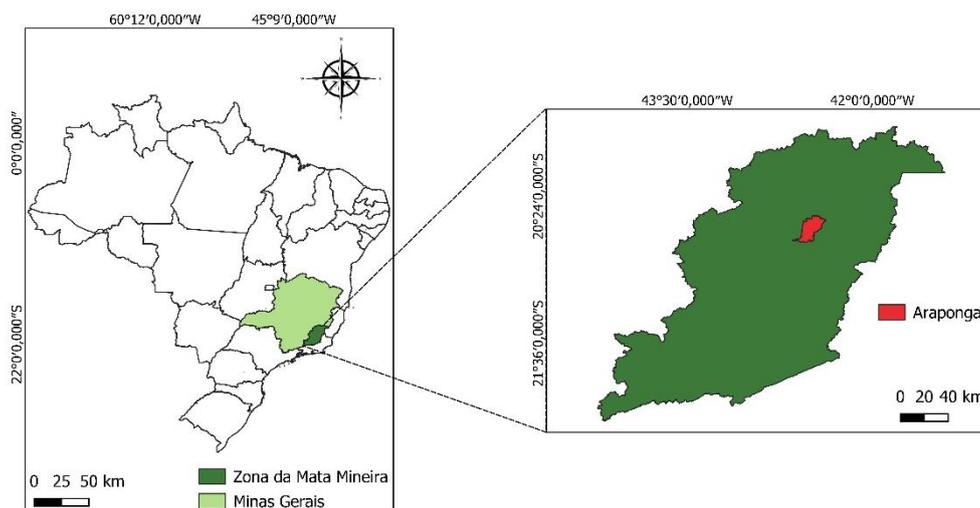


Figura 1. Município de Araponga, Zona da Mata de Minas Gerais.

A área de estudo está localizada no sítio denominado Pedra Redonda, em uma propriedade da agricultura familiar, no entorno do Parque Estadual da Serra do Brigadeiro, considerada uma das reservas mais importantes da Mata Atlântica do estado de Minas Gerais. O Parque possui área total de aproximadamente 15.000 ha e está localizado nos municípios de Araponga, Divino, Ervália, Fervedouro, Miradouro, Muriaé, Pedra Bonita e Sericita (IEF, 2022). No Parque, as áreas de florestas estão intercaladas com campos de altitude. As nascentes que se encontram no Parque contribuem para formação de duas bacias hidrográficas importantes para região: a do rio Doce e do rio Paraíba do Sul. A Serra do brigadeiro já foi denominada serra dos arrepiados, em referência aos indígenas Puri que, juntos aos povos Coropós e Coroados, foram os primeiros habitantes da Zona da Mata (ZANELLI, 2009). Arrepiados referia-se ao frio que arrepiava a pele daqueles que habitavam a região, ou segundo outra versão, o nome se referia à forma com que os indígenas amarravam os cabelos. Atualmente, encontra-se na Assembleia Legislativa de Minas Gerais Projeto de Lei do Deputado Leleco Pimentel (do Partido dos Trabalhadores) que muda o nome da Serra e Parque para Parque Estadual da Serra dos Puris.

O Sítio Pedra Redonda, localiza-se próximo à Pedra Redonda, ponto de referência conhecido da região. O Sítio está localizado a 1200 m de altitude e possui 12 hectares, hoje manejados sob os princípios da agricultura natural. Os cafezais são distribuídos em talhões que são consorciados com árvores nativas, frutíferas e espécies anuais para consumo familiar e geração de renda.



Figura 2. Paisagem e ocupação do solo comum na Zona da Mata Mineira, onde o café se encontra permeada a vegetação natural e em morros.

2.2 Sistematização da Experiência

Na Tabela 1 encontra-se, de forma sintética, as etapas, os objetivos e as técnicas utilizadas na sistematização da experiência.

Tabela 1. Objetivos e técnicas utilizadas na sistematização de experiências na propriedade Sítio Pedra Redonda, Araçuaia (MG).

ETAPAS	OBJETIVOS	TÉCNICAS
PLANEJAMENTO	Formação da equipe Definir metodologias Elaboração da matriz de sistematização	Reuniões de formação da equipe Reuniões com a equipe para definir processos e construção da matriz de sistematização
ANÁLISE DO CONTEÚDO DOCUMENTAL	Revisar a literatura e organizar as informações sobre a propriedade	Leitura das teses, dissertações e cartilhas produzidas a partir da experiência do agricultor Sistematização das informações obtidas.
VISITAS À PROPRIEDADE	Conhecer a experiência	Visitar a propriedade com a equipe de pesquisa Caminhadas transversais
HISTÓRICO DA PROPRIEDADE	Conhecer o histórico da propriedade Identificar os momentos importantes da transição para manejo seguindo os princípios da agricultura natural	Matriz de sistematização Linha do tempo

ANÁLISES, LIÇÕES E CONCLUSÕES	Refletir sobre a experiência Extrair lições aprendidas Promover trocas de informações Gerar novos conhecimentos	Discussão em grupo Repasso ao agricultor Intercâmbio agroecológico na propriedade
DIFUSÃO	Registrar e difundir conhecimento	Elaboração de cartilha, artigos científicos e tese Intercâmbios agroecológicos

2.2.1 Análise de dados secundários

Na etapa de revisão de literatura, ou levantamentos em fontes secundárias, os principais documentos lidos foram as teses, dissertações e artigos científicos elaborados a partir de pesquisas na área, além de um boletim, denominado “Nossa Roça” sobre história da família (Tabela 2). Segundo Smith (2008), a utilização de dados secundários é importante para definir melhor o problema ou obter dados adicionais em uma pesquisa.

Tabela 2. Trabalhos realizados na propriedade da família do agricultor (Araponga, Minas Gerais) até ano de 2020, em parceria com Universidade Federal de Viçosa (UFV).

TÍTULO DO TRABALHO	TIPO	AUTOR/ANO
1. Nossa Roça: Produzindo café orgânico nos sítios da Pedra Redonda	Boletim	Lopes, et al. 2014
2. Diversidade microbiana e microbiota solubilizadora de fosfato em solos de cafezais orgânicos em sistemas agroflorestais e a pleno sol	Dissertação	Silva, 2016
3. Nematoides como indicadores de qualidade do solo em sistemas de café	Dissertação	Soto, 2016
4. Comunidades de nematoides do solo em cafeeiros agroflorestais com diferentes sistemas de adubação orgânica	Dissertação	Vieira Junior, 2016
5. Atividade microbiológica promove o crescimento de plantas de milho e a qualidade do solo	Dissertação	Figueiredo, 2019
6. Linking biodiversity, ecosystem services and social actors to promote agroecological transitions	Tese	Teixeira, 2020

2.2.2 Matriz de sistematização

A matriz de sistematização (Tabela 3) consiste na criação de uma matriz com temas gerais (colunas) e transversais (linhas) e no cruzamento destes temas perguntas são elaboradas (Tabela 3) (BIAZOTI et al., 2017). Para organizar a matriz é preciso primeiramente determinar os temas gerais e transversais, que pode ser realizado de forma coletiva ou individual, conforme os objetivos do estudo. A matriz não é um questionário, pois, as perguntas elaboradas a partir dela servem apenas de guia para a sistematização e essas perguntas podem ser revisadas ao longo da sistematização. As questões formuladas a partir da matriz (Anexo 1) foram utilizadas nas conversas com o agricultor (Figura 4) e na organização e análise dos dados secundários.

Tabela 3. Matriz de sistematização de experiência com agricultura natural, Araponga, Minas Gerais.

Temas gerais					
Temas transversais	1. Histórico	2. Técnicas de manejo	3. Produção de biomassa	4. Indicadores	5. Resultados/Impactos
1. Adubação	1.1.	2.1.	3.1.	4.1.	5.1.
2. Fauna do solo	1.2.	2.2.	3.2.	4.2.	5.2.
3. Qualidade do solo	1.3.	2.3.	3.3.	4.3.	5.3.
4. Produção de café	1.4.	2.4.	3.4.	4.4.	5.4.
5. Atores, parcerias e família	1.5.	2.5.	-	-	5.5.
6. Políticas públicas	1.6.	-	-	-	5.6.
7. Agrobiodiversidade	1.7.	2.7.	3.7.	4.7.	5.7.

Matriz adaptada de Souza et al., 2012. Os números nas células referentes aos cruzamentos dos temas gerais (coluna) e transversais (linhas) referem-se a perguntas formuladas e que se encontram no Anexo 1.

2.2.3 Linha do tempo

Para reconstrução da trajetória do agricultor foi utilizada a técnica da linha do tempo (VERDEJO, 2010). Esta metodologia é uma técnica participativa e consiste na organização dos eventos chaves, listados de forma cronológica para melhor compreender o processo a ser estudado. Através desta metodologia é possível reconstruir a história de manejo da propriedade ao longo do processo de transição agroecológica. Ela foi construída de forma coletiva, com agricultor, seu filho e equipe de pesquisa. A matriz de sistematização (Tabela 3) contribuiu para a organização das informações adquiridas em conversas com agricultor e seu filho e dos dados secundários (Tabela 2).

2.2.4 Visitas e Caminhada transversal

No ano de 2021, três visitas foram realizadas para conhecer o local de estudo e os agricultores. Durante as visitas foram realizadas caminhadas transversais na propriedade para identificar e conhecer o manejo dos talhões de café (Figura 3). A caminhada transversal é uma metodologia proposta no Diagnostico Rural Participativo (DRP, VERDEJO, 2010), que consiste em uma caminhada pela propriedade juntamente com agricultor com objetivo de obter informações sobre os componentes do ambiente percorrido, como moradia, recursos naturais, tipo de solo etc. A caminhada permite o levantamento de informações úteis para o entendimento do manejo da propriedade.



Figura 3. Caminhada transversal na propriedade durante as visitas realizadas no ano de 2021. Apresentação dos participantes antes de iniciar os trabalhos em campo (A). O agricultor explicando sobre a incorporação do material orgânico ao solo (B). Conhecendo os talhões da propriedade do agricultor em uma das visitas (C). O agricultor mostrando para o grupo a importância do resíduo de bananeira para manter umidade e preservar os organismos edáficos durante a seca (D).



Figura 4. Conversa com agricultor em uma das visitas para reconstruir o histórico de uso e manejo das áreas em transição para agricultura natural.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Uso e ocupação da terra

A pesquisa foi realizada na propriedade de um agricultor familiar. Ele tem 51 anos, é casado, e sua esposa atualmente é professora da rede estadual do município. Eles têm dois filhos. O filho mais velho e o pai realizam o manejo da propriedade. Eles moram na

cidade e todos os dias vão para a propriedade que se localiza na comunidade Pedra Redonda, para trabalhar na roça. Eles construíram uma casa que é utilizada pela família, mas também que alugam para turistas.

Os pais do agricultor, já falecidos, são originários da região de Araponga. Eles foram para São Paulo trabalhar com o objetivo de conseguir recursos financeiros para comprar terra para a família trabalhar. Quando voltaram para Araponga, o pai trabalhou para vizinhos fazendo transporte com carro de boi e serviços com arado para adquirir um pouco mais terra, já que tinha muitos filhos e precisavam plantar. O agricultor e os irmãos trabalhavam no terreno do pai, no cultivo de milho e feijão e outras culturas para sustento da família.

Assim como o pai, mas algum tempo depois, o agricultor também se mudou temporariamente para São Paulo para trabalhar e conseguir recursos financeiros para comprar sua terra (Figura 5). Em São Paulo ele trabalhou por anos como cozinheiro de uma companhia de aviação. Quando voltou, no ano de 2000, comprou uma parte da terra, que anteriormente pertencia a seu pai, e voltou a ser agricultor. Sua propriedade de 12 hectares faz divisa com as propriedades de dois irmãos. A área das três propriedades ocupa 38 hectares na parte superior da microbacia do córrego Pedra Redonda.

A história do agricultor mostra que, sua trajetória de vida e de sua família foi permeada pela história ocupação da região da Zona da Mata Mineira que é marcada por uma formação socioeconômica vinculada intimamente ao seu modelo de ocupação, em um país que nunca realizou a reforma agrária e que os agricultores sem-terra precisam de lutar arduamente para conseguir um pedaço de terra para trabalhar (CALDART, 2001). Na região, as áreas de vegetação nativa foram suprimidas desde século XVII, inicialmente para exploração do ouro e posteriormente, exploração de café e pastagens. A economia do município está ligada as atividades agropecuárias, sobretudo a produção do café, principal fonte de renda dos moradores da região (VALVERDE, 1958; CTA, 2023). O manejo dos solos, em sua maioria, não preconizou as condições naturais de fertilidade e declividade e levou a sérios problemas de perda de biodiversidade e de degradação. Mais tarde, por volta da década de 1970, com a chamada modernização da agricultura e o uso do pacote tecnológico da revolução verde, os problemas ambientais e sociais da região foram aprofundados (ZANELI, 2009; ROCKSTROM et al., 2019) Com este modelo de agricultura, o uso de agrotóxicos e fertilizantes acelerou a perda de biodiversidade, perda da qualidade e quantidade da água e do solo e os problemas sociais, como intoxicação dos agricultores, aumento da pobreza e evasão para cidade foram acelerados

(FERRARRI, 1996). O deslocamento destes agricultores para cidade abrange camadas multidimensionais, que levam a problemas complexos de difíceis solução (HEIN & SOARES DA SILVA, 2019).

Contudo, o município de Araponga apresenta um histórico importante de construção da agroecologia. Desde 1989, com a atuação no município do Centro de Tecnologias Alternativas da Zona da Mata de Minas Gerais (CTA-ZM) em parceria com o Sindicato dos Trabalhadores Rurais de Araponga, professores e estudantes da Universidade Federal de Viçosa (UFV) as práticas que degradam os agroecossistemas foram desencorajadas, como os agrotóxicos, e fortaleceram as práticas agroecológicas como o uso de adubo orgânico e de Sistemas Agroflorestais (SAFs), onde árvores, inclusive frutíferas, são cultivadas em consórcio com o café (CARDOSO et al., 2001; SOUZA, et al., 2012).

Os SAFs foram implantados entre 1990 e 1994 de forma participativa e com o objetivo de melhorar a qualidade do solo e diversificar a produção de alimentos. A experimentação com SAFs foi realizada em outros municípios da Zona da Mata e, conseqüentemente, fortaleceu outras práticas conservacionistas na região (CARDOSO et al., 2001) que reverberam nas propriedades do Sítio Pedra Redonda e outras. As propriedades na Zona da Mata são em sua maioria familiares com sistemas agrícolas complexos e diversos. Muitos agricultores, mesmo convencionais, utilizam de práticas que são consideradas agroecológicas, como consórcios e uso de esterco, demonstrando que há uma fronteira difusa entre algumas propriedades convencionais e agroecológicas (SOUZA et al., 2012; TEIXEIRA et al., 2021).

3.2 As redes que conectaram a transição

Há mais de 20 anos o agricultor maneja a área onde a pesquisa foi desenvolvida. Durante este tempo, ele manteve parcerias com técnicos, estudantes, professores e pesquisadores do CTA, UFV e EPAMIG. Em 2013, um estudante de graduação da UFV, em intercâmbio propiciado pelo Programa Ciência sem Fronteiras, participou como palestrante de um evento na Suécia, para falar das experiências em agroecologia da Zona da Mata mineira. Na mesa estava também o coordenador do *Natural Agriculture Shumei*. O grupo *Natural Agriculture Shumei* é uma comunidade global de agricultores e consumidores que seguem os princípios propostos por Mokiti Okada no qual preza por práticas agrícolas ecológicas e sustentáveis que promovam a harmonia com natureza (SHUMEI, 2022).

O coordenador internacional ficou interessado em fazer contato com os agricultores da Zona da Mata para incentivá-los a produzir café de forma natural e vender para sua organização. Ele então enviou para a região o coordenador brasileiro do grupo *Shumei*, que a partir de contatos com o CTA e UFV, conheceu alguns agricultores da região. O agricultor se interessou e concordou em fazer a transição de seus talhões de café orgânico para a agricultura natural.

O processo de transição do manejo de café orgânico para o manejo natural durou um ano. No processo foi eliminado o uso de insumos de origem animal, sendo substituído por resíduos de poda da própria área e serapilheira da vegetação nativa. Como o café já era manejado de forma orgânica-agroecológica, um ano é suficiente para a comercialização do produto de acordo com as normas da certificadora. Quando o café é produzido de forma convencional, o período de transição é de 3 anos, quando então o café pode ser comercializado como natural. Para implantação de uma nova lavoura, o agricultor faz uso de calcário e farelo de mamona, uma vez que é permitido na agricultura orgânica e levando em consideração o tempo de produção do café que são no mínimo 3 anos, este intervalo garante o mínimo de 1 ano exigido pela certificadora.

No período da transição toda produção continuou a ser comercializada como orgânica, certificado pela BCS Oko-Garantie do Brasil (BCS) entre 2006 e 2014, e após 2014 certificado pelo IBD Orgânico. De acordo com as normas estabelecidas pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA, 2011) o agricultor é credenciado para a comercialização de produtos certificados como orgânico após passar pelo processo de conversão do cultivo por um período necessário para que ocorra a descontaminação do solo dos resíduos de agrotóxicos e fertilizantes. Neste período o agricultor tem que seguir as normas estabelecidas pelo MAPA para a produção orgânica. O período irá depender do produto a ser comercializado, que no caso do café é de 18 meses. Este processo é verificado e acompanhado pela certificadora através de um plano estabelecido (MAPA, 2011).

Em síntese, o interesse pela mudança na forma de manejar o solo surgiu na década de 90 com incentivo ao uso sustentável dos recursos, influenciados principalmente por ONGs, instituições de ensino e pesquisa. Com isso houve o processo de substituição dos adubos químicos pelos adubos orgânicos como esterco de boi e cama de frango. E desde então iniciou manejo orgânico dos talhões além do plantio de árvores no sistema, integrando ao manejo os SAFs. No ano de 2014 o agricultor começou a trabalhar com agricultura natural, aplicando os princípios em apenas uma lavoura, mas em 2018 iniciou

o processo de transição de todos os talhões, tornando sua propriedade um sistema complexo em total sinergia com a natureza. No caso do agricultor, pode se dizer que ele sempre esteve em processo de transição agroecológica desde que começou o manejo de sua propriedade. Uma síntese de seu processo de transição encontra-se na Tabela 4.

Tabela 4. Estágios da transição agroecológica no Sítio Pedra Redonda.

ETAPAS	ATRIBUTOS	INÍCIO
Substituição de fogo e roçada dos cafezais, no lugar de capinas.	Melhoria das práticas já existentes	Década de 90
Substituição de adubos químicos e maior diversificação dos cafezais	Uso de adubos orgânicos transição para a agricultura orgânica	2003
Início da substituição de adubos orgânicos	Introdução de árvores nos cafezais (SAFs)	2014
Substituição total dos adubos orgânicos	Início da transição para agricultura natural	2018
Substituição total dos adubos orgânicos	Transição de todos os talhões de café para a agricultura natural	2018
Conexão com rede consumidora		
Maior diversificação da propriedade e preocupação com o sistema agroalimentar global	Venda de abacate orgânico por um preço justo	2018

O próprio processo de venda aproximou o agricultor das suas redes de comercialização, mas este ainda não é um estágio alcançado por completo. Ele não conhece todas as etapas de comercialização do seu café e demonstra interesse em conhecer os lugares onde seu café é tomado no Japão.

Além do café ele comercializa o abacate. Ele faz questão de não vender as frutas mais caras por serem orgânicas. Elas não são certificadas e ele não gostaria que fossem. Gostaria apenas que os consumidores soubessem que elas são orgânicas, mas que são comercializadas por um preço acessível. Segundo ele, o café sendo certificado já recebe um preço justo e que os alimentos de qualidade precisam ser acessíveis a todos, demonstrando com isto uma preocupação com o redesenho de sistemas agroalimentares globais e justos.

Segundo Gliessman (2016) o processo de transição para ecossistemas sustentáveis agroecológicos passa por cinco níveis: (i) aumentar a eficiência de práticas convencionais a fim de reduzir o uso e o consumo de insumos escassos, caros ou ambientalmente

danosos; (ii) substituição de insumos e práticas convencionais por práticas alternativas; (iii) redesenho do agroecossistema de forma que ele funcione baseado em um novo conjunto de processos ecológicos; e (iv) restabelecimento de uma conexão mais direta entre aqueles que cultivam os alimentos e quem consome, com o objetivo de construir uma cultura de sustentabilidade que leva em conta as interações entre todos os componentes do sistema de alimentação e; (v) a partir dos níveis três e quatro, construir um novo sistema agroalimentar global, baseado na equidade, participação e justiça, que é somente sustentável, pois ajuda a proteger e restaurar os sistemas que apoiam a vida na Terra.

Os níveis propostos por Gliessman (2016) apontam uma direção do processo de transição, mas a transição pode ser iniciada em qualquer nível, ou os níveis podem se combinar. Em Araponga, os agricultores dizem que a agroecologia é um aprendizado infinito. Isto indica que uma vez dado início ao processo de transição, que pode ser o momento em que alguém decide entrar nos processos de transição, o processo não termina, pois o nível cinco estará sempre sendo aperfeiçoado.

A participação do filho no processo de transição do agricultor emerge como um elemento crucial. Desde a infância, o jovem acompanha de perto os processos pelos quais a propriedade da família passa. Atualmente, o jovem assume uma função ativa e colaborativa ao gerenciar a propriedade e liderar o manejo das lavouras através de uma parceria formalmente estabelecida. Essa participação torna-se ainda mais significativa diante do crescente desinteresse dos jovens nas atividades rurais atualmente. A sucessão rural é um processo construído socialmente que inclui a preparação do sucessor, além da propriedade. Porém, mais importante do que a transferência de posse, também envolve a continuidade de práticas culturais, históricas e tradicionais de produção e cultivo (ABDALA et al., 2022).

Quando esses jovens optam por deixar suas propriedades e não prosseguir com o trabalho rural, os conhecimentos adquiridos ao longo do tempo gradualmente se dissipam e perdem-se à medida que a população rural envelhece, deixando de se envolver nas atividades no campo. Assim, o processo de sucessão rural surge como uma etapa crucial a ser incorporada ao contexto da transição agroecológica, integrando-se às fases propostas por Gliessman (2016) e outros autores.

É fundamental reconhecer que, após um longo de um período de transição, um agricultor pode perder a capacidade de continuar atuando no campo. Se não houver um sucessor para dar continuidade ao trabalho desenvolvido, a propriedade, anteriormente

equilibrada em termos de conservação, corre o risco de ser convertida em sistemas menos diversificados, menos conservacionistas e, em última instância, desaparecer. Portanto, a consideração da sucessão rural é importante para garantir a sustentabilidade e a continuidade dos princípios agroecológicos.

3.3 Histórico de manejo

Dos 12 hectares da propriedade, 7 são cultivados com café e 5 são ocupados com vegetação nativa, pastagens ou estão em pousio (Figura 5). Até o ano de 2020 o agricultor criava gado na propriedade, principalmente bois de carro, com os quais fazia transportes para serviço diário e era também a fonte de esterco para adubação das lavouras. Mas a produção de café sempre foi, e é a principal atividade da propriedade. Nos 7 hectares, aproximadamente 12 mil pés de café distribuídos em 9 talhões, encontram-se em diferentes estágios de transição agroecológica. Os cafezais são consorciados com outros cultivos como feijão e milho, utilizados para a alimentação da família e com árvores (SAFs). A nascente e as margens dos córregos são protegidas e há um cuidado especial com as estradas da propriedade, através da construção de barraginhas, desvios das águas e manejo de plantas espontâneas para sua cobertura.

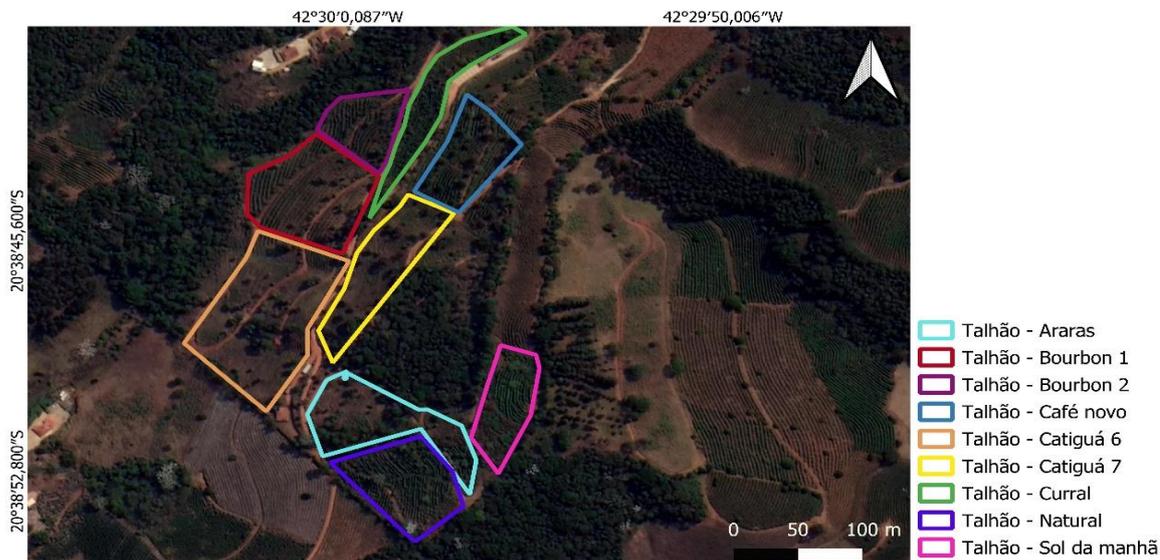


Figura 5. Mapa de identificação dos talhões de café na propriedade sítio Pedra Redonda – Araponga, MG.

Desde que retornou para a roça, no ano 2000, o agricultor se dedicou a produção de café, quando adquiriu seu primeiro terreno com 1500 plantas. Sempre interessado e preocupado com o manejo sustentável de suas terras, não utilizava fogo e agrotóxicos, mas ainda utilizava adubos químicos e as lavouras eram a pleno sol. O não uso do fogo diferia do manejo adotado a aproximadamente 40 anos atrás, quando o terreno ainda era

de seu pai. Nesta época as queimadas eram comuns, frequentes na região e utilizadas para o manejo de plantas espontâneas, com objetivo de “limpar” a área para plantio. Prática esta impressa no perfil do solo na propriedade, que ainda apresenta restos de carvão remanescentes dessa época (Figura 6).



Figura 6. Carvão a 20 cm de profundidade no perfil do solo, resultado da queima como manejo da área a mais de 40 anos atrás.

O uso de fertilizantes químicos, não utilizados por seu pai, era em menor quantidade quando comparado com a região. Na região o comum era utilizar 450g de NPK por planta de café ao ano. Entretanto, o agricultor relatou ter usado 22 sacos de fertilizantes em 3 anos de safra, o que dá uma média de 250g por planta de café ao ano, menos da metade do que era utilizado nos cafezais da região. Mais tarde, os adubos químicos foram substituídos pelos adubos orgânicos em um processo de transição para a agricultura orgânica.

3.4 Processo de transição das lavouras

O agricultor relatou que desde criança recolhia esterco de boi nos pastos para serem utilizados na propriedade do pai. Entretanto após o uso de adubos químicos, em 2002, ele passou a redesenhar seus agroecossistemas realizando a transição para a agricultura orgânica certificada (Figura 7). O manejo orgânico adotado na propriedade passou a contar com uso de esterco de boi, cama de frango, torta de mamona, farelo de osso, além do plantio de espécies arbóreas em consórcio com café. Ele também substituiu

as capinas dos cafezais, comuns na região, por roçada da vegetação espontânea. Entre os anos de 2000 e 2003 ele implantou mais 2.600 plantas de café, já seguindo também os princípios da agricultura orgânica (Anexo 2). No ano de 2006, ele iniciou o plantio de amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*) como forma de aumentar a fixação biológica de nitrogênio, aumentar a biomassa e proteger o solo e passou a conduzir as árvores que nasciam espontaneamente em sua lavoura além de, cultivar bananeiras e abacateiros em consórcio com o café.

Em 2013, ele implantou novas lavouras de café em consonância com a agricultura orgânica, mas logo em seguida conheceu a agricultura natural e dedicou uma das lavouras para cultivo do café sob os princípios desta agricultura. No processo de transição para o café natural ele substituiu os adubos orgânicos de origem animal por resíduos orgânicos vegetais. Com aumento da demanda de resíduos orgânicos ele deixou parte da área se recuperar e encapoeirar para aportar serapilheira nos cafezais.

Hoje conhecido como Talhão Natural, essa lavoura está com 9 anos de manejo. Ele continuou trabalhando os demais talhões seguindo os princípios da agricultura orgânica, mas em 2018 iniciou a transição de todos seus cafezais para o manejo sob os princípios da agricultura natural. Em 2021, a primeira lavoura foi implantada seguindo desde o início estes princípios (Figura 8).

Dos nove talhões identificados na propriedade (Anexo 1), o talhão Sol da Manhã, mais velho, foi implantado em 1999 pelos irmãos, antigos donos do terreno. Desde a aquisição até 2002, foi utilizado adubo químico, e em 2003 o manejo foi convertido para orgânico, ficando por quinze anos nesse sistema. Em 2018, iniciou-se neste talhão o manejo sob os princípios da agricultura natural. O talhão denominado de Natural foi implantado no ano de 2000 e conduzido no sistema orgânico até 2014, quando iniciou sua transição para o sistema de manejo natural. Este foi o primeiro talhão conduzido dessa forma, a partir de uma demanda da Fundação Shumei para quem ele comercializasse seu café natural (SOUZA, 2023). O talhão curral foi implantado em 2002, também conduzido de forma orgânica até 2018, quando houve a transição para a agricultura natural. Em 2013 foi implantado a lavoura que agricultor chamou de talhão Café Novo, onde manejo orgânico prevaleceu por seis anos até a mudança para o natural em 2019. O talhão Bourbon 1 implantado em 2015, foi conduzido de forma orgânica até 2020, quando iniciou o processo de transição. Em 2020, outros três talhões foram convertidos para a agricultura natural: talhão Catiguá 6, talhão Catiguá 7 e talhão Bourbon 7, todos

implantados em 2018 e manejados de forma orgânica. No ano de 2021 foi realizado o plantio do primeiro talhão, conduzido desde a sua implantação na agricultura natural.

3.4.1 Adubação com resíduos vegetais

A adubação das lavouras é realizada normalmente 2 vezes ao ano. Em média de 20 a 30kg de resíduos é utilizado por planta de café ao ano. A primeira adubação do ano ocorre em fevereiro. A segunda é realizada após a safra, entre os meses de setembro e outubro, que é o momento em que o agricultor tem maior disponibilidade de tempo e de resíduos.

Dentre os resíduos, utiliza-se serapilheira proveniente do fragmento de vegetação nativa presente na propriedade. O material é retirado e levado para as lavouras em processo que agricultor chama de “doação de sangue” pois, neste ponto, as raízes retiram o máximo de nutrientes do solo e estes serão levados para o café. A coleta de serapilheira para adubação das lavouras é realizada entre janeiro e fevereiro.

O agricultor aproveita também os resíduos de folhas, galhos, frutos e flores provenientes de espécies arbóreas consorciadas com café, ou em seu entorno. Estas árvores, além da produção de biomassa, desempenham outras funções no sistema (Tabela 5). Dentre as funções citadas pelo agricultor encontra-se a produção de alimentos, barreira contra o vento e controle biológico. Entretanto, para o agricultor a principal função das árvores é a produção de biomassa para incorporação ao solo e formação de matéria orgânica.

Além dos resíduos que caem naturalmente, as podas das árvores e arbustos também são realizadas. As podas geralmente são realizadas nos meses de junho ou julho, quando ocorre a diferenciação floral e o café precisa de maior incidência de luz (CAMARGO et al., 2007). Entretanto, a poda é realizada em fevereiro, pois é o mês com maior disponibilidade de tempo para o trabalho, que antecede o período da colheita do café. Segundo agricultor, além da produção de biomassa, a poda é uma forma de evitar doenças no cafezal, pois permite maior entrada de ar e luz. As podas dos cafeeiros, quando ocorrem, também são incorporadas ao solo, o que também não é comum, mas segundo ele todo resíduo disponível na propriedade é fonte para adubação.

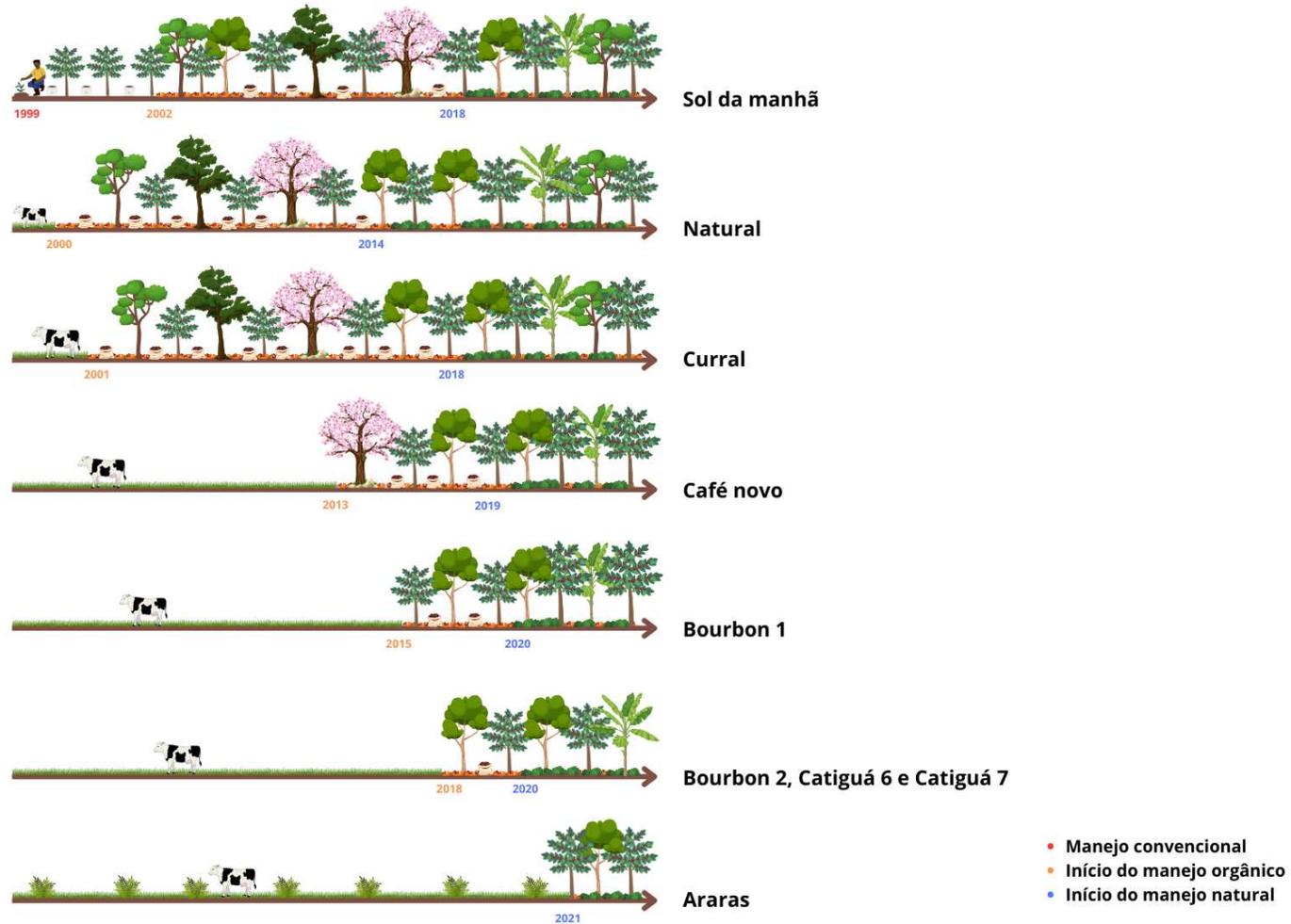


Figura 7. Linha do tempo indicando ano de implantação das lavouras de café (talhões) ano de transição para o manejo sob os princípios da agricultura natural. O intervalo entre implantação e a conversão para agricultura natural a propriedade foi manejada de acordo com os princípios da agricultura orgânica. Sítio Pedra Redonda, Araponga, Minas Gerais. Fonte: A autora.

Outra fonte importante de biomassa é a vegetação herbácea. Esta é proveniente da vegetação espontânea que é roçada e deixada sobre o solo, de espécies implantadas com função de produção de alimento ou de leguminosas plantadas com a função também de fixação de nitrogênio, a exemplo do amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*) que cobre todo o solo do primeiro talhão Natural, e que está sendo implantada aos poucos nos demais talhões.

A bananeira (*Musa sp.*), além da produção de frutos para consumo e comercialização é uma excelente alternativa para o agricultor na formação de biomassa e cobertura do solo pois, o pseudocaule, tem acúmulo de água que favorece a umidade do solo e serve de abrigo para fauna edáfica. Outra função importante dela na propriedade é como barreira para evitar contaminação de agrotóxicos da propriedade do lado, quebra-ventos e proteção contra algumas doenças propagadas pelo vento.

A braquiária (*Brachiaria sp.*) sempre foi presente na propriedade e ao invés de eliminar, como é comum nas propriedades sem interesse de uso, ele utiliza como fonte nutrientes. Antes de levar para lavoura ele roça e amontoa a braquiária e deixa por um certo tempo para que se inicie um processo de fermentação, com isso a decomposição, e depois levá-la para lavoura.

O margaridão (*Thitonia diversifolia*) começou a ser implantado recentemente. Por ser uma planta de porte médio e não ocupa muito espaço ela é plantada próximo a casa e em alguns espaços dos cafezais. Ela tem sido promissora na adubação pois, seu manejo é simples facilitando o trabalho do agricultor. Outra planta herbácea que vem sendo muito utilizada na propriedade é a samambaia do campo (*Pteridium aquilinum*). Normalmente eliminada na propriedade por ser considerada uma invasora nas lavouras de café, tem sido muito utilizada como fonte de adubação em cafezais onde sua ocorrência é maior, pela facilidade de logística e boa cobertura no solo.

Segundo o agricultor, o ponto ideal para a roçagem das plantas herbáceas para incorporação é quando começa aparecer os botões florais, nessa fase ele consegue maior aproveitamento da planta. Entretanto, ele também considera outros fatores, como o tempo, para o manejo das herbáceas. Quando realizada a colheita os resíduos de milho (*Zea mays*) e feijão (*Phaseolus vulgaris*), também são deixados na área.

Considerando que o principal substrato para a formação da matéria orgânica do solo são os resíduos vegetais, a adoção de uma diversidade de plantas, com composição bioquímica diferente é importante para diferenciação na produção de biomassa (SOUZA et al., 2010). Algumas plantas apresentam maior potencial de produção de massa seca e

tendem a ter uma maior durabilidade no solo, como por exemplo a braquiária. Devido a uma alta relação C/N, as gramíneas tendem a liberar pouco nitrogênio oriundo dos resíduos vegetais no solo (TAVARES et al., 2008). Já o amendoim forrageiro por exemplo, tem decomposição mais rápida, permanecendo pouco tempo como cobertura do solo, mais disponibiliza nutrientes mais rapidamente (SILVA et al., 2021).

A diversidade de plantas no agroecossistema, além de benéfica para a formação da matéria orgânica, garante uma boa distribuição de resíduos na área ao longo do tempo, melhorando a uniformidade do aporte de matéria orgânica na área de cultivo. O uso dos resíduos vegetais favorece qualidade do solo através da melhoria das características químicas, físicas e biológicas, pois diferente dos adubos químicos a biomassa utilizada libera nutrientes por muito tempo e não se perde com chuva como acontece em sistemas convencionais, aumentando a estabilidade do sistema aos longos dos anos de manejo (SILVA & MENDONÇA, 2007; DHALIWAL et al., 2019).

Tabela 5. Espécies arbóreas plantadas ou deixadas crescer espontaneamente em consórcio com o café, manejado sob os princípios da agricultura natural, e suas funções de acordo com percepção do agricultor. Araponga, Minas Gerais.

Nome científico	Nome comum	Funções da planta no sistema de acordo com agricultor
<i>Symplocos tenuifolia</i> Brand	Maria-Mole	controle biológico ¹ barreira ²
<i>Persea americana</i>	Abacate	Alimentação ³ , controle biológico ¹ , alimentação
<i>Solanum argenteum</i>	Capoeira branca	controle biológico, barreira
	Três folhas	controle biológico, barreira
<i>Croton urucurana</i>	Adrago	barreira
<i>Parattosperma leucanthum</i>	Cinco folhas	barreira
<i>Cinnamomum verum</i>	Canela	barreira
<i>Dialium guianense</i>	Pororoquinha	barreira
<i>Eremanthus erythropappus</i>	Candeia	barreira
<i>Araucaria sp.</i>	Araucária	barreira
<i>Dalbergia sp.</i>	Jacarandá	barreira
<i>Annona montana</i>	Articum	barreira
<i>Tibouchina granulosa</i>	Quaresmeira	barreira
<i>Cecropia pachystachya</i>	Embaúba	barreira
<i>Psidium guajava</i>	Goiaba	alimentação
<i>Citrus deliciosa</i>	Mexerica	alimentação
<i>Carica papaya</i>	Mamão	alimentação

¹Controle biológico: atrai inimigo natural da broca do cafeeiro. ²Barreira: para evitar contaminação de agrotóxicos da propriedade do lado, quebra-ventos e proteção contra algumas doenças propagadas pelo vento. ³Alimentação: (frutos) para a família, dos animais domésticos e silvestres e alguns frutos para comercialização.

A forma de aplicação dos resíduos é uma inovação desenvolvida pelo agricultor no manejo da adubação. Para manter a umidade e favorecer a decomposição ao longo de toda época seca a estratégia é colocar o material amontoado e na época de chuvas distribuí-lo. Os resíduos normalmente são dispostos longe do “pé” da planta, pois quanto mais distante a cobertura, maior o estímulo para as raízes crescerem em direção a esse material, estimulando assim o domínio das raízes em tal área. A técnica de disposição dos resíduos mais distante da planta é vantajosa, pois as raízes das plantas tendem a crescer em direção aos nutrientes e água. Com isto a técnica estimula o desenvolvimento radicular e favorece a absorção de elementos que entram em contato com a raiz por difusão, como Fósforo e Potássio e através da interceptação radicular que é caso do Cálcio. (MEURER, 2007, BEVERIDGE & BUSOV, 2017).

O agricultor relata que na área debaixo das linhas de plantio do café (relativa ao tronco da planta de café e a declividade da área) tende a ter raízes mais próximas a superfície, característico de algumas variedades de cafeeiros (SOARES, 2019). Entretanto, ele prefere aplicar o material do “lado de cima” das plantas, em forma de meia lua, o que ajuda a controlar a velocidade de escoamento da água da chuva, e esse material se espalha na linha do café.

Para o agricultor, a eficácia e vantagens da adubação com resíduos vegetais em comparação com a adubação química são evidenciadas durante o período chuvoso e na produção. Durante as chuvas, ele consegue aproveitar melhor a umidade resultante da distribuição dos resíduos. Ele entende que a chuva facilita a decomposição dos resíduos, liberando gradualmente nutrientes para as plantas, ao contrário da adubação química, que pode causar lixiviação em períodos chuvosos, resultando em problemas ambientais nos corpos hídricos (ZANINI, 2000)

Além disso, é possível notar em campo que suas plantas são saudáveis e bonitas, sem apresentar sintomas de pragas ou doenças. Isso, combinado com a fertilidade do solo construída ao longo dos anos através do manejo cuidadoso de seus cafezais, resulta em uma produção equivalente à dos vizinhos que seguem métodos de cultivo convencionais. Esse fato contradiz as afirmações da Ciência do Solo tradicional sobre os Latossolos, que os descrevem como "pobres", "ácidos" e de "baixa fertilidade natural", sugerindo a necessidade de fertilizantes inorgânicos. A capacidade de um sistema conduzido de forma exclusivamente natural, com apenas resíduos como aporte, em produzir quantidades semelhantes às aquelas obtidas em cafezais submetidos às mesmas condições de solo, mas

com uso de fertilizantes inorgânicos, coloca em questão tais características atribuídas aos solos e ressalta a viabilidade de práticas sustentáveis de manejo agrícola.

Outro aspecto crucial é a qualidade de vida da família. Apesar de dedicarem-se ao cuidado das lavouras ao longo de todo o ano, eles fazem questão de reservar um período para as férias em família após a colheita, graças ao excedente financeiro obtido. Esse intervalo é valorizado pela família, e o agricultor destaca sua importância, pois muitas vezes os trabalhadores rurais são pressionados a permanecer constantemente no campo, sem tempo para descanso.

3.4.2 Indicadores

Durante as caminhadas pela propriedade e a partir de conversas foi identificado alguns indicadores que o agricultor utiliza como base para avaliar a qualidade do solo, o momento correto para retirada e aplicação da serapilheira e a saúde das plantas (Figura 8).

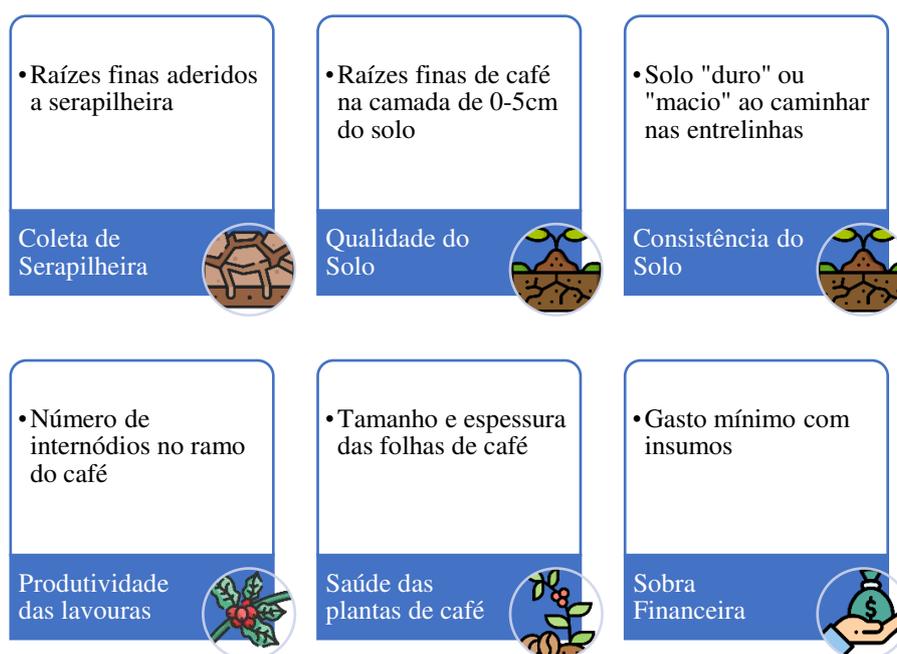


Figura 8. Indicadores criados pelo agricultor para monitorar, identificar e acompanhar os cuidados com manejo e produtividade da propriedade.

Segundo o agricultor, a presença de bastante raízes finas aderidas a serrapilheira, indica o momento certo para removê-la da vegetação nativa e utilizá-la na adubação das lavouras de café. A presença das raízes aderidas indicam que já houve tempo para o processo de ciclagem se estabelecer, o que, segundo o agricultor, leva cerca de um ano.

Isto significa que um ano após a retirada de serapilheira de um determinado local da vegetação nativa, ela pode novamente ser retirada, mas sempre observando se há presença das raízes. Este é um indicador do momento de retirada (“extrativismo”) da serrapilheira sem degradar a vegetação nativa. Além disto, neste ponto, a serapilheira apresenta materiais em diferentes estágios de decomposição e as raízes já estão fazendo a conexão da serapilheira com o solo, o que permite levar uma maior diversidade de microrganismos para as lavouras. A serapilheira serve então como uma fonte de inóculo de microrganismos. Por isto, o fornecimento de serapilheira da vegetação nativa para a lavoura foi chamado pelo agricultor de “doação de sangue”.

As raízes finas das plantas de café são também consideradas um indicador. As plantas de café apresentam grande manto de raízes finas na camada de 0-10cm (PARTELLI et al., 2014). Segundo o agricultor, quando o aporte de resíduos vegetais é suficiente, há maior quantidade de raízes de 0-5 cm. Com isto ele controla a quantidade de material vegetal a ser colocado, que varia de 20 a 30 kg por planta por ano.

Ao adicionar material orgânico suficiente ao solo, o agricultor promove os processos biológicos, a exemplo da ciclagem de nutrientes, que garantem a produtividade e melhoram a qualidade do solo. Altieri e Nichols (2004) associam a abundância de raízes finas a qualidade do solo. As raízes finas apresentam intensa atividade metabólica tendo como principal objetivo a absorção de água e nutrientes explorando o máximo as camadas da serapilheira se beneficiando da ciclagem e da disponibilidade de oxigênio (VALCARCEL et al., 2007).

A matéria orgânica transportada para o interior do solo pela ação da fauna e dos microrganismos contribuem na formação de compostos orgânicos, que auxiliam da estabilidade dos macroagregados (BRAIDA et al., 2011). As raízes, além de produzir matéria orgânica quando decompostas, atuam de forma a descompactar, facilitando a infiltração de água e conseqüentemente melhorando a estrutura do solo (FARREL e ALTIERI, 2012). Neste caso, não só as raízes do café, mas também das árvores, arbusto e herbáceas presentes no cafezal.

Outro indicador utilizado pelo agricultor é o número de internódios de café por ramo, tamanho e espessura das folhas. Esse indicador é utilizado para prever a produtividade da lavoura. Segundo ele, o crescimento de 2 pares de folhas por mês é um bom indicador de saúde e produtividade da planta; e se um ramo (galho) possuir de 8 a 12 pares de folha, equivalente de 8 a 12 rosetas (internódios) e folhas de mais ou menos 15-20 cm, com boa espessura, a planta terá boa produtividade. Ainda segundo o

agricultor, cada internódio produz aproximadamente 12 frutos. Com isso, em 5 ramos, será produzido 1 litro de grãos de café maduro.

Tal indicador, permite avaliar a produtividade, prevê os rendimentos da safra e comparar sua produção com a de café convencional. Segundo o agricultor, seu objetivo é produzir o mesmo tanto de café que o agricultor convencional, o que ele tem alcançado. Isto é importante para convencer o agricultor convencional que o seu manejo é correto. Quanto aos rendimentos, o agricultor é enfático ao dizer que o que importa é a sobra. Não adianta produzir muito se não sobra muito, ou seja, o objetivo dele é gastar o mínimo possível com insumos externos. A qualidade do café dele é reconhecida e premiada e o café é vendido por um preço superior ao preço do café convencional. Entretanto ele diz, em uma outra lógica econômica, que a expansão do ser humano não é indicada pelo dinheiro, mas pela produção de alimentos de qualidade para a família e outras pessoas (FORTES, 2024).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O manejo sob os princípios da agricultura natural, segundo depoimentos do agricultor, beneficia a saúde do solo e de todos os organismos presentes no sistema.

Em 20 anos de transição agroecológica e nove anos de manejo sob os princípios da agricultura natural, produz a mesma quantidade de café que seus vizinhos que produzem de forma convencional utilizados adubos químicos e agrotóxicos, mas a partir da potencialização dos processos ecológicos que contribuem para a conservação de todo o agroecossistema e sem depender em nenhum momento de insumos externos. A mão de obra utilizada no manejo é principalmente familiar.

O agricultor utiliza indicadores para avaliar e auxiliar suas tomadas de decisão. Estes indicadores contribuem para avaliar e identificar a qualidade do solo, das plantas e o momento certo do manejo dos resíduos. Os indicadores foram desenvolvidos a partir de conhecimentos herdados de seus pais, de hábitos culturais e locais e da observação da natureza desenvolvida pelo agricultor em suas atividades diárias. O uso de resíduos provenientes da propriedade para a fertilização dos solos e o uso dos indicadores desenvolvido por ele mesmo garante sua autonomia nos processos produtivos.

O processo de transição é lento e contínuo e depende da aplicação de práticas conservacionistas, mas também das interações com demais atores da rede de agroecológica, que permitiu inclusive a comercialização do café por preços mais justos.

Participam dessa rede, agricultores (as), extensionistas, pesquisadores (as) e instituições locais, regionais, nacional e internacional, demonstrando a importância da participação coletiva para o desenvolvimento de agroecossistemas sustentáveis. Esta rede facilita e fortalece o diálogo entre conhecimento científico e popular.

5. REFERÊNCIAS

BARRERA-BASSOLS, Narciso; ZINCK, Joseph Alfred. Ethnopedology: a worldwide view on the soil knowledge of local people. **Geoderma**, v. 111, n. 3-4, p. 171-195, 2003.

BARRIOS E.,COUTINHO H.L.C., MEDEIROS C. A. B. 2011. **InPaC-S: Integração Participativa de Conhecimentos sobre Indicadores de Qualidade do Solo** – Guia Metodológico. World Agroforestry Centre (ICRAF), Embrapa, CIAT. Nairobi. 178 p.

BEVERIGDE, C.A; BUSOV, V. Visão geral do do crescimento e desenvolvimento de vegetal. In: **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., & Murphy, A. Artmed Editora, 2017.

BLAZOTI, A., ALMEIDA, N., & TAVARES, P. (2017). **Caderno de metodologias: inspirações e experimentações na construção do conhecimento agroecológico**.sl]: Aba.

BRAIDA J.A, BAYER C, ALBUQUERQUE J.A, REICHERT J.M. Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. In: Klauberg Filho O, Mafra AI, Gatiboni LC, editores. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2011. v. 7. p. 221-78

BRASIL. Lei nº 11.326, de 24 de julho de 2006: Estabelece as diretrizes para a formulação da Política Nacional da Agricultura Familiar e Empreendimentos Familiares Rurais. Diário Oficial da União. Brasília, DF. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/111326.htm. Acesso em: 10 maio 2022.

CAMARGO, M. B. P. de; ROLIM, G de S.; SANTOS, M. A. dos. Modelagem agroclimatológica do café: estimativa e mapeamento das produtividades. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 28, n. 241, p. 58-65, 2007.

- CAPORAL, F. R. **Agroecologia: uma nova ciência para apoiar a transição a agriculturas mais sustentáveis**. Brasília, 2009.
- CARDOSO, I.M. GUIJT, I. FRANCO, F.S. CARVALHO, A.F. e FERREIRA NETO, P.S. Continual Learning for Agroforestry System Design: University, NGO and farmer partnership in Minas Gerais, Brazil. **Agricultural Systems**, v.69, p.235-257, 2001.
- CARMO, V.A. DO; MATOS, L.V.; MANCIO, D.; FREITAS, H.R.; OLIVEIRA, C.V. DE; CARDOSO, I.M., 2018. Etnopedologia: buscando o olhar de quem amanhã a terra. In: CARDOSO, I.M.; FÁVERO, C. (Eds.). **Solos e Agroecologia** (Coleção Transição Agroecológica, v.4) Brasília, DF: Embrapa, 161-200.
- CARVALHO GOMES, L., CARDOSO, I. M., DE SÁ MENDONÇA, E., FERNANDES, R. B. A., LOPES, V. S., & OLIVEIRA, T. S. Trees modify the dynamics of soil CO₂ efflux in coffee agroforestry systems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 224, p. 30-39, 2016.
- CARVALHO, A. F., FERNANDES-FILHO, E. I., DAHER, M., GOMES, L. D. C., CARDOSO, I. M., FERNANDES, R. B. A., & SCHAEFER, C. E. Microclimate and soil and water loss in shaded and unshaded agroforestry coffee systems. **Agroforestry Systems**, v. 95, n. 1, p. 119-134, 2021.
- CASALINHO, L.; LIMA, A. C. R. Integração de conhecimentos na construção de uma metodologia para avaliação da qualidade do solo. In: **Solos e Agroecologia**. 1a. ed. Brasília:Embrapa, 2018. p. 373.
- COSTABEBER, J. A.; CAPORAL, F. R.; WIZNIEWSKY, J. G. O conceito de transição agroecológica: contribuições para o redesenho de agroecossistemas em bases sustentáveis. COSTA GOMES, JC; ASSIS, W.S **Agroecologia: princípios e reflexões conceituais**. Brasília-DF: EMBRAPA, p. 145-180, 2013.
- DHALIWAL, S. S., NARESH, R. K., MANDAL, A., SINGH, R., & DHALIWAL, M. K. Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: A review. **Environmental and Sustainability Indicators**, v. 1, p. 100007, 2019.
- FARREL, J. G.; ALTIERI, M. A. **Sistemas Agroflorestais**. In: ALTIERI, M. A. **Agroecologia: Bases científicas para uma agricultura sustentável**. 3ª ed. São Paulo/Rio de Ambiente, 2006. 128 p.

- FERRARI, E.A. Desenvolvimento da agricultura familiar: a experiência do CTA-ZM. In: ALVARES, V. H; FONTES, L.E.F; FONTES, M.P.F (eds), O Solo nos Grandes Domínios Morfoclimáticos do Brasil e o Desenvolvimento Sustentado, p. 233-250. JARD, Viçosa, BR. 1996.
- FUKUOKA, M. **Agricultura Natural: teoria e prática da filosofia verde**. Nobel, 1995.
- FUKUOKA, M. **La revolución de una brizna de paja**. EcoHabitar, 2011.
- GLIESSMAN, S. Transforming food systems with agroecology. **Agroecology and sustainable food systems**, v. 40, n. 3, p. 187-189, 2016.
- GOMES, L. C., BIANCHI, F. J. J. A., CARDOSO, I. M., FERNANDES, R. B. A., FERNANDES FILHO, E. I., & SCHULTE, R. P. O. (2020). Agroforestry systems can mitigate the impacts of climate change on coffee production: a spatially explicit assessment in Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 294, 106858.
- HOLLIDAY, O. J. **Para sistematizar experiências**. 2º ed. Brasília: Ministério do Meio IEF. **Parque Estadual Serra do Brigadeiro**. Disponível em: <http://www.ief.mg.gov.br/component/content/197?task=view>. Acesso em: 10 de maio de 2022.
- KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Geonomos**. v. 5, n. 1. p. 17-40, 1997.
- MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução normativa nº 46, de 06 de outubro de 2011. Lei nº 10831, de 23 de dezembro de 2003. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 06 outubro. 2011. Seção 1, p. 8.a. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2003/110.831.htm> acesso em 10 de julho de 2022.
- MEURER, E.J. Fatores que influenciam o crescimento e o desenvolvimento das plantas. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., H.V., BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B. & NEVES, J.C.L., eds. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.65-90.
- PARTELLI, F. L.; COVRE, A. M.; OLIVEIRA, M. G.; ALEXANDRE, R. S.; VITÓRIA, E. L. da; SILVA, M. B. da. Root system distribution and yield of ‘Conilon’

coffee propagated by seeds or cuttings. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 5, p. 349-355, 2014.

SHUMEI. **Natural Agriculture Shumei**. Disponível em:

<https://shumeinaturalagriculture.com/pt/about/>. Acesso em: 10 de maio de 2022.

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

SILVA, J. P., TEIXEIRA, R. D. S., DA SILVA, I. R., SOARES, E. M., & LIMA, A. M. Decomposition and nutrient release from legume and non-legume residues in a tropical soil. **European Journal of Soil Science**, v. 73, n. 1, p. e13151, 2022.

SMITH, E. **Using secondary data in educational and social research**. 1st ed. Open University Press, 2008.

SOUZA, H.N.; CARDOSO, I.M.; DE SÁ MENDONÇA, E.; CARVALHO, A.F.; DE OLIVEIRA, G.B.; GJORUP, D.F.; BONFIM, V.R. Learning by doing: A participatory methodology for systematization of experiments with agroforestry systems, with an example of its application. **Agroforestry systems**. 2012, 85, 247–262.

SOUZA, H.N.; CARDOSO, I.M.; FERNANDES, J.M.; GARCIA, F.C.P.; BONFIM, V.R.; SANTOS, A.C.; CARVALHO, A.F.; MENDONÇA, E.S. Selection of 49 native trees for intercropping with coffee in the Atlantic Rainforest biome. **Agroforestry Systems**, v.80, p.1-16, 2010.

TEIXEIRA, H. M., BIANCHI, F. J., CARDOSO, I. M., TITTONELL, P., & PENA-CLAROS, M. (2021). Impact of agroecological management on plant diversity and soil-based ecosystem services in pasture and coffee systems in the Atlantic forest of Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 305, 107171

TEIXEIRA, H.M.; VERMUE, A.J.; CARDOSO, I.M.; PEÑA CLAROS, M.; BIANCHI, F.J.J.A. Farmers show complex and contrasting perceptions on ecosystem services and their management. **Ecosyst. Serv.** 2018, 33, 44–58.

VALCARCEL, R., VALENTE, F. D. W., MOROKAWA, M. J., CUNHA NETO, F. V., & PEREIRA, C. R. Avaliação da biomassa de raízes finas em área de empréstimo

submetida a diferentes composições de espécies. **Revista Árvore**, v. 31, p. 923-930, 2007.

VERDEJO, M. E. **Diagnóstico Rural Participativo – Guia Prático**. Brasília: Ministério de Desenvolvimento Agrário. Secretaria da Agricultura Familiar, 2010. 62 p.

ZANELLI, F. V. (2009). **Agroecologia e construção de territorialidades: um estudo sobre a criação da Escola Família Agrícola Puris de Araponga-MG**. Monografia, Geografia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

ZANELLI, F. V. SILVA, L. H. D. Intercâmbios agroecológicos: processos e práticas de construção da agroecologia e da Educação do Campo na Zona da Mata Mineira. **Perspectiva**, Florianópolis, v. 35, n. 2, p. 638-657. 2016.

VALVERDE, Orlando. Estudo regional da Zona da Mata de Minas Gerais. **Revista brasileira de geografia**, v. 20, n. 1, p. 1-82, 1958.

IBGE Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística. Censo Agropecuário 2006; IBGE: Rio de Janeiro, Brazil, 2017.

PLOEG, J. D. van der. (2009). **Sete teses sobre a agricultura camponesa**. In: Agricultura familiar camponesa na construção do futuro. Número Especial, pp. 17-32.

SOUSA, R. da P.; MARTINS, Sérgio R. Construção do conhecimento agroecológico: desafios para a resistência científico-acadêmica no Brasil. **Costa Gomes, JC; Assis, WS de. Agroecologia: princípios e reflexões conceituais**. Brasília: EMBRAPA, 2013.

6. ANEXOS

ANEXO 1: Roteiro de questões desenvolvidas a partir da matriz de sistematização, utilizadas na reconstrução da história do agricultor.

Manejo da adubação

1.1 Qual é o histórico de adubação das áreas? como se deu o processo de transição para o sistema natural? Há quanto tempo cada tipo de manejo é/foi adotado?

1.2 Como é feita a adubação dos talhões atualmente?

1.3 Quais resíduos são utilizados na adubação? (café, vegetação nativa, bananeira, amendoim forrageiro) Quais benefícios?

1.4 Qual melhor momento para retirada da serapilheira? Qual momento de se realizar as podas para produção de biomassa?

1.5 Qual impacto da adubação natural na sua propriedade/produktividade/vida/região/vizinhos.

Fauna do Solo

2.1 Como a fauna do solo se alterou ao longo do tempo? (cupins, minhocas, gongolo, formigas etc.)

2.2 Como as técnicas de manejo afetam a fauna do solo?

2.3 Como o uso da biomassa influencia a fauna do solo?

2.4 Quais são espécies você considera boas e ruins para o sistema? Quais indicadores você utiliza para avaliar a fauna do solo?

2.5 Como a fauna do solo influencia o solo e as plantas?

Qualidade do Solo

3.1 A qualidade do solo melhorou ao longo do tempo? Como você observou isso?

3.2 Como as técnicas de manejo afetam a qualidade do solo? (textura, retenção de água, agregação, desenvolvimento de raiz)

3.3 Como o uso da biomassa influencia a qualidade do solo? (textura, agregação etc.)

3.4 Como você sabe se o solo está bom?

3.5 Qual o impacto da agricultura natural na qualidade do solo?

Produtividade

- 4.1 Qual a produtividade de café nos últimos anos? qual a idade de cada talhão?
- 4.2 Quais técnicas de manejo são utilizadas na produção de café? (correção do solo, podas, fitossanidade, colheita etc.); como o manejo adotado afeta a produção do café?
- 4.3 Como o uso da biomassa influencia a produção de café?
- 4.4 Como identificar se a produtividade será boa? Como identificar se o café está saudável?
- 4.5 Qual o impacto da agricultura natural na produção de café?

Parcerias

- 5.1 Quais certificadoras você já trabalhou? Com quais cooperativas você já trabalhou? Quais foram/são seus parceiros (produção/comercialização)? Como é essa relação? Tempo entre vistorias, frequência de contato etc.
- 5.2 Como as parcerias influenciaram no manejo adotado? Quem ajuda na colheita e no manejo em geral?
- 5.5 Qual o impacto dos atores e parcerias no processo de transição e na sua produção/comercialização? (certificadoras, cooperativas, pesquisadores, professores etc.)

Políticas Públicas

- 6.1 Quais políticas públicas foram e são acessadas?
- 6.5 Como as políticas públicas influenciaram seu processo de transição e influenciam sua produção/comercialização? Quais suas atuais demandas/carências?

Agrobiodiversidade

- 1.7 Como a agrobiodiversidade e recursos naturais se alteraram com o tempo? Como foi a seleção das árvores para compor os talhões?
- 2.7 Quais espécies são utilizadas? Por que são utilizadas? Quais os benefícios? (quebra vento, poda, atrai inimigo natural, ciclagem)
- 3.7 Quais espécies são utilizadas para produção de biomassa?
- 4.7 O que as plantas da sua propriedade te dizem sobre o solo e o ambiente?
- 5.7 Como o manejo natural afeta a biodiversidade? Como a agrobiodiversidade afeta os plantios?

ANEXO 2. Descrição dos talhões de cafezais manejados sob agricultura natural na propriedade Sítio Pedra Redonda.

Talhão	Ano da Implantação¹	Nº de plantas	Espaçamento (m)	Variedade utilizada	Adubação antes da transição	Ano de transição²	Tempo de manejo natural
SOL DA MANHÃ	1999	1500	2,3 x 1,0	Catuai vermelho	Até 2002: adubo químico. Em 2003 tornou-se orgânico: Esterco de boi, cama de frango, torta de mamona, farelo de osso.	2018	5 anos
CAFÉ NOVO	2013	2.500	2,8 x 1,20	Catuai vermelho	Sistema orgânico desde implantação: Cama de frango e esterco de boi.	2019	4 anos
CURRAL	2001,2002	1800	2,3 x 1,2	Catuai vermelho	Sistema orgânico desde implantação: Esterco de boi e uma aplicação de cama de frango	2018	5 anos
BOURBON 1	2015	500	3 x 1	Bourbon	Sistema orgânico desde a implantação: Cama de frango e farelo de osso.	2020	3 anos
CATIGUÁ 6	2018	1800	2 x 1	Catiguá	Sistema orgânico desde a implantação: Cama de frango	2020	3 anos
CATIGUÁ 7	2018	1500	2,3 x 1,2	Catiguá	Sistema orgânico desde a implantação: Farelo de osso	2020	3 anos
BOURBON 2	2018	900	4,5 x 1,5	Bourbon	Sistema orgânico desde a implantação: Cama de frango	2020	3 anos
NATURAL	2000	800	2,3 x 1,2	Catuai vermelho	Sistema orgânico desde a implantação: Esterco de boi	2014	9 anos
ARARAS	2021	1000	4,5 x 1,5	Araras	Já iniciou no processo de manejo natural	-	1 ano

¹Plantio do café é sempre realizado em dezembro do ano citado. ²Ano em que não houve mais intervenção em relação a adubação e passou para manejo natural. É necessário 1 ano de manejo entre sistema orgânico e natural para que se possa começar a comercializar, com isso foi contabilizado o momento da transição. Observação: Todos com transição em 2020 ainda não foi comercializado como natural.

CAPÍTULO 2

CONTRIBUIÇÃO DE MATERIAIS VEGETAIS PARA A FORMAÇÃO DA
MATÉRIA ORGÂNICA E LIBERAÇÃO DE NUTRIENTES EM SOLOS DE ÁREAS
MANEJADAS SOB PRINCÍPIOS DA AGRICULTURA NATURAL

CHAPTER 2

CONTRIBUTION OF PLANT MATERIALS TO THE FORMATION OF ORGANIC
MATTER AND RELEASE OF NUTRIENTS IN SOILS MANAGED UNDER THE
PRINCIPLES OF NATURAL AGRICULTURE

RESUMO

A agricultura natural tem como um dos preceitos a utilização de materiais vegetais. Tais materiais contribuem para o fornecimento de nutrientes, e contribuem para a formação da matéria orgânica do solo (MOS), transferindo energia e C para o sistema solo nos diversos níveis tróficos. Em adição, a capacidade que o solo tem de reter a MOS formada, poderá influenciar o processo de estabilização da MOS. Desse modo, o presente capítulo teve como objetivos: (i) avaliar o potencial de materiais vegetais de distintas composições bioquímica na liberação de nutrientes. (ii) avaliar o potencial de materiais vegetais de distintas composições bioquímica para a formação da matéria orgânica do solo e estabilização da MOS; (iii) avaliar como o déficit de saturação de C afeta a estabilização da MOS. Para tanto, foi montado um experimento de incubação dos materiais vegetais no solo em condições controladas. Os tratamentos foram definidos por esquema fatorial (2x5x4) + 2, assim representados: i) dois solos com déficits de saturação de carbono distintos ii) cinco materiais vegetais: serapilheira da vegetação nativa e resíduos culturais de tambu, bananeira, amendoim forrageiro e margaridão; e iii) quatro tempos de avaliação (aos 0,04; 0,08; 0,25; 0,49 ano após incubação, além de dois tratamentos adicionais de solo sem resíduo (com déficits de C distintos). Os tratamentos foram distribuídos em delineamento com blocos incompletos, com fatorial adicional e com quatro repetições. Para o estudo foram avaliados a massa de matéria seca remanescente (MSR) aos 0,04; 0,08; 0,25; 0,49 ano após o início da incubação, estimando a taxa de decomposição e os valores de meia-vida dos materiais. Os teores de macro e micronutrientes presentes nos resíduos foram determinados nos quatro tempos de avaliação. Os modelos descrevendo a cinética de MSR e quantidade liberada (QL), ao longo do tempo foram ajustados por meio de regressões. O fracionamento físico do solo para a separação da MOP e MOAM foi realizado aos 0,49 ano após a incubação e foram avaliadas as mudanças no déficit de C dos solos. De maneira geral houve maior liberação de nutrientes em solos provenientes da profundidade de 0-20cm. O tempo de incubação bem como a composição dos resíduos regulam a liberação de nutrientes. Os diferentes níveis de saturação de C no solo interferiram apenas na liberação de N, não afetando os demais macronutrientes. O amendoim forrageiro e a bananeira foram os resíduos que mais contribuíram com a mineralização de N, P, K e Ca, e o tambu foi o que mais contribuiu para mineralização de Mg. A serapilheira foi o resíduo que menos mineralizou nutrientes, indicando uma possível imobilização. Quanto ao solo que não recebeu resíduo, houve redução de C-MOP, C-MOAM e N-MOP quando comparados aos teores iniciais.

Palavras-chave: Agricultura natural, Ciclagem de nutrientes, Matéria orgânica do solo.

ABSTRACT

Natural agriculture advocates for the use of vegetative materials as one of its precepts. Such materials contribute to nutrient supply and aid in the formation of soil organic matter (SOM), transferring energy and carbon to soil systems at various trophic levels. Additionally, the soil's capacity to retain formed SOM may influence the stabilization process of SOM. Thus, this chapter aimed to: (i) assess the potential of vegetative materials with different biochemical compositions in nutrient release; (ii) evaluate the potential of vegetative materials with different biochemical compositions for the formation of soil organic matter and SOM stabilization; (iii) assess how carbon saturation deficit affects SOM stabilization. For this purpose, an incubation experiment of vegetative materials in soil under controlled conditions was set up. Treatments were defined by a factorial scheme (2x5x4) + 2, as follows: i) two soils with different carbon saturation deficits; ii) five vegetative materials: forest litter and crop residues of tambu, banana, forage peanut, and giant sensitive plant; and iii) four evaluation times (at 0.04, 0.08, 0.25, and 0.49 years after incubation initiation), in addition to two additional treatments of soil without residue (with two different carbon deficits). Treatments were distributed in incomplete block designs, with an additional factorial and four replications. For the study, remaining dry matter (RDM) mass was evaluated at 0.04, 0.08, 0.25, and 0.49 years after the start of incubation, estimating decomposition rate and material half-life values. Macro and micronutrient contents present in residues were determined at the four evaluation times. Models describing the kinetics of RDM and released quantity (RQ) over time were adjusted using regressions. Physical soil fractionation for separation of particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MOM) was performed at 0.49 years after incubation, and changes in soil carbon deficit were evaluated. Overall, there was greater nutrient release in soils from the 0-20cm depth. Incubation time and residue composition regulate nutrient release. Different levels of soil carbon saturation only interfered with nitrogen release, not affecting other macronutrients. Forage peanut and banana were the residues that contributed most to the mineralization of nitrogen, phosphorus, potassium, and calcium, while tambu contributed most to magnesium mineralization. Forest litter was the residue with the lowest nutrient mineralization, indicating possible immobilization. When the soil received no residue, there was a reduction in POM-C, MOM-C, and POM-N compared to initial levels.

Keywords: Natural agriculture. Nutrient cycling. Soil organic matter.

1. INTRODUÇÃO

A saúde do solo e das plantas estão intrinsecamente articuladas e dependem do aporte de resíduos para alimentar a vida do solo e manter a sua fertilidade. Em especial em manejos sob os princípios da agricultura natural. Compreender o papel dos resíduos na transferência de carbono e nutrientes para diferentes frações da matéria orgânica do solo é importante porque estes sistemas são livres de qualquer aporte externo de nutrientes, então entender a dinâmica de seus resíduos pode indicar caminhos para o manejo sustentável dos solos.

A base da Agricultura Natural é o solo. O revolvimento não é uma prática utilizada pois acredita-se que a exposição de suas camadas profundas compromete sua vitalidade. Na agricultura natural, a biomassa vegetal é fornecida para o suprimento de nutrientes e cobertura, as plantas espontâneas são incorporadas para formação de matéria orgânica do solo; não faz uso de agrotóxicos, adubos químicos e esterco de origem animal (FUKUOKA, 1985) e presa pelo uso de insumos produzidos na unidade produtiva e de origem exclusivamente de materiais vegetais. Este manejo do solo fortalece os processos biológicos, com o menor gasto de energia possível (TATSUMI et al., 2023). Os materiais vegetais contribuem para o fornecimento de nutrientes, para a formação e estabilização da matéria orgânica do solo (MOS) e para a transferência de energia para os sistemas solo nos diversos níveis tróficos.

O fortalecimento de práticas que contribuem para menor dependência de insumos externos, e manutenção ou aumento da quantidade de matéria orgânica no solo é fundamental sob diversos aspectos. Em âmbito global, tais práticas contribuem para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera e, portanto, para o enfrentamento das mudanças climáticas. A MOS representa o maior reservatório de carbono da Terra (COTRUFO et al., 2015) e os GEE podem ser oriundos da utilização de fertilizante minerais, calcário e da decomposição da matéria orgânica do solo, dentre outras práticas agrícolas. O fornecimento de nutrientes, de matéria orgânica e de energia *in situ* para os diversos níveis tróficos contribuem para o aumento da capacidade produtiva do sistema, pela melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e para a saúde dos agroecossistemas como um todo (CONTRUFO & LAVALLEE, 2022).

A dinâmica dos processos de formação da MOS pode ser influenciada pela quantidade e qualidade de resíduo orgânico, como por exemplo pela sua composição bioquímica; pelo efeito do resíduo orgânico na MOS nativa; pela capacidade que o solo possui em armazenar C (SIX et al., 2002) pelas condições edafoclimáticas; pela atuação dos organismos presente no solo através dos processos de fragmentação e decomposição e mineralização dos resíduos (GERSCHLAUER et al., 2019).

As taxas de decomposição e mineralização são controladas principalmente por condições ambientais do solo o que incluem umidade adequada, aeração e temperatura, que deve estar entre 25 e 35°C (BRADY & WEIL, 2009; TAVARES et al., 2008,) e pela qualidade dos resíduos adicionados, principalmente pelas concentrações de Nitrogênio (N) e de compostos orgânicos como a lignina, hemicelulose e celulose (de CARVALHO et al., 2012). As ligninas e polifenóis são mais resistentes e as proteínas mais susceptíveis à decomposição (BRADY & WEIL, 2009). Materiais vegetais com baixa relação C/N, baixa relação N/Lignina com mais presença de açúcares, amidos e proteínas simples são considerados mais lábeis, de rápida degradação. Ao contrário, o material vegetal é considerado recalcitrante quando apresentam baixas taxas de decomposição e altas quantidades relativas de resíduos remanescentes (PRESCOTT; VESTERDAL, 2021).

Na agricultura, estas características são importantes pois, determinam o material a ser utilizados como adubos orgânicos e determinam a disponibilidade de nutrientes para as plantas (WANG et al., 2021). Uma relação C/N adequada geralmente resulta em uma liberação mais eficiente de nutrientes para as plantas, enquanto uma relação C/N inadequada pode levar a limitações nutricionais. Embora a lenta decomposição de materiais vegetais desfavoreça a liberação de nutrientes, ela favorece a acumulação dos materiais no solo, o que pode contribuir para uma melhor proteção, menor perda por erosão, e maior umidade no solo (da SILVA et al., 2022; TAVARES et al., 2008).

Estas características são importantes no momento de escolha das plantas que compõem sistemas diversificados como os sistemas agroflorestais, pois o fornecimento de nutrientes e contribuição para qualidade do solo como um todo é importante. Entretanto, outras características devem ser observadas, para a manutenção dos cultivos e outros benefícios que sejam interessantes para o agricultor.

Os sistemas agroflorestais, por definição possui, o componente arbóreo (GASSNER; DOBIE, 2022). Nestes sistemas as árvores são escolhidas de acordo com as funções que exercem, mas em sinergia com os demais componentes dos sistemas agroflorestais (SOUZA et al., 2010).

O guatambu ou tambu (*Aspidosperma parvifolium*), uma espécie arbórea, tem sido utilizada em uma propriedade na Zona da Mata Mineira, em sistemas agroflorestais conduzidos sob os princípios da Agricultura Natural. A árvore possui porte médio, podendo atingir até 15m de altura (LORENZI, 2002), sua produção de biomassa é alta devido conteúdo elevado de carbono em suas folhas e caules. Sua relação C/N é 51,5 e a relação Lignina/N é de 39,4, aproximadamente. Quando a relação C/N é maior que 28,7 e a relação Lignina/N é maior que 5, tem-se uma menor taxa de decomposição e mineralização (DUARTE et al., 2013; PALM et al., 2001). Embora a lenta decomposição dificulte a liberação de nutrientes, o acúmulo de material vegetal no solo pode contribuir para uma melhor proteção do solo (TAVARES et al., 2008).

Plantas de porte herbáceo e arbustivo também tem sido frequentemente utilizada em sistemas agroflorestais. As herbáceas de crescimento rápido desempenham funções essenciais nos sistemas agroflorestais devido ao seu crescimento rápido, em especial de cobertura do solo. Devido ao ciclo de vida anual, essas plantas são manejadas e incorporadas ao solo, o que acelera a ciclagem de nutrientes e resulta na disponibilização mais rápida de nutrientes para as plantas em relação às espécies arbóreas. Dentre as herbáceas utilizadas nos sistemas agroflorestais, encontram-se o Amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*) e a Bananeira (*Musa sp.*).

O amendoim forrageiro é uma planta leguminosa, herbácea nativa do Brasil, muito utilizadas como cobertura viva do solo, com capacidade de associação com bactérias do gênero *Rhizobium* (NASCIMENTO, 2006; RAMOS et al., 2010) e estabelecimento rápido no sistema agroflorestal. O amendoim forrageiro apresenta elevados níveis de N e Potássio (K), e baixa relação C/N (14,6 aproximadamente), por isto seus resíduos são mais facilmente decompostos, permitindo um fornecimento mais rápido dos nutrientes para o solo e para plantas (DA SILVA et al., 2022).

A bananeira é uma planta herbácea, muito exigente em nutrientes, principalmente o K. No manejo de resíduos para adubação a bananeira é uma excelente opção pois é aproveitada todas as partes: folhas, pseudocaulos, rizomas e até mesmo os frutos perdidos por ocasião da colheita (BRITO et al., 2017). Por ser rica em água o material de bananeira proporciona umidade do solo e serve como abrigo para organismos do solo.

O Margaridão (*Tithonia diversifolia*) é uma planta arbustiva, podendo chegar até dois metros de altura, que possui muitas características citadas importantes para os Sistemas Agroflorestais. Ela se propaga com bastante facilidade em áreas como encostas com grande inclinação, possui grande capacidade de rebrota, é resistente a podas sucessivas e

de fácil manejo. A espécie é excelente fonte de N, K, Cálcio (Ca), Zinco (Zn) e Manganês (Mn) (JAMA et al., 2000) e possui flores que atrai muitos polinizadores.

Além da biomassa de plantas, a serapilheira da vegetação nativa é também muito utilizada nessa propriedade conduzida sob os princípios da agricultura natural. O agricultor relatou que a serrapilheira enriquece o solo com microrganismos da vegetação nativa que são benéficos para decomposição dos demais resíduos utilizados. Além disso, é uma forma de cobertura do solo eficiente pois, estes resíduos já foram fragmentados e encontram-se em fase avançada de decomposição, onde os materiais mais lábeis foram decompostos e a massa seca remanescente é constituída por componentes recalcitrantes, que permanecem mais tempo no solo. Esse material fragmentado, contribui para Matéria Orgânica Particulada (MOP), em uma escala de tempo menor, e a longo prazo contribui para formação de frações da matéria orgânica mais estáveis, a exemplo da Matéria Orgânica Associada a Minerais (MOAM).

A MOP e MOAM são frações da matéria orgânica do solo que se diferenciam em seus componentes e formação. A MOP é formada por materiais fragmentados, visíveis enquanto a MOAM são materiais microscópicos muitas vezes transformados quimicamente pela biota do solo (LAVALLEE; SOONG; COTRUFO, 2020). A MOAM é mais protegida da decomposição através da associação com minerais de argila e silte do solo, com tendência a persistir mais tempo no solo em relação a MOP (POEPLAU et al., 2018; TOTSCHKE et al., 2018).

Portanto, o carbono na MOAM, associado as frações silte e argila, tem maior estabilidade, mas com um nível de acumulação de carbono. A capacidade máxima de reter carbono (Nível de Saturação de Carbono, NSC) é um indicador importante da saúde do solo e da capacidade do solo de sequestrar carbono atmosférico (HASSINK; WHITMORE, 1997; STEWART et al., 2008).

Estudos vem sendo realizados em sistemas agroflorestais com objetivo de avaliar a produção, acúmulo, decomposição, teores de nutrientes e qualidade de serapilheira de espécies arbóreas e arbustivas (FREITAS et al., 2016; JARAMILLO-BOTERO et al., 2008; REBÊLO et al., 2022), mas poucos trabalhos avaliaram essas mesmas características para a serapilheira da vegetação nativa que é aplicada em sistemas agrícolas.

A influência dos materiais vegetais na formação de matéria orgânica do solo com diferentes texturas, em sistemas agrícolas convencionais e em sistemas agroflorestais tem sido muito estudada (DA SILVA et al., 2022; DUARTE et al., 2013; GAMA-

RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES; BRITO, 2007; MALUF et al., 2015a; SOUZA et al., 2012). Contudo, trabalhos que avaliam esta influencia em sistemas agroflorestais sob os princípios da agricultura natural nunca foi feito. Além disto, o nível de déficit saturação de carbono do solo (DSC: o que falta para chegar ao NSC), ainda são incipientes, em especial quando associados a manejos onde há aportes contínuos de materiais ao longo do tempo.

A pesquisa objetivou responder as seguintes perguntas são: i) Como a composição bioquímica distinta dos resíduos contribui de formas diferenciadas para a dinâmica do C no solo e para a transferência de C para as frações da MOS? ii) Como o nível de saturação de C afeta a estabilização da MOS?

2. METODOLOGIA

2.1 Coleta dos materiais vegetais e solo

A coleta de solos e de resíduos vegetais para a realização do experimento de incubação foi realizada em área sob cafezais em Sistemas Agroflorestais (SAFs), manejados sob os princípios da Agricultura Natural, em Araponga, Minas Gerais. Situada na Zona da Mata mineira, no Sudeste de Minas Gerais, a região é caracterizada por um mosaico de fragmentos de vegetação intercalados com pastagens e áreas de café (GOMES et al., 2020). Os solos predominantes são Latossolos Vermelho-amarelo, altamente intemperizados (KER, 1997). A geomorfologia é montanhosa, com declives de até 45% e altitude variando de 200 a 1800 m. O clima é propício para o cultivo de café arábica, com temperatura média anual de 18 °C. A precipitação na região varia entre 1200 e 1800 mm anualmente (GOLFARI, 1975; DE CARVALHO et al., 2021)

A área de coleta, localizada no sítio Pedra Redonda, é uma propriedade familiar próxima ao Parque Estadual da Serra do Brigadeiro. A propriedade, situada a 1200 m de altitude, abrange 12 hectares, dos quais 7 hectares são dedicados ao cultivo de café, 5 hectares são de vegetação nativa, áreas em pousio e pastagem, manejadas segundo os princípios da agricultura natural. Os cafezais estão dispostos em talhões consorciados com árvores nativas, frutíferas e espécies anuais para consumo familiar e comercialização. O talhão de café escolhido para coleta do solo foi uma lavoura de café com 22 anos de idade. Desde a implantação até 2013, o cafezal foi manejado de forma orgânica, utilizando-se esterco bovino como adubação e com a incorporação dos resíduos de poda de café, de árvores e plantas espontâneas presentes no talhão. Em 2014, iniciou-se a transição para a agricultura natural, com o uso exclusivo de resíduos vegetais (podas

de árvores e arbustos, roçagem de herbáceas e uso de serrapilheira), eliminando o uso de insumos de origem animal como fonte de adubação. No momento da amostragem do solo, o talhão apresentava 9 anos de manejo sob os princípios da agricultura natural.

A serrapilheira usada para o estudo de incubação foi coletada na vegetação natural, próxima a propriedade e da forma como é coletada em campo pelo agricultor. No momento da coleta foi possível notar que o material estava em estágio de decomposição avançada, com partes fragmentadas e com pequenas raízes aderidas à serrapilheira, o que pode indicar colonização de alguns organismos.

Para o experimento foram coletados solos na profundidade de 0-10 cm com menor déficit de saturação de carbono (<DSC) e de 10-20 cm com maior déficit de saturação de carbono (>DSC) da mesma área, para compor um gradiente com diferentes teores de carbono (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização química e física do solo utilizado no experimento

Propriedades/profundidade (cm)	Menor DSC	Maior DSC
pH em H ₂ O	5,70	5,51
COT (g kg ⁻¹)	61,83	41,03
NT (g kg ⁻¹)	5,08	3,06
P (mg dm ⁻³)	3,75	2,00
K (mg dm ⁻³)	187,5	117,50
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	4,72	1,44
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	2,05	0,58
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,00	0,27
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	8,40	8,75
SB (cmol _c dm ⁻³)	7,25	2,32
t (cmol _c dm ⁻³)	725	2,59
T (cmol _c dm ⁻³)	15,65	11,07
V (%)	46,55	20,85
m (%)	0,00	13,70
P-rem (mg l ⁻¹)	17,30	11,00
Areia grossa (kg kg)	293	239
Areia fina (kg kg)	132	143
Silte (kg kg)	71	72
Argila (kg kg)	500	550
Classe textural	Argilo arenosa	Argilosa

pH em água. Carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) obtidos através da proporção dos teores de C e N nas frações MOP e MOAM, determinados em espectrômetro de massa da razão isotópica (IRMS). P e K - Extrator Mehlich-1. Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺ - Extrator: KCl 1 mol/L. H + Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L a pH 7,0. SB - Soma de bases trocáveis. t - Capacidade de troca de catiônica efetiva. T - Capacidade de troca de catiônica a pH 7,0. V - Índice de saturação por bases. m - Índice de saturação por

alumínio. P-rem – Fósforo remanescente. Classificação textural de acordo com (Quirijn de Jong van Lier, 2010).

Os solos apresentaram uma assinatura isotópica do $\delta^{13}\text{C}$ variando entre -27,37 à -25,94, a depender das frações (Tabela 2). Assinaturas isotópicas variando entre -34 a -20 são oriundas de plantas com metabolismo fotossintético C_3 , e marcações que variam de -17 a -9 são oriundas de plantas com metabolismo C_4 (ROSSMANN, 2001). A assinatura do solo estudado indica uma maior contribuição advinda das espécies de ciclo fotossintético C_3 , o que reflete os tipos dos resíduos manejados no sistema. Contudo, no passado, há 40 anos atrás essa mesma área era pastagem, onde havia criação de gado e o plantio de milho e feijão. Isso indica que todo o carbono oriundo da pastagem C_4 foram consumidos, refletindo naturalmente a mudança de uso da terra e a mudança no tipo de vegetação da área ao longo destes anos.

Tabela 2. Teores de C e N e composição isotópica das frações MOP e MAM do solo antes da incubação.

	Menor DSC		Maior DSC	
	MAM	MOP	MAM	MOP
Teores de C	39,91	21,92	30,92	10,11
Teores de N	3,48	1,60	2,41	0,65
$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	-26,08	-27,37	-25,94	-26,95

$\delta^{13}\text{C}$ (‰) foi determinado por meio de espectrômetro de massa da razão isotópica (IRMS).

Entre os resíduos vegetais utilizados para adubação das lavouras foram escolhidos cinco materiais para experimento de incubação, sendo estes: Serapilheira da vegetação nativa, Amendoim forrageiro (*A. pintoi*), Tambu (*A. parvifolium*), Bananeira (*Musa sp.*) e Margaridão (*T. diversifolia*). Os resíduos foram amostrados seguindo a mesma forma que o agricultor coleta para uso em suas lavouras. O agricultor acompanhou a amostragem. Posteriormente os materiais vegetais foram levados para laboratório onde foram secos em estufa de circulação forçada de ar a 60°C por 72h, e preparados para realização do experimento.

2.2 Experimento de incubação

Os resíduos vegetais foram incubados no solo sob condições controladas em uma incubadora B.O.D (25 ± 1 °C), nas dependências do laboratório de Matéria Orgânica e Resíduos da Universidade Federal de Viçosa (UFV). O solo utilizado para incubar foram os solos oriundos das duas profundidades (Tabela 1). Os tratamentos foram definidos por um esquema fatorial (2x5x5) + 2: i) solos com diferentes gradientes de carbono ii) Serapilheira da vegetação nativa e quatro resíduos vegetais – Amendoim forrageiro, Tambu Bananeira, Margaridão e iii) cinco tempos de avaliação (0, 0,04, 0,08, 0,25 e 0,49

ano) após o início da incubação. Dois solos sem resíduo (um de cada profundidade) foi incubado para controle (fatorial adicional). Os tratamentos foram distribuídos em delineamento em blocos incompletos, com fatorial adicional, com quatro repetições.

Para incubar, as amostras de solo foram secas ao ar (TFSA) e 150 g de cada amostra foram colocadas em recipientes de polietileno (considerado Unidade Experimental – UE) com tampa, de 11 cm de diâmetro e capacidade de 500 ml cada. Após colocada nos recipientes, a umidade do solo foi corrigida para 60 % da capacidade de campo. Os resíduos vegetais foram fragmentados manualmente em partículas de 1 a 2 cm e distribuídos sobre uma tela de polietileno ($\varnothing = 2$ mm) previamente posicionada na superfície do solo no interior dos recipientes, a fim de facilitar a desmontagem das unidades experimentais para a remoção dos resíduos vegetais para posterior avaliação. Os resíduos foram umedecidos com 10 mL de água antes de serem levados para incubação. Para favorecer as trocas gasosas e evitar a redução da concentração de O_2 no interior dos recipientes, eles foram abertos a cada 2 dias, durante 15 minutos. Para evitar a perda excessiva de umidade do resíduo e do solo, esses eram reumedecidos ocasionalmente. Um frasco de acrílico contendo 7 mL de água deionizada foi mantido em cada recipiente para auxiliar na conservação da umidade do resíduo e do solo.

O teor de C nos resíduos e no solo foi determinado. Uma quantidade de resíduo equivalente a 2 % de carbono foi utilizada em cada recipiente contendo 150 g de solo (Tabela 3).

Tabela 3. Composição de C dos resíduos e quantidade de resíduo utilizada em cada unidade experimental (UE).

Resíduos	Teor de C g /kg ⁻¹	Matéria seca g/UE
Serapilheira	357,1	8,5
Bananeira (<i>Musa sp.</i>)	388,7	7,8
Amendoim forrageiro (<i>Arachis pinto</i>)	375,7	8,1
Tambu ⁽¹⁾ (<i>Aspidosperma parvifolium</i>)	463,7	5,9
Margaridão ⁽²⁾ (<i>Tithonia diversifolia</i>)	409,4	7,8

⁽¹⁾ Valor total de resíduo utilizado, sendo 2,55 g de tronco e 3,35 g de folhas equivalente a 50 % de cada parte. ⁽²⁾ Valor total de resíduo utilizado, sendo 3,70 g de tronco e 4,10 g de folhas equivalente a 50 % de cada parte.

2.3 Avaliação dos resíduos vegetais e decomposição

A caracterização bioquímica inicial dos resíduos vegetais (Tabela 4) foi realizada pela determinação dos extrativos solúveis em acetona (ABTCP, 1974). Os resíduos livres

de extrativos foram utilizadas para determinação de lignina solúvel e insolúvel e holocelulose (HATFIELD et al., 1994; ZANUNCIO & COLODETTE, 2011).

Tabela 4. Características bioquímicas e químicas dos resíduos vegetais incubados em solos provenientes de sistema agroflorestal manejado sob os princípios da agricultura natural.

Propriedade g kg ⁻¹	Serapilheira	Bananeira	Amendoim forrageiro	Tambu	Margaridão
Extrativos					
Solúveis em Acetona	72,6	87,4	71,9	107,2	117,0
Holocelulose	389,5	658,0	731,0	583,7	670,1
Lignina Solúvel	43,8	56,3	75,9	45,5	35,7
Lignina Insolúvel	537,9	254,7	197,1	309,1	226,2
N	12,2	25,8	25,7	9,0	11,32
P	0,44	2,19	1,65	0,72	1,57
K	1,04	29,91	26,17	9,61	16,96
Ca	1,84	8,08	13,37	6,98	9,19
Mg	0,50	3,86	2,67	2,21	4,12
S	1,04	2,45	1,87	1,60	1,46
Zn	18,32	22,44	29,36	14,74	48,16
Cu	0,20	0,12	0,22	0,14	0,17
Fe	-	393,56	682,65	203,53	260,19
Mn	107,80	199,37	35,60	62,92	70,23
B	10,79	23,08	21,97	31,23	72,12
C/N	29,3	15,02	14,62	51,5	36,2
C/P	881,5	177,0	227,7	644,0	260,8
C/S	343,4	158,3	200,9	289,8	280,4
Lignina/N ⁽¹⁾	31,28	12,03	10,58	39,4	23,13
Lignina/P	867,5	141,73	165,45	492,5	166,81

Extrativos solúveis em acetona (ABTCP, 1974). Lignina solúvel, insolúvel e Holocelulose(ZANUNCIO; COLODETTE, 2011) N pelo Método Kjeldahl (BREMNER; MULVANEY, 1982). P (por Colorimetria), K (Fotometria de chama), Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn (por espectrometria de absorção atômica) (JOHNSON; ULRICH, 1959). ⁽¹⁾ Lignina total = soma da lignina insolúvel e lignina solúvel.

Os resíduos vegetais retirados das unidades experimentais após os devidos tempo de incubação (0,04; 0,08; 0,25; 0,49 ano) foram secos em estufa de circulação forçada de ar, a 60 °C por 72 h e pesados para obtenção da matéria seca remanescente. Depois de seco, os resíduos foram triturados em moinho do tipo Willey com malha de 1 mm e determinado o teor de N, após digestão sulfúrica pelo Método Kjeldahl (BREMNER; MULVANEY, 1982) e K, Ca, Mg, P, S, Zn e Cu, após digestão nitroperclórica na proporção de 3:1(JOHNSON; ULRICH, 1959). Com base nos teores de nutrientes e na matéria seca remanescente (MSR) foi realizado o calculado para o conteúdo dos nutrientes remanescentes (CNR) nos resíduos culturais.

As taxas de decomposição foram estimadas ajustando-se modelos de regressão não linear, de decaimento exponencial simples (OLSON, 1963); Equação (1) e duplo exponencial (BUNNELL & TAIT, 1974; LOUSIER & PARKINSON, 1976; O'CONNELL, 1987), Equação (2):

$$\text{MSR} = X_0^{-kt} \quad \text{Equação 1.}$$

em que MSR é a quantidade de matéria seca remanescente no tempo (t; dias); X_0 = matéria seca; k , ka , kb = constante de decomposição da matéria seca.

$$\text{MSR} = X_1^{-k't} + (X_0 - X_1)^{-k''t} \quad \text{Equação 2.}$$

em que X_1 é a quantidade de componente lábil presente nos resíduos, $X_0 - X_1$ é a quantidade do componente resistente e k' e k'' representam as constantes de decaimento dos componentes lábeis e resistentes.

A escolha do tipo de modelo foi feita com base no menor valor da soma dos quadrados do erro, significância dos parâmetros da equação e no maior valor do coeficiente de determinação (R^2) ajustado. A meia vida (tempo para ocorrer decomposição de 50% do material, $t_{0,5}$) dos resíduos foram calculados conforme a Equação 3.

$$t_{0,5} = \frac{-\ln(0,5)}{k} = \frac{0,693}{k} \quad \text{Equação 3}$$

em que $t_{0,5}$ é o tempo necessário para decomposição de 50 % da matéria seca do resíduo (PAUL & CLARK, 1989).

Além disso, o modelo foi ajustado para descrever a cinética de libertação de nutrientes dos resíduos (modelo quadrático; Equação (4)):

$$\text{CRN} = (\hat{y}) = X_0 - k_1t + k_2t^2 \quad \text{Equação 4.}$$

em que CRN é o teor de nutrientes remanescente nos resíduos, X_0 é o teor inicial de nutrientes, e os valores de k_1 e k_2 são parâmetros para a mineralização de nutrientes.

Calculamos ainda a quantidade liberada (QL) e a porcentagem liberada de cada nutrientes presente dos diferentes resíduos após 0,49 ano de incubação, usando as equações 5 e 6.

$$\text{QL} = \text{CI} - \text{CF} \quad \text{Equação 5.}$$

$$\% = (\text{CF} \times 100) / \text{CI} \quad \text{Equação 6.}$$

2.4 Avaliação do solo

Para avaliar a contribuição dos resíduos para as frações da matéria orgânica do solo (MOS) e a eficiência desses resíduos na transferência de C e N para o solo, o fracionamento físico granulométrico da MOS foi realizado, obtendo a MOP e a MOAM (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992), nos tempos de 0 e 0,49 ano após a incubação. Após o fracionamento físico granulométrico da MOS, as frações foram secas em estufa á 60°C até a completa secagem, moídas e pesadas. Foram determinados em espectrômetro de massa da razão isotópica (IRMS) os teores de C, N e $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$, presentes nas frações de cada amostra.

2.5 Estimativa do Nível de Saturação de C e Déficit de Saturação de C do solo

A estimativa do nível de saturação de carbono (NSC) do solo foi obtida através da adaptação do método de cálculo proposto por (SIX et al., 2002). Esta equação pode ser utilizada para inferir o total de carbono orgânico do solo (COS) retido na fração argila + silte em solos dominados por mineralogia 1:1, filossilicatos (por exemplo, Latossolos). A equação ajustada para determinar o nível de saturação de C é apresentada a seguir:

$$\text{NSC: } 4,932 + 0,20 \times (s + a), \quad \text{Equação 7}$$

em que, NSC representa o nível de saturação ou proteção de C (g Kg^{-1} de solo) estabilizado pelas frações silte e argila (C-MOAM em g Kg^{-1} de solo). Sendo (s + a) a fração <53 μm (silte + argila), expresso como uma porcentagem (%) da fração de terra fina.

A partir da estimativa do NSC foi estimado o déficit de saturação de carbono (DSC), obtida pela equação abaixo, conforme (SOUZA et al., 2017):

$$\text{DSC (\%)} = \frac{\text{NSC} - \text{COS}}{\text{NSC}} \times 100 \quad \text{Equação 8}$$

em que, COS é o carbono orgânico do solo real na fração argila + silte em (g Kg^{-1} de solo).

2.6 Análise Estatística

Os dados obtidos de MSR e QL dos resíduos foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro Wilk (p-valor < 0,05) e ao teste de homocedasticidade de Levene (p-valor < 0,05). Quando os pressupostos da estatística paramétrica não foram cumpridos, as variáveis foram transformadas. Para os dados de liberação de nutrientes foram ajustados pela transformação ordinal (Rank). Os dados foram submetidos análise de variância (ANOVA) pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade e as médias foram

comparadas pelo teste SNK a 5% de probabilidade, utilizando o programa SPEED Stat 3.0 (CARVALHO et al., 2020).

Os modelos que descrevem a cinética do MSR e do QL ao longo do tempo foram ajustados através de regressões utilizando o programa Sigma Plot versão 14.0 (Systat Software Inc., Chicago, OIL, EUA). Para a cinética da MSR, foi ajustado o modelo de decaimento exponencial simples com dois e três parâmetros para a maioria dos resíduos, exceto para a serapilheira, a qual foi ajustada o modelo de decaimento exponencial duplo com quatro parâmetros. Para a cinética de QL, foi ajustado o modelo quadrático.

Foi efetuada uma análise multivariada de componentes principais (PCA) na qual as variáveis relacionadas com a qualidade inicial dos materiais vegetais (extrativos solúveis em acetona, ESA; lignina solúvel, LS; lignina insolúvel, LI; holocelulose, HOLO) agrupados em componentes principais, através de combinações lineares com as demais variáveis (matéria seca remanescente, MSR; N, Nitrogênio; P, Fósforo; K, Potássio; Ca, Cálcio; Mg, Magnésio; Fe, Ferro; Mn, Manganês; Cu, Cobre; Zn, Zinco; B, Boro; S, Enxofre).

3. RESULTADOS

3.1 Decomposição de Resíduos Culturais

Houve interação significativa entre os fatores analisados (solo e resíduos). Ao comparar os resíduos com os solos de duas profundidades houve diferença significativa ($p < 0,05$) para o resíduo de amendoim forrageiro. A matéria seca aos 0,49 ano indica que na camada de 0-10cm houve maior decomposição do amendoim forrageiro em solos com menor conteúdo de carbono (Tabela 5).

Tabela 5. Matéria Seca Remanescente (MSR, %) aos 0,49 ano de resíduos vegetais incubados em solo proveniente de sistema agroflorestal manejado sob os princípios da agricultura natural em solos com menor (<DSC) ou maior (>DSC) Déficit de Saturação de Carbono.

	Serapilheira	Amendoim forrageiro	Tambu	Bananeira	Margaridão
Menor DSC	82,72 Aa	36,73 Ab	41,99 Ab	25,15 Ac	43,38 Ab
Maior DSC	73,05 Aa	21,57 Bd	51,23 Ab	28,15 Ad	40,78 Ac

<DSC ou >DSC: profundidade de 0-10 e 10-20 cm de profundidade, respectivamente. Médias seguidas da mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste Student-Newman-Keuls (SNK) a 5% de probabilidade de erro. A análise estatística foi efetuada após a transformação Box-Cox ($\lambda = 0,5$) ou não paramétrica. Médias apresentadas em escala original.

A decomposição dos resíduos em solos com diferentes DSC diferiu em ambas as profundidades do solo (Tabela 5). A maior decomposição foi dos resíduos de bananeira nas duas profundidades (com maior e menor DSC) e dos resíduos de amendoim forrageiro em condição com maior DSC (em maior profundidade), sendo que não houve diferença ($p>0,05$) na decomposição dos resíduos de bananeira e amendoim forrageiro na profundidade com maior DSC. O resíduo de Serapilheira apresentou menor decomposição ao longo do tempo, em ambas as profundidades, apresentando aproximadamente 83% e 73% de MSR (Figura 1).

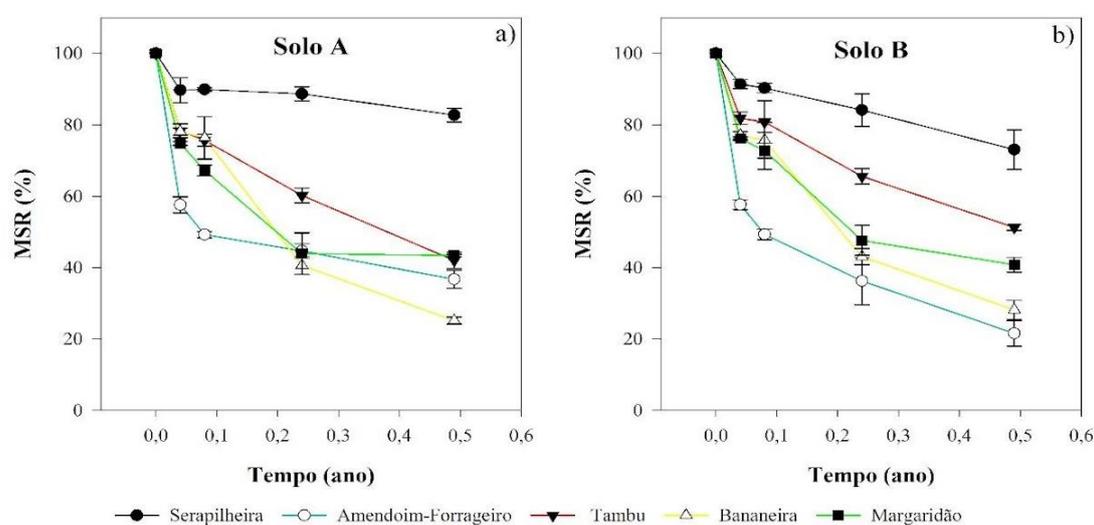


Figura 1. Matéria seca remanescente dos resíduos de Serapilheira, Amendoim forrageiro, Tambu, Bananeira e Margaridão durante o período de incubação (0; 0,04; 0,08; 0,24 e 0,49 ano após a incubação) em de duas profundidades de solo (a: profundidade 0-10 cm =Menor DSC; b: 10-20 cm = Maior DSC).

O modelo de decaimento exponencial simples ajustou-se bem para a maioria dos materiais vegetais, exceto para a serapilheira para os quais o modelo duplo apresentou melhor ajuste (Figura 1, Tabela 6; Material Suplementar 1 e 2).

Tabela 6. Equações ajustadas para decomposição dos resíduos e meia vida dos resíduos ($t_{0,5}$) em solo incubados em solo proveniente de sistema agroflorestal manejado sob os princípios da agricultura natural em solos com menor DSC ou maior DSC.

Menor DSC				
Resíduo	Equação	R ²	T _{0,5A} ^(a) (anos)	T _{0,5B} ^(b) (anos)
Serapilheira	$y = 8,8198^{ns(-509,3nsx)} + 91,1802^{ns(-0,1826nsx)}$	0,6450	0,001361	3,7952
Resíduo	Equação	R ²	T _{0,5} (anos)	

Amendoim forrageiro	$y = 41,2312 + 58,5183^{**}(-28,8386^{***})$	0,9585	0,0240
Margaridão	$y = 42,2909 + 57,0363^{**}(-11,7004^{***})$	0,9294	0,0592
Tambu	$y = 39,8063 + 55,8390^{**}(5,2580^{***})$	0,9221	0,132
Bananeira	$y = 95,7983^{**}(-3,1795^{***})$	0,9289	0,2180

Maior DSC				
Resíduo	Equação	R ²	T _{0.5A} ^(a) (anos)	T _{0.5B} ^(b) (anos)
Serapilheira	$y = 6,10^{ns}(-575857,1306^{nsx}) + 93,89^{ns}(-0,4997^{nsx})$	0,6424	0,000001	1,3868

Resíduo	Equação	R ²	T _{0.5} (anos)
Amendoim forrageiro	$y = 28,5465 + 70,0185^{**}(-17,4723^{***})$	0,8986	0,0397
Margaridão	$y = 40,1823 + 58,1049^{**}(-8,5297^{***})$	0,9035	0,0812
Tambu	$y = 48,7107 + 47,9001^{**}(5,1438^{***})$	0,8507	0,1348
Bananeira	$y = 94,3648^{**}(-2,9010^{***})$	0,9212	0,2389

^at_{0.5A}, é o tempo de decomposição de 50% do compartimento de resíduos mais lábeis. ^bt_{0.5B}, é o tempo de decomposição de 50% do compartimento de resíduos mais recalcitrantes.

Os resíduos de serapilheira apresentam diminuição da meia vida quando aplicados em solo com maior DSC (solos da profundidade 10-20cm), tanto para os resíduos mais lábeis, quanto para os mais recalcitrantes (Tabela 6). Os resíduos de bananeira, amendoim forrageiro e margaridão tendem a aumentar a meia vida quando aplicados em solo com menor DSC (solos da profundidade 0-10cm). O tambu por sua vez não apresenta alteração da meia vida em razão do DSC do solo.

3.2 Dinâmica de liberação de nutrientes

O DSC influenciou apenas na liberação de N, não afetando os demais nutrientes. A serapilheira foi o resíduo que menos contribuiu para a liberação dos nutrientes analisados, exceto o Fe, e apresentou valores negativos de liberação, o que indica uma possível imobilização de nutrientes, no tempo analisado. O amendoim forrageiro e a bananeira foram os resíduos que mais contribuem para liberação de N, P, K e Ca, e o tambu foi o que mais contribuiu para liberação de Mg.

Tabela 7. Valores médios da quantidade de nutrientes liberada (QL; em g) em 0,49 ano de resíduos, incubados em solo proveniente de sistema agroflorestal manejado sob os princípios da agricultura natural em solos com maior (Menor DSC: 0-10 cm) ou maior (Maior DSC: 10-20 cm) Déficit de Saturação de Carbono

Nitrogênio				
Serapilheira	Amendoim forrageiro	Tambu	Bananeira	Margaridão

Menor DSC	-0,006Ac	0,134Ba	0,004Ac	0,147Aa	0,030Ab
Maior DSC	0,004Ac	0,165Aa	-0,009Ac	0,150Aa	0,032Ab
Fósforo					
	Serapilheira	Amendoim forrageiro	Tambu	Bananeira	Margaridão
Menor DSC	0,000Ae	0,005Ab	0,001Ad	0,011Aa	0,003Ac
Maior DSC	0,000Ad	0,008Ab	0,001Ad	0,012Aa	0,003Ac
Potássio					
	Serapilheira	Amendoim forrageiro	Tambu	Bananeira	Margaridão
Menor DSC	-0,002Ad	0,182Aa	0,045Ac	0,191Aa	0,107Ab
Maior DSC	-0,001Ad	0,195Aa	0,043Ac	0,183Aa	0,103Ab
Cálcio					
	Serapilheira	Amendoim forrageiro	Tambu	Bananeira	Margaridão
Menor DSC	-0,034Ac	0,019Ab	0,005Ab	0,032Aa	0,007Ab
Maior DSC	-0,023Ad	0,062Aa	0,003Ac	0,040Aa	0,018Ab
Magnésio					
	Serapilheira	Amendoim forrageiro	Tambu	Bananeira	Margaridão
Menor DSC	-0,008Ad	0,005Ac	13,017Aa	0,019Ab	0,006Ac
Maior DSC	-0,005Ad	0,014Ac	13,017Aa	0,022Ab	0,010Ac
Enxofre					
	Serapilheira	Amendoim forrageiro	Tambu	Bananeira	Margaridão
Menor DSC	-0,001Ad	0,006Ab	0,003Ac	0,013Aa	0,004Ac
Maior DSC	-0,000Ad	0,009Ab	0,002Ad	0,014Aa	0,003Ac
Zinco					
	Serapilheira	Amendoim forrageiro	Tambu	Bananeira	Margaridão
Menor DSC	-0,016Ad	0,057Abc	0,020Acd	0,095Aab	0,118Aa
Maior DSC	-0,032Ab	0,123Aa	0,008Ab	0,106Aa	0,107Aa
Cobre					
	Serapilheira	Amendoim forrageiro	Tambu	Bananeira	Margaridão
Menor DSC	-0,02Ab	0,01Aa	0,01Aa	0,01Aa	0,01Aa
Maior DSC	-0,01Ab	0,05Aa	0,00Ab	0,01Ab	0,01Ab
Ferro					
	Serapilheira	Amendoim forrageiro	Tambu	Bananeira	Margaridão
Menor DSC	71,020Aa	-20,375Ac	-8,299Ab	-14,237Ac	-7,715Ab
Maior DSC	68,651Aa	-6,629Ab	-12,157Abc	-23,807Ac	-15,134Ac
Manganês					
	Serapilheira	Amendoim forrageiro	Tambu	Bananeira	Margaridão
Menor DSC	-0,403Ad	-0,129Bd	0,015Ac	1,074Aa	0,127Ab
Maior DSC	-0,359Ac	0,024Ab	-0,083Ac	1,115Aa	0,105Ab
Boro					
	Serapilheira	Amendoim forrageiro	Tambu	Bananeira	Margaridão
Menor DSC	0,034Ad	0,056Ba	0,084Ac	0,116Aa	0,296Ab
Maior DSC	-0,013Ad	0,102Aa	0,058Ac	0,110Aa	0,261Ab

Médias seguidas da mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste SNK a 5% de probabilidade de erro. A análise estatística para esta variável foi não paramétrica e efetuada após transformação ordinal (Rank). Médias apresentadas em escala original.

Em relação ao N, os resíduos de amendoim forrageiro e de bananeira, com maiores teores de N, foram os resíduos que mais contribuíram para N liberado, em ambas as profundidades. Os resíduos que menos contribuíram com mineralização de N foram serapilheira e tambu. O amendoim forrageiro liberou mais N em solos com menor teor de C (Maior DSC). A bananeira foi a que mais contribuiu para liberação de P em ambos os solos, seguido do amendoim forrageiro. A menor liberação de P foi observada para serapilheira, e tambu (solo com maior DSC).

Independente do DSC, todos os materiais vegetais contribuíram muito com liberação e K para o solo, sendo que amendoim forrageiro, bananeira e margaridão foram os que mais contribuíram para K liberado. Em solos com menor DSC, a bananeira liberou mais Ca. Para solo com maior DSC, a bananeira e amendoim forrageiro tiveram mineralização similar de Ca. Em ambos os solos o resíduo de tambu foi o que mais contribuiu com a liberação de Mg, representando 99,90% de liberação ao final da incubação. A bananeira foi o tratamento que mais contribuiu para liberação de S nos solos, independente do DSC.

O DSC influenciou a liberação de Manganês e Boro, não sendo significativa para Ferro, Cobre e Zinco. O amendoim forrageiro foi o tratamento que mais liberou Mg e B em solos com maior DSC (10-20cm). No solo com menor DSC, o resíduo de Margaridão demonstrou a maior contribuição para a liberação de Zn (provavelmente pela sua maior quantidade na planta). Em solos com maior DSC, observou-se que as culturas de amendoim forrageiro, bananeira e margaridão contribuíram para a liberação de Zn de forma significativa. Para solos com menor DSC, todos os resíduos, com exceção da serapilheira, contribuíram significativamente para a liberação de Cu. Em contraste, em solos com maior DSC, a cultura de amendoim forrageiro destacou-se como a principal responsável pela liberação de Cu. Quanto à liberação de Fe, a serapilheira apresentou a maior contribuição em ambos os solos. No entanto, é preciso considerar que esse resultado pode estar sujeito a alterações, uma vez que a serapilheira contém material mineral, devido a forma de coleta. A contribuição da bananeira para a liberação de Mn foi significativa em ambos os solos. Tanto a bananeira quanto o amendoim forrageiro contribuíram significativamente para a maior liberação de B em ambos os solos, enquanto a serapilheira exibiu a menor contribuição.

3.3 Análise de componentes principais

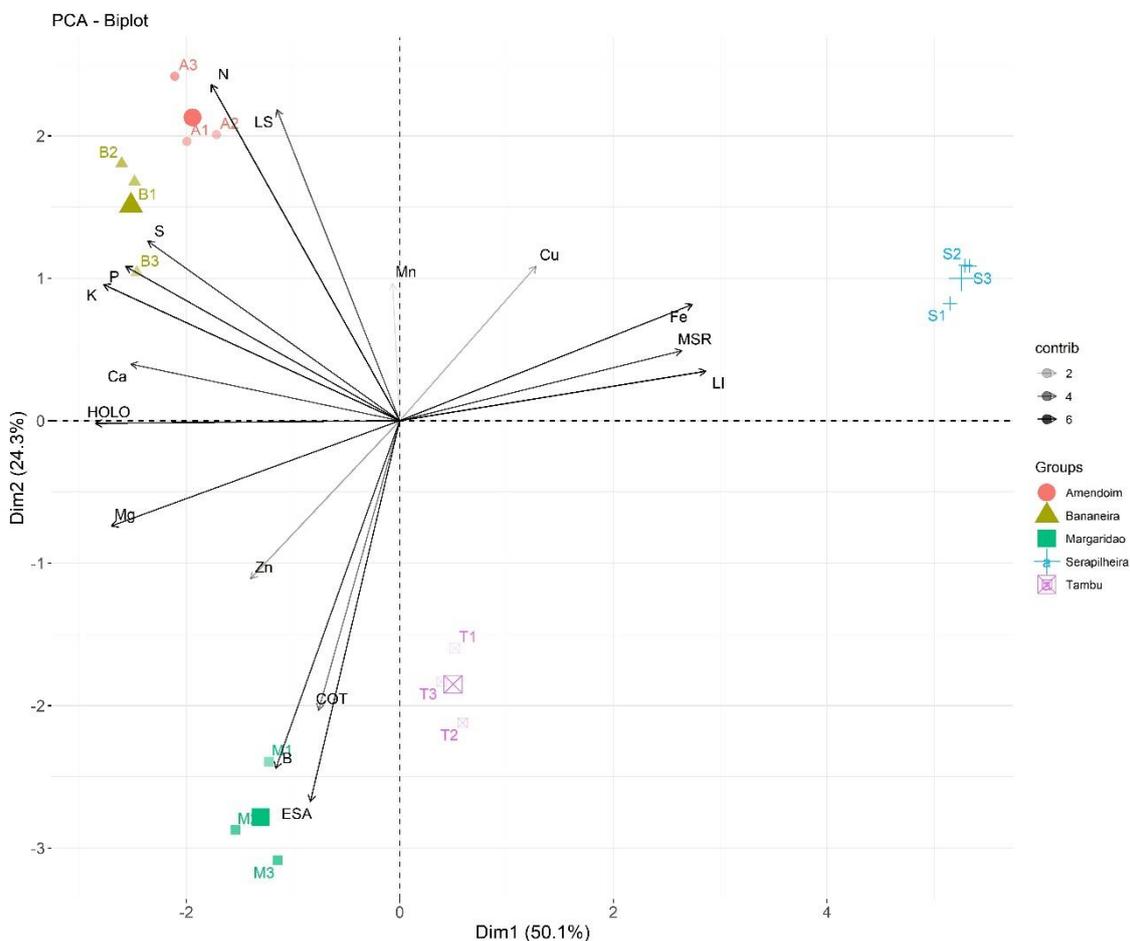


Figura 2. Análise de componentes principais (PCA) dos parâmetros iniciais de qualidade dos materiais vegetais (extrativos solúveis em acetona, ESA; lignina solúvel, LS; lignina insolúvel, LI; holocelulose, HOLO) agrupados em componentes principais, através de combinações lineares com as demais variáveis (matéria seca remanescente, MSR; N, nitrogênio; P, Fósforo; K, Potássio; Ca, Cálcio; Mg, Magnésio; Fe, Ferro; Mn, Manganês; Cu, Cobre; Zn, Zinco; B, Boro).

Na análise dos componentes principais considerou os dois primeiros fatores, que tinham um valor acumulado de 74,4%. Com base nos resultados obtidos pela análise de componentes principais (Figura 2) é possível observar algumas relações entre as variáveis analisadas, bem como sua relação com os tratamentos avaliados.

Por um lado, as variáveis MSR ao 0,49 ano e lignina insolúvel (LI) se correlacionaram positivamente com resíduos de serapilheira. Por outro lado, essas variáveis apresentaram correlação inversa com lignina solúvel, holocelulose e extratos solúveis em acetona, que por sua vez se correlacionaram melhor com amendoim forrageiro (lignina solúvel), bananeira (holocelulose) e margaridão (extrativos solúveis).

Em relação a liberação de nutrientes os resíduos mais lábeis, e que apresentaram maior taxa de decomposição apresentaram relação direta com N, para amendoim forrageiro, K, P e S para resíduos de bananeira, e B para margaridão. O resíduo de tambu não apresentou correlação direta com nenhuma variável avaliada.

3.4. C e N associados a MOP e MOAM

Após 0,49 ano de incubação dos materiais orgânicos, observou-se uma diminuição no teor de carbono da C-MOP em ambas as profundidades em comparação com o valor inicial. Houve diferença significativa ($p < 0,05$) entre os solos, aparentemente atribuída aos DSC nos solos. No que diz respeito aos resíduos, não foi identificada diferença significativa ($p > 0,05$), indicando que a adição de resíduos decompostos em seis meses não contribuiu para aumentar C-MOP em nenhuma das profundidades (Figura 3).

Para o C-MOAM, embora não tenha apresentado diferenças entre as profundidades ($p > 0,05$), é possível observar comportamentos distintos em comparação com os teores iniciais. Na profundidade 0-10cm, com menor DSC, a adição de margaridão favoreceu os teores de carbono na fração, resultando em um aumento em relação ao valor inicial e; o tambu não demonstrou mudanças, enquanto bananeira, serapilheira e amendoim forrageiro apresentaram uma diminuição em relação ao teor inicial. No solo com maior DSC, a adição dos resíduos de tambu, bananeira e margaridão aumentou os teores de carbono em comparação com o valor inicial. Em contraste, a serapilheira não provocou alterações, e o amendoim forrageiro resultou em uma diminuição nos teores. Nos solos controle, sem resíduos, em ambas as profundidades, houve um aumento nos teores de C-MOAM, indicando acúmulo de carbono, provavelmente devido à decomposição da MOP, que transferiu esse carbono para a MOAM por falta de outras fontes de C e energia no sistema (Figura 3).

O DSC diminuiu quando o amendoim forrageiro foi adicionado em solo de menor profundidade (menor DSC) em comparação com a adição em solos com maior DSC, um padrão semelhante foi observado para bananeira e margaridão. Em relação aos valores iniciais de DSC nos solos, a serapilheira e o tambu aumentaram esse parâmetro em comparação com outros resíduos quando avaliados na camada de 0-10 cm. No entanto, esse comportamento foi observado na serapilheira e no amendoim forrageiro quando analisados na camada de 10-20 cm (Figura 3). O solo sem resíduos apresentou, nas duas profundidades, uma diminuição nos valores iniciais de DSC.

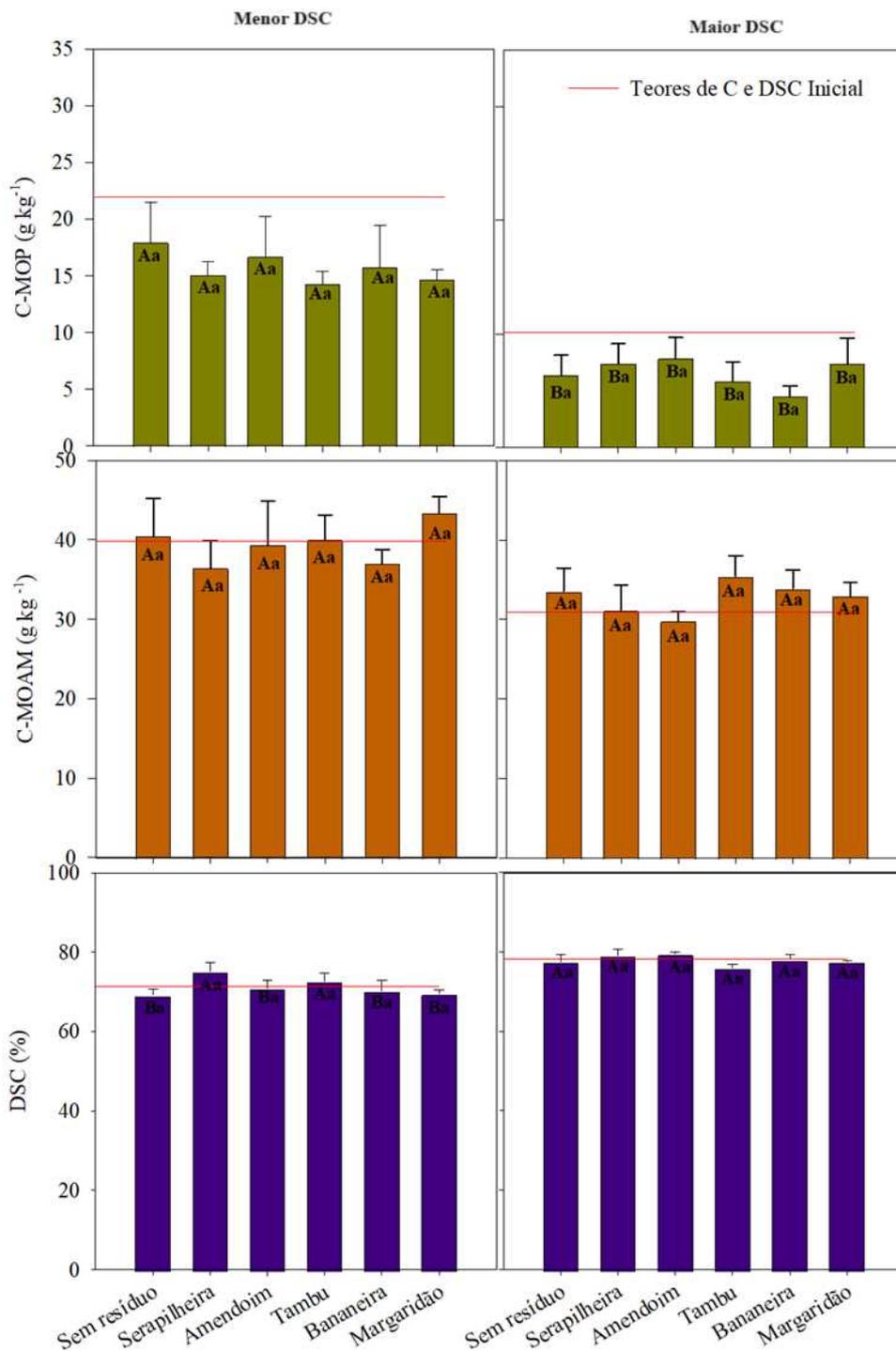


Figura 3. Contribuição de carbono (g kg^{-1}) para as frações de matéria orgânica particulada (C-MOP), e matéria orgânica associada a minerais (C-MOAM) em solos de diferentes profundidades (0-10 cm: Menor DSC e 10-20 cm: Maior DSC) e o déficit de saturação de carbono (DSC) nos tratamentos com adição resíduos de serapilheira, amendoim forrageiro, tambu, bananeira, margaridão e sem resíduo na última época de avaliação aos 0,49 ano. Letras maiúsculas representam o efeito da profundidade de coleta e letras minúsculas representam o efeito comparativo entre resíduos pelo teste Scott-Knott ($p < 0,05$). A linha vermelha representa o conteúdo inicial de carbono das frações e do DSC antes da incubação.

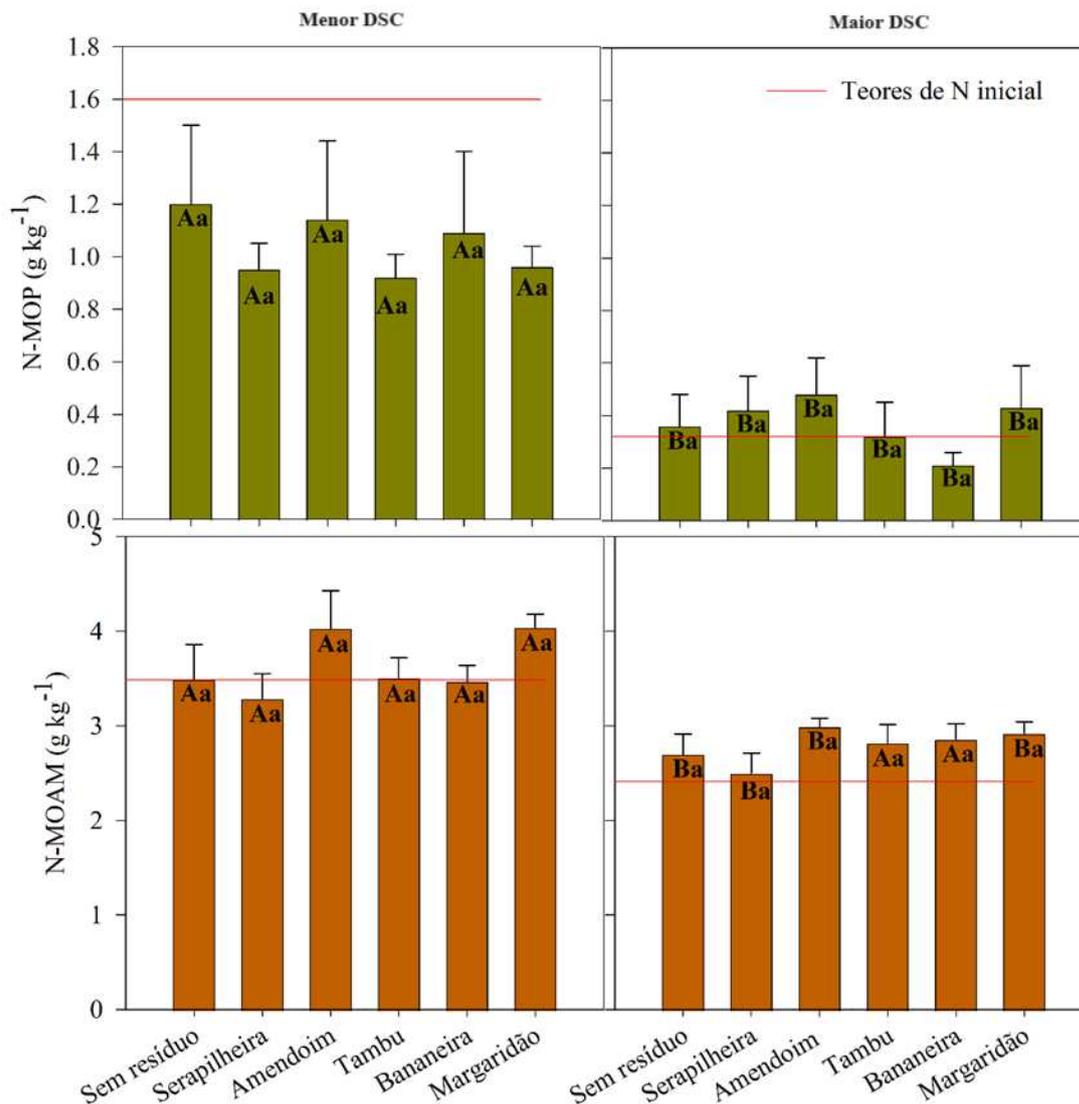


Figura 4. N associado a fração de matéria orgânica particulada (N-MOP) e para fração de matéria orgânica associada a minerais (N-MOAM) em solos provenientes de diferentes profundidades (0-10 cm: Menor DSC e 10-20 cm: Maior DSC) nos tratamentos com adição de resíduos de serapilheira, amendoim forrageiro, tambu, bananeira, margaridão e tratamento sem resíduo, na última época de avaliação aos 180 dias. Letras maiúsculas representam o efeito da profundidade que os solos foram coletados e letras minúsculas representam o efeito comparativo entre resíduos pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). A linha vermelha representa o conteúdo inicial de nitrogênio das frações antes da incubação.

O teor de N na fração MOP apresentou diferenças significativas entre as profundidades, considerando suas composições iniciais distintas (Figura 4).

Embora a adição de diferentes resíduos não tenha resultado em diferenças no N-MOP e N-MOAM ($p > 0,05$), é possível observar diferença em relação ao teor inicial. Na camada de 0-10 cm, ocorreu uma diminuição do N da MOP quando todos os resíduos foram adicionados, enquanto no solo de 10-20 cm, a diminuição foi provocada apenas quando resíduos de tambu foi adicionado. Já a bananeira manteve os níveis iniciais,

indicando que não contribuiu para o acréscimo de N nessa fração. Nos solos sem resíduos da camada de 10-20 cm, observou-se um aumento de N, enquanto no solo de 0-10 cm houve uma diminuição (Figura 4).

A concentração de N na fração MOAM também apresentou diferenças significativas ($p < 0,05$) entre as profundidades, influenciadas por suas composições iniciais distintas. Embora a adição de resíduos não tenha gerado diferenças significativas ($p > 0,05$), o teor de N houve variações. Na camada de 0-10 cm, os tratamentos com serapilheira e bananeira diminuíram o N na MOAM ao final seis meses de incubação, enquanto os demais aumentaram em comparação aos níveis iniciais. Na profundidade de 10-20 cm, todos os tratamentos resultaram em um aumento nos teores de N na MOAM (Figura 4).

Na análise da relação C/N da fração MOP, observou-se diferenças ($p < 0,05$) nos tratamentos sem resíduo, que apresentou na profundidade de 10-20 cm uma maior relação C/N em comparação com a profundidade de 0-10 cm. Entre os tratamentos, o resíduo de margaridão apresentou uma relação C/N maior na profundidade de 10-20 cm. Quando comparados com a relação C/N inicial, todos os resíduos aumentaram a relação C/N em ambas as profundidades dos solos (Figura 5).

Em relação à MOAM, a relação C/N inicial diminuiu em ambas as profundidades quando os resíduos foram adicionados. Na camada de 0-10 cm, observou-se diferenças entre os resíduos ($p < 0,05$). Nos tratamentos sem resíduo e com resíduos de serapilheira e tambu a relação C/N foi maior na MOAM, enquanto com a adição dos resíduos de amendoim forrageiro, bananeira e margaridão a relação C/N foi menor (conforme esperado devido às composições desses resíduos). No solo de 10-20 cm, os tratamentos sem resíduo e com resíduos de serapilheira e tambu apresentaram uma maior relação C/N (como esperado), seguidos por bananeira, margaridão e amendoim forrageiro (sendo o amendoim forrageiro o de menor relação C/N) (Figura 5).

A MOP contribuiu para o aumento da relação C/N, enquanto a MOAM resultou em uma diminuição da relação C/N.

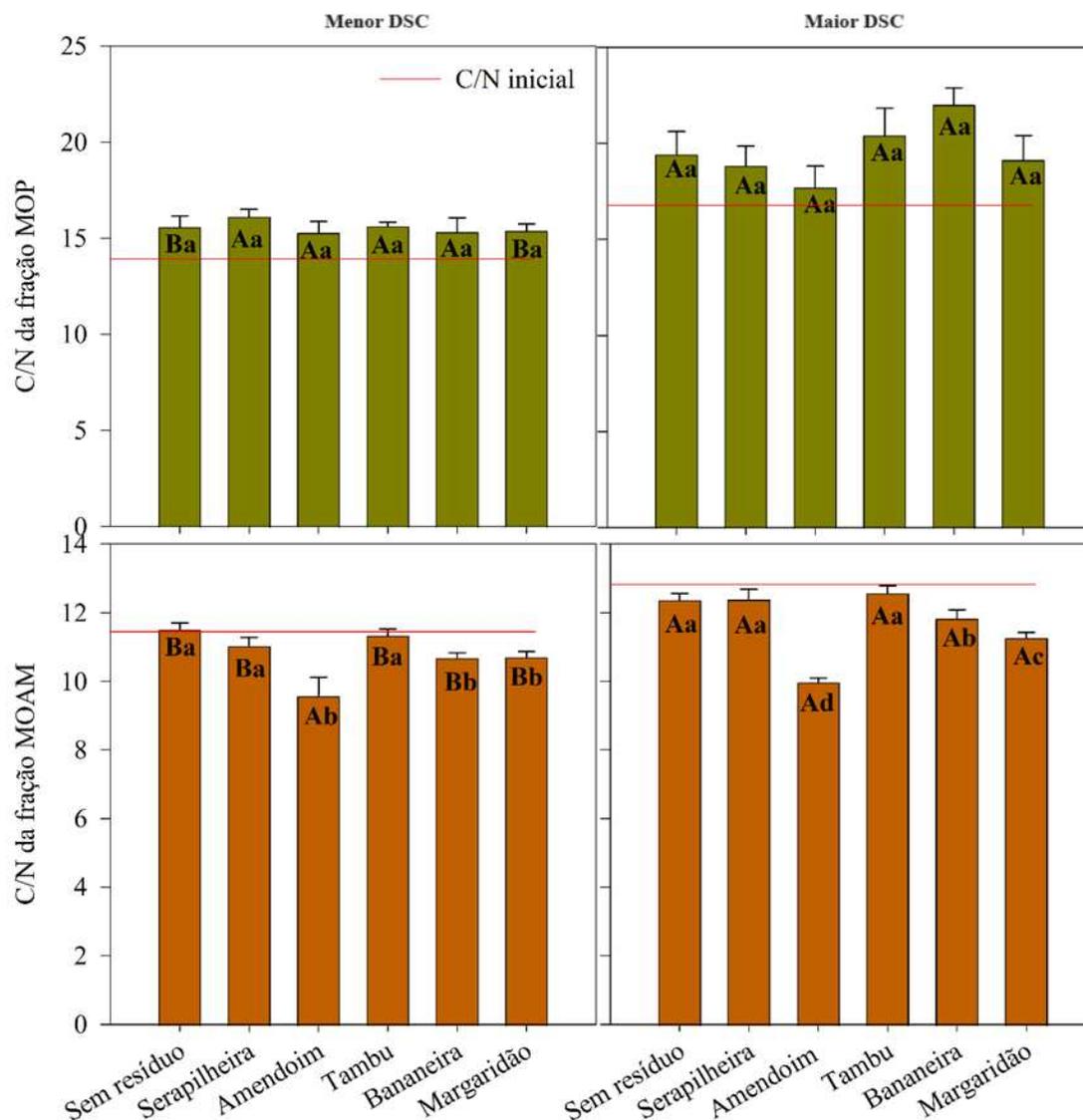


Figura 5. Relação C/N para fração de matéria orgânica particulada (MOP) e para fração de matéria orgânica associada a minerais (MOAM) em solos provenientes de diferentes profundidades (0-10 cm: Menor DSC e 10-20 cm: Maior DSC) nos tratamentos com adição de resíduos de serapilheira, amendoim forrageiro, tambu, bananeira, margaridão e tratamento sem resíduo, na última época de avaliação (0,49 ano). Letras maiúsculas representam o efeito da profundidade que os solos foram coletados e letras minúsculas representam o efeito comparativo entre resíduos pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). A linha vermelha representa a relação C/N antes da incubação.

4. DISCUSSÃO

4.1 Decomposição de resíduos

A maior decomposição dos resíduos de amendoim forrageiro ao longo do tempo quando aplicado em solo com maior DSC (10-20 cm) e o maior acúmulo de MSR na serrapilheira (Tabela 5), indicador de menor decomposição do material, ocorrem devido

a composição bioquímica desses materiais (PRESCOTT; VESTERDAL, 2021), independente do teor de carbono aplicado.

Apesar dos resíduos de amendoim forrageiro apresentar os maiores teores de lignina solúvel e de holocelulose (Tabela 4) considerados compostos recalcitrantes (JENSEN et al., 2005), sua maior decomposição (menor acúmulo de MSR, Tabela 5) ocorreu devido ao baixo teor de lignina insolúvel e o menor teor de extrativos solúveis em acetona, relacionados com compostos lipídicos (Tabela 4) que também influenciam na taxa de decomposição (DUNGAIT et al., 2012). Baixa quantidade destes compostos indicam maior facilidade de decomposição de resíduos vegetais (MALUF et al., 2015a). Além disso, a menor relação C/N do amendoim forrageiro (Tabela 4) estimula a atividade microbiana, resultando em maior taxa de decomposição como um todo (PEREIRA et al., 2023; PHUKONGCHAI; KAEWPRADIT; RASCHE, 2022).

Em geral, devido as composições bioquímicas, as leguminosas, como o amendoim forrageiro, são mais facilmente decompostas, o que permite a maior liberação de nutrientes para solo (ESPINDOLA et al., 2006; GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES; BRITO, 2007; SILVA et al., 2022), mas isto depende também do tipo de solo. Maluf et al., 2015b estudando a decomposição em solos de diferentes texturas encontrou que a liberação de alguns nutrientes ocorre em função do teor de argila.

As baixas relações C/N e Lignina/N (Tabela 4) também explicam a rápida decomposição da bananeira no solo oriundo de ambas as profundidades (com Menor e Maior DSC). Além disto, o grande volume de material vegetal com grande umidade proveniente da bananeira produzir um microclima favorável ao desenvolvimento da microbiota, responsável pela decomposição dos restos vegetais (BRITO et al., 2017).

Os extrativos solúveis em acetona parecem não ter sido um fator importante para decomposição dos resíduos, pois o margaridão com maiores teores de extrativos solúveis (Tabela 4) apresentou maior decomposição, quando aplicado a solos com diferentes DSC, em relação à serapilheira, com menores teores (Tabela 4). Extrativos solúveis contêm enzimas que quebram compostos orgânicos com ligações complexas, a exemplo da lignina, tornando esses materiais mais acessíveis aos microrganismos decompositores (BERTRAND et al., 2006). Isso é particularmente importante, pois a lignina é uma substância resistente à degradação (JENSEN et al., 2005). Portanto, o uso de margaridão associado a demais resíduos com componentes mais recalcitrantes pode ser uma vantagem pois, estimula a atividade microbiana decompositora e favorece a quebra de compostos menos lábeis.

A fração de substratos prontamente decomponíveis transforma-se rapidamente em CO₂ e biomassa microbiana, seguida pela decomposição de componentes químicos resistentes e nova biomassa morta. Ao contrário, resíduos complexos passam por estágios distintos de decomposição, pois eles podem conter frações de rápida decomposição (<1 ano), intermediária (<10 anos) e recalcitrante (>100 anos) (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Estes resíduos em geral possuem fração recalcitrante alta o que dificulta sua decomposição, a exemplo dos resíduos do tambu e da serrapilheira.

O resíduo complexo do tambu com altas relações C/N e Lignina/N (Tabela 4) e altos valores para holocelulose e lignina (Tabela 4) não teve a meia vida alterada em função do DSC (tabela 6).

O maior acúmulo de massa seca da serrapilheira, ao longo do tempo em ambos as profundidades (Tabela 5, Figura 1) está relacionado os altos teores de carbono, altos teores de lignina e altas relações C/N e C/P do material (Tabelas 3 e 4). O maior tempo de meia vida se relacionou com o maior teor lignina no resíduo (Tabelas 6 e 4), mas as relações C/N e C/P também influenciam a decomposição dos resíduos (MALUF et al., 2015a). A relação C/N serve como indicador da susceptibilidade do resíduo à decomposição. No entanto, é importante destacar que esse índice pode não ser totalmente conclusivo, uma vez que os organismos envolvidos na decomposição são influenciados por diversos fatores (SANTONJA et al., 2015). Portanto, relações C/N baixas nem sempre indicam uma maior suscetibilidade à decomposição, pois resíduos humificados geralmente têm uma relação C/N em torno de 10/1. Por outro lado, resíduos com teores elevados de N têm uma relação C/N menor que 10/1, o que pode resultar em uma liberação mais rápida de nutrientes em comparação com materiais humificados (ALBATAINA; YOUNG; RANIERI, 2016). Conforme observado por Maluf et al., 2015a, o processo de mineralização do Fósforo está associado à relação C/P. Valores superiores ou iguais a 300 tendem à imobilização, enquanto valores inferiores a 200 favorecem a mineralização.

O acúmulo de MRS na serrapilheira possibilita maior cobertura do solo. Ela é uma fonte de inóculo de microrganismos que são levados para café e que posteriormente auxiliam na decomposição dos demais materiais que são adicionados em conjunto com a serrapilheira da vegetação nativa. Portanto, a estratégia de manejo utilizada pelo agricultor, com o uso de resíduos com características diferentes e, portanto, com funções diferentes, favorece a saúde de seu sistema de cultivo (DA SILVA et al., 2022).

A meia vida da serrapilheira variou de acordo com os componentes mais recalitrantes ou mais lábeis e com o DSC (Tabela 6) com uma diminuição em 50% do tempo para decomposição quando este mesmo material foi adicionado em solos com baixo teor de carbono. Em solos com menor teor de carbono a decomposição de um material com alta relação C/N é mais rápida devido ao estímulo da atividade microbiana (PEREIRA et al., 2023; PHUKONGCHAI; KAEWPRADIT; RASCHE, 2022). Microrganismos decompositores utilizam carbono e nitrogênio em proporções específicas para seu crescimento e metabolismo (SOUZA et al., 2020). Em solos com menor teor de carbono, onde a disponibilidade de nitrogênio em relação ao carbono pode ser maior, uma relação C/N baixa no solo favorece uma taxa de decomposição mais acelerada de resíduos orgânicos (COTRUFO; LAVALLEE, 2022).

4.2 Dinâmica liberação de nutrientes

A maior liberação dos nutrientes N, P e K pelos resíduos de bananeira e amendoim forrageiro possui relação com seu o maior teor destes nutrientes nestes resíduos em relação aos demais (Tabela 7), mas também com a relação C/N e relação C/P (Tabela 4), já que o margaridão, com teores altos de P, não apresentou o mesmo padrão de liberação destes nutrientes.

A liberação de N nos resíduos citados, provavelmente ocorreu devido a relação C/N menor que 30 nos resíduos (Tabela 4). Relações C/N maiores que 30 não favorecem a liberação de N, mas um maior processo de imobilização líquida desse nutriente pelos microrganismos (DA SILVA et al., 2022; MALUF et al., 2015b) (Tabela 4), como ocorreu com a serapilheira e os resíduos de tambu, que imobilizaram N (Tabela 7 e Material suplementar 3). As relações C/P maiores ou iguais a 300 estimulam o processo de imobilização líquida, enquanto relações menores que 200 estimulam o processo de mineralização do P (MALUF et al., 2015b), mas há exceções, pois, relação menor que 200 não favoreceu a liberação do P em resíduos de eucalipto (SILVA et al., 2022). A relação C/P próximo de 200 (Tabela 4) dos resíduos de bananeira e amendoim forrageiro pode ter favorecido a maior liberação de Fósforo. Os resíduos de tambu e serapilheira apresentam relação C/P maior que 300 (Tabela 7 e Material suplementar 3) e houve pequena liberação do P.

A serrapilheira da vegetação nativa imobilizou vários nutrientes, mas não imobilizou N e P (Tabela 7 e Material suplementar 3), possivelmente devido à natureza do resíduo. O material coletado estava em condições avançadas de decomposição e com

isso os compostos mais lábeis tinham sido perdidos, permanecendo os compostos mais recalcitrantes. A alta relação C/N e alta relação C/P certamente dificultaram a atividade microbiana. Possivelmente, houve então imobilização dos nutrientes remanescentes na biomassa dos microrganismos que estavam atuando na decomposição deste material. Estes resultados estão de acordo com o aumento de N quando adicionado serrapilheira ao solo com menor DSC (Tabela 7 e Material suplementar 3). O N presente na matéria orgânica do solo nesta profundidade foi então imobilizada pelos microrganismos presentes na serrapilheira. Dentre estes microrganismos é possível que havia micorrizas. O conteúdo de nitrogênio presente nas estruturas das hifas pode ter contribuído para aumentar o N observado.

O K, comparada o ao demais teve alta liberação em ambos os solos e a sequência de liberação dos resíduos avaliados foi: amendoim forrageiro > bananeira > margaridão > tambu (Tabela 7 e Material suplementar 3). O K não está associado a componentes estruturais do tecido vegetal, o que permite fácil liberação desse nutriente após o rompimento da membrana plasmática (MARSCHNER, 2011). Assim, a mineralização não seria um pré-requisito para a transferência de K do resíduo para o solo, sendo o termo liberação mais adequado para esse nutriente (MALUF et al., 2015a).

De acordo com (TAIZ, 2017), o Ca faz parte da composição estrutural das células, e é um cofator enzimático envolvido na hidrólise de ATP e fosfolipídeos, e mensageiro secundário da regulação metabólica, portanto, com maior dificuldade de ser mineralizado e liberado pelos resíduos. Entretanto, outros autores (da SILVA et al., 2022; PEREIRA et al., 2023) observaram alta liberação de Ca em alguns resíduos. Em nossa pesquisa, a maior liberação de Ca (Tabela 7 e Material suplementar 3) foi observada nos resíduos de bananeira em solo de ambas as profundidades e margaridão e amendoim forrageiro em solo de profundidades de 10-20 cm.

O Magnésio foi nutriente com maior porcentagem de liberação entre os nutrientes. A dinâmica de liberação de Mg é rápida, pois 70% deste nutriente se encontra no vacúolo das plantas, tornando mais fácil a liberação quando ocorre a decomposição (MARSCHNER, 2011). O resíduo de tambu que imobilizou Ca, foi o resíduo que mais liberou Mg (Tabela 7), embora sem altos teores deste nutriente em sua composição (Tabela 3), independente do teor de C do solo ao qual foi aplicado.

A relação C/S abaixo de 200, diferente dos demais resíduos (Tabela 7 e Material suplementar 3), pode explicar a maior liberação de S do resíduo da bananeira. Segundo

Maluf et al. (2015) a relação C/S maior que 400 pode favorecer a imobilização, enquanto menor que 200 implica em mineralização.

Os resíduos da bananeira, do amendoim forrageiro e do margaridão foram os que mais contribuíram para liberação de micronutrientes no solo ao contrário do que do padrão baixo de liberação dos micronutrientes observado por alguns autores (DA SILVA et al., 2022; MALUF et al., 2015b), ao avaliaram a decomposição de diferentes resíduos vegetais, inclusive de leguminosas.

No tempo de estudo, a serrapilheira da vegetação nativa, imobilizou a maior parte dos nutrientes estudados, mas não imobilizou B, Fe (Tabela 7 e Material suplementar 4).

Quanto ao Ferro, certamente na serrapilheira havia maiores quantidades deste micronutrientes devido ao solo aderido aos resíduos vegetais no momento da coleta. A imobilização de ferro pelos demais resíduos ocorre devido a própria decomposição. A matéria orgânica pode se transformar em compostos orgânicos complexos que podem se ligar ao ferro, formando complexos insolúveis. Esses complexos podem estar menos disponíveis para as plantas, resultando na imobilização do ferro (SOUZA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007).

De forma geral, a maior liberação dos nutrientes foi observada nos resíduos do amendoim forrageiro. Deste resíduo, houve a liberação de mais de 50% do seu conteúdo de nutrientes em seis meses de decomposição, quando aplicado em solos com maior DSC (Material suplementar 3). A menor relação C/N do resíduo e do solo disponibiliza N para acelerar o processo de decomposição, que equilibra a relação C/N solo/resíduo e disponibiliza mais rapidamente outros nutrientes (SILVA et al., 2022). Esses resultados indicam que, o amendoim forrageiro é uma espécie potencial para utilização em sistemas de agricultura natural, não só pela capacidade de associação com bactérias fixadores de N₂ da planta (ESPINDOLA et al., 2005) mas também os demais nutrientes que são liberados em um ciclo relativamente curto.

4.3 C e N nas frações MOP e MOAM

Os maiores valores iniciais de C-MOP e C-MOAM na camada superficial do solo está relacionada a maior atividade biológica. Nesta profundidade também ocorreu menor teor de argila (Tabela 1), o que diminui a proteção físico-química do C e aumenta a possibilidade de interação da população microbiana com o C do solo e de decomposição da matéria orgânica (DUNGAIT et al., 2012).

Após a incubação, a degradação dos resíduos, incorporados uma única vez, pela comunidade microbiana levou a diminuição da C-MOP (Figura 3). Em condições tropicais, com altas temperaturas e umidade, a o não aporte frequente de resíduos favorece a redução dos teores de C no solo, pois ocorre processos de oxidação da matéria orgânica, com alto consumo de C menos protegido na MOP pela comunidade microbiana, o que culmina em aumento da emissão de CO₂ e diminuição da qualidade do solo (CAUSARANO et al., 2008; SALTON et al., 2011; WANG et al., 2021). Além das condições climáticas e aporte de resíduos, o C-MOP é a fração mais susceptível ao preparo do solo o que impacta negativamente o fluxo de C para manutenção de atividades biológicas e frações mais estáveis, como o C-MOAM (BAYER et al., 2002).

A manutenção da C-MOP e C-MOAM com adição de resíduos (Figura 3) difere de Silva et al. (2022), que observaram aumento de 15 vezes do C-MOP quando resíduo de feijão de porco associados a resíduo de milho foram incorporados ao solo.

Maior teor de C-MOAM na profundidade 10-20 cm em alguns tratamentos indica aumentos nos teores de C da fração mais estável da matéria orgânica em detrimento das perdas de teores de C removidos dos resíduos, o que pode estar relacionado com a diferença textural entre as profundidades dos solos incubados (Figura 3). Na maior profundidade, o maior teor de argila foi importante para o maior armazenamento de C. A argila possui maior área de superfície específica para a adsorção de C, culminando em maior agregação e proteção física do solo (SIX et al., 2002; STEWART et al., 2008).

Na camada mais profunda, os altos valores de DSC estão atribuídos ao maior quantitativo de sítios presentes ainda podem se ligar ao C-MOAM. Comportamento diferente foi observado na superfície (0-10 cm) onde os tratamentos sem resíduo, amendoim forrageiro, bananeira e margaridão apresentaram menor DSC (Figura 3). No caso do solo sem resíduo a diminuição do DSC foi associada a transferência de carbono da MOP para a MOAM. A menor relação C/N dos resíduos, em especial, bananeira e amendoim forrageiro podem ser em função da liberação de carbono, que foi acrescentado a MOAM.

Um maior DSC significa maior distância entre o teor atual e o teor teórico que aquele solo conseguiria proteger, conseqüentemente em condições de maior DSC, maior deveria ser a eficiência de materiais vegetais contribuírem efetivamente para aumentos na MOS (CASTELLANO et al., 2015; SOUZA et al., 2017). A não alteração da % de DSC antes (inicial) e após a aplicação de resíduos (Figura 3) indica que, no tempo

avaliado, os resíduos não contribuíram para o aumento da capacidade do solo armazenar C.

O aumento de N-MOP é decorrente do aporte dos resíduos vegetais, que pode ser favorecido pela maior atividade microbiana (MORALES et al., 2016). A MOP é um compartimento dinâmico, com nutrientes relativamente desprotegidos e decorrente de adições de resíduos de plantas (JESUS et al., 2012). Na pesquisa aqui apresentada, sem adições constantes o N-MOP, em especial na profundidade de 0-10cm, diminuiu ao longo de seis meses, mesmo em um solo inicialmente com alto teor de carbono e nitrogênio (Figura 4).

A N-MOAM é uma fração maioritariamente constituída por produtos microbianos ricos em N (COTRUFO et al., 2019). Em relação à condição inicial, maior N-MOAM na profundidade de 0-10 cm quando resíduos de amendoim forrageiro e margaridão foram aplicados (Figura 4) podem estar relacionados com a qualidade destes resíduos. Os resíduos que mais contribuem para o N nas frações são aqueles resíduos que favorecem a atividade microbiana. A não diminuição da N-MOAM na profundidade de 10-20 cm pode estar associada a persistência do N no solo devido à ligação química aos minerais e à proteção física em pequenos agregados (COTRUFO et al., 2019).

Normalmente a relação C/N tende a diminuir quando tem maior aporte de fontes disponíveis de N ou materiais de maior qualidade (COTRUFO et al., 2019). O que está de acordo com nosso trabalho (Figura 5), onde as relações C/N mais altas foram observadas para solos que foram aplicados os resíduos de menor qualidade (tambu e serapilheira), e relação C/N menor quando aplicado resíduos de maior qualidade (amendoim forrageiro, bananeira e margaridão), isso para fração MOAM.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A liberação de nutrientes foi maior dos resíduos de amendoim forrageiro e bananeira, no período de seis meses de avaliação da decomposição. Entretanto, os demais resíduos também liberaram nutrientes. Por exemplo, a serrapilheira imobilizou a maioria dos nutrientes, mas liberou B (Boro) em quantidades superiores em comparação com outros resíduos, o que indica a importância da diversidade dos resíduos.

A composição bioquímica influenciou diretamente a decomposição dos resíduos e a liberação de nutrientes. Resíduos com composição que dificulta a decomposição, a exemplo da serrapilheira, promove outras funções no solo. Assim, o manejo adequado da

serrapilheira, quando associado a outros resíduos com decomposição mais rápida, contribui para uma maior proteção do solo.

A composição dos resíduos não alterou o teor de carbono nas diferentes frações do solo. No entanto, observaram-se diferenças no déficit de saturação de carbono (DSC). Notavelmente, solos que receberam resíduos de menor qualidade, indicadas por índices como C/N, C/P e elevados níveis de lignina, apresentaram DSC menor. Entretanto, mesmo assim, os déficits permaneceram acima dos valores iniciais. Estes resultados possivelmente decorrem do curto período de avaliação, que parece ter sido insuficiente para capturar integralmente as dinâmicas, especialmente no que diz respeito ao carbono no solo.

Os resíduos foram avaliados individualmente e em condições de laboratório, mas no campo o agricultor os aplica em conjunto. A aplicação deles em conjunto promove uma dinâmica cinética na ciclagem de nutrientes e resulta na liberação de um maior número de nutrientes e em momentos distintos. Para aprofundar a compreensão da dinâmica conjunta desses resíduos é recomendável realizar experimentos de incubação utilizando uma mistura desses resíduos e de preferência fazer avaliações à campo. Tais experimentos possibilitam estudos em condições mais reais àquelas dos agricultores e permitem compreensões mais aprofundadas sobre os padrões de liberação de nutrientes.

6. REFERÊNCIAS

ABTCP - Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. Disponível em:

<<https://www.abtcp.org.br/>>. Acesso em: 6 ago. 2023.

AL-BATAINA, B. B.; YOUNG, T. M.; RANIERI, E. Effects of compost age on the release of nutrients. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 4, n. 3, p. 230–236, set. 2016.

BAYER, C. et al. Stocks and humification degree of organic matter fractions as affected by no-tillage on a subtropical soil. **Plant and Soil**, v. 238, p. 133–140, 2002.

BERTRAND, I. et al. Can the Biochemical Features and Histology of Wheat Residues Explain their Decomposition in Soil? **Plant and Soil**, v. 281, n. 1–2, p. 291–307, mar. 2006.

BRADY, N.; WEIL, R. Matéria Orgânica do Solo. Em: **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Bookman Editora, 2009. p. 398–436.

BREMNER, J. M.; MULVANEY, C. S. Nitrogen-Total. In: *Methods of soil analysis*. Part 2. Chemical and microbiological properties. p. 595–624, 1982.

BRITO, C. F. B. et al. Production, decomposition and chemical characteristics of banana litterfall. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 1, p. 45–52, mar. 2017.

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, maio 1992.

CARVALHO, A. M. X. DE et al. SPEED stat: A free, intuitive, and minimalist spreadsheet program for statistical analyses of experiments. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 20, n. 3, 2020.

CASTELLANO, M. J. et al. Integrating plant litter quality, soil organic matter stabilization, and the carbon saturation concept. **Global Change Biology**, v. 21, n. 9, p. 3200–3209, 1 set. 2015.

CAUSARANO, H. J. et al. Soil Organic Carbon Fractions and Aggregation in the Southern Piedmont and Coastal Plain. **Soil Science Society of America Journal**, v. 72, n. 1, p. 221–230, 1 jan. 2008.

COTRUFO, M. F. et al. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. **Nature Geoscience**, v. 8, n. 10, p. 776–779, 7 out. 2015.

COTRUFO, M. F. et al. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. **Nature Geoscience**, v. 12, n. 12, p. 989–994, 18 dez. 2019.

COTRUFO, M. F.; LAVALLEE, J. M. Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration. p. 1–66. 2022.

DA SILVA, J. P. et al. Decomposition and nutrient release from legume and non-legume residues in a tropical soil. **European Journal of Soil Science**, v. 73, n. 1, p. e13151, 1 jan. 2022.

DE CARVALHO, A. F. et al. Microclimate and soil and water loss in shaded and unshaded agroforestry coffee systems. **Agroforestry Systems**, v. 95, n. 1, p. 119–134, 22 jan. 2021.

DE CARVALHO, A. M. et al. Chemical composition of cover plants and its effect on maize yield in no-tillage systems in the Brazilian savanna. **Crop and Pasture Science**, v. 63, n. 12, p. 1075, 2012.

DUARTE, E. M. G. et al. Decomposition and nutrient release in leaves of Atlantic Rainforest tree species used in agroforestry systems. **Agroforest Syst**, v. 87, p. 835–847, 2013.

DUNGAIT, J. A. J. et al. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance. **Global Change Biology**, v. 18, n. 6, p. 1781–1796, 13 jun. 2012.

ESPINDOLA, J. A. A. et al. Adubação Verde com Leguminosas. 2005.

ESPINDOLA, J. A. A. et al. Decomposição e liberação de nutrientes acumulados em leguminosas herbáceas perenes consorciadas com bananeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 2, p. 321–328, abr. 2006.

FREITAS, I. C. DE et al. Carbono no solo, acúmulo e qualidade da serapilheira em sistemas de produção familiar. **FLORESTA**, v. 46, n. 1, p. 31, 31 mar. 2016.

GAMA-RODRIGUES, A. C. DA; GAMA-RODRIGUES, E. F. DA; BRITO, E. C. DE. Decomposição e liberação de nutrientes de resíduos culturais de plantas de cobertura em argissolo vermelho-amarelo na região noroeste Fluminense (RJ). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1421–1428, dez. 2007.

GERSCHLAUER, F. et al. Stable carbon and nitrogen isotopic composition of leaves, litter, and soils of various ecosystems along an elevational and land-use gradient at Mount Kilimanjaro, Tanzania. **Biogeosciences**, v. 16, n. 2, p. 409–424, 25 jan. 2019.

GOLFARI, L. **Zoneamento Ecológico do Estado de Minas Gerais Para Reflorestamento**. Belo Horizonte, Brasil: 1975.

GOMES, L. C. et al. Agroforestry systems can mitigate the impacts of climate change on coffee production: A spatially explicit assessment in Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 294, p. 106858, jun. 2020.

HASSINK, J.; WHITMORE, A. P. A Model of the Physical Protection of Organic Matter in Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 1, p. 131–139, jan. 1997.

HATFIELD, R. D. et al. A comparison of the insoluble residues produced by the Klason lignin and acid detergent lignin procedures. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 65, n. 1, p. 51–58, maio 1994.

JAMA, B. et al. *Tithonia diversifolia* as a green manure for soil fertility improvement in western Kenya: A review. 2000.

JARAMILLO-BOTERO, C. et al. Produção de serapilheira e aporte de nutrientes de espécies arbóreas nativas em um sistema agroflorestal na Zona da Mata de Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 32, n. 5, p. 869–877, out. 2008.

JENSEN, L. S. et al. Influence of biochemical quality on C and N mineralisation from a broad variety of plant materials in soil. **Plant and Soil**, v. 273, n. 1–2, p. 307–326, jun. 2005.

JESUS, G. L. DE et al. Doses e fontes de nitrogênio na produtividade do eucalipto e nas frações da matéria orgânica em solo da região do cerrado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 201–214, fev. 2012.

JOHNSON, C. M.; ULRICH, A. **Analytical methods for use in plants analyses**. Los Angeles, CA: [s.n.].

KER, J. C. LATOSSOLOS DO BRASIL: UMA REVISÃO. **Geonomos**, 1 jul. 1997.

LAVALLEE, J. M.; SOONG, J. L.; COTRUFO, M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. **Global Change Biology**, v. 26, n. 1, p. 261–273, 1 jan. 2020.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: Manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 2. ed. v. 1

LOUSIER, J. D.; PARKINSON, D. Litter decomposition in a cool temperate deciduous forest. **Canadian Journal of Botany**, v. 54, n. 5–6, p. 419–436, 1 mar. 1976.

MALUF, H. J. G. M. et al. Decomposição de resíduos de culturas e mineralização de nutrientes em solo com diferentes texturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1681–1689, dez. 2015a.

MALUF, H. J. G. M. et al. Disponibilidade e recuperação de nutrientes de resíduos culturais em solo com diferentes texturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1690–1702, dez. 2015b.

MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3. ed. San Diego: Academic Press, 2011.

MASANOBU FUKUOKA. A teoria da Agricultura Natural . Em: **Agricultura Natural: Teoria e prática da filosofia verde**. Nobel, 1985. p. 93–140.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: 2006.

O'CONNELL, A. M. Litter Dynamics in Karri (Eucalyptus Diversicolor) Forests of South- Western Australia. **The Journal of Ecology**, v. 75, n. 3, p. 781, set. 1987.

OLSON, J. S. Energy Storage and the Balance of Producers and Decomposers in Ecological Systems. **Ecology**, v. 44, n. 2, p. 322–331, abr. 1963.

PALM, C. A. et al. Organic inputs for soil fertility management in tropical agroecosystems: application of an organic resource database. **Ecosystems and Environment**, v. 83, p. 27–42, 2001.

PEREIRA, D. G. C. et al. Litter decomposition and nutrient release in different land use systems in the Brazilian semi-arid region. **CATENA**, v. 231, p. 107345, 1 out. 2023.

PHUKONGCHAI, W.; KAEWPRADIT, W.; RASCHE, F. Inoculation of cellulolytic and ligninolytic microorganisms accelerates decomposition of high C/N and cellulose rich sugarcane straw in tropical sandy soils. **Applied Soil Ecology**, v. 172, p. 104355, abr. 2022.

POEPLAU, C. et al. Isolating organic carbon fractions with varying turnover rates in temperate agricultural soils – A comprehensive method comparison. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 125, p. 10–26, out. 2018.

PRESCOTT, C. E.; VESTERDAL, L. Decomposition and transformations along the continuum from litter to soil organic matter in forest soils. **Forest Ecology and Management**, v. 498, p. 378–1127, 2021.

QUIRIJIN DE JONG VAN LIER. **Física do Solo**. 1. ed. v. Único. 2010.

REBÊLO, A. G. DE M. et al. Estoque de nutrientes e decomposição da serapilheira em sistemas agroflorestais no município de Belterra – Pará. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 4, p. 1876–1893, 23 nov. 2022.

ROSSMANN, A. DETERMINATION OF STABLE ISOTOPE RATIOS IN FOOD ANALYSIS. **Food Reviews International**, v. 17, n. 3, p. 347–381, 31 jul. 2001.

SALTON, J. C. et al. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1349–1356, out. 2011.

SANTONJA, M. et al. Climate change effects on litter decomposition: intensive drought leads to a strong decrease of litter mixture interactions. **Plant and Soil**, v. 393, n. 1–2, p. 69–82, 17 ago. 2015.

SILVA, J. P. DA et al. Combined legume and non-legume residues management improve soil organic matter on an Oxisol in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, 12 dez. 2022.

SIX, J. et al. **Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils.** **Plant and Soil**, 2002.

SOUZA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. Em: NOVAIS, R. F. et al. (Eds.). **Fertilidade do solo**. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 205–274.

SOUZA, H. N. DE et al. Protective shade, tree diversity and soil properties in coffee agroforestry systems in the Atlantic Rainforest biome. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 146, n. 1, p. 179–196, 1 jan. 2012.

SOUZA, H. N. et al. Selection of native trees for intercropping with coffee in the Atlantic Rainforest biome. **Agroforestry Systems**, v. 80, n. 1, p. 1–16, 2010.

SOUZA, I. F. et al. The mechanisms of organic carbon protection and dynamics of C-saturation in Oxisols vary with particle-size distribution. **European Journal of Soil Science**, v. 68, n. 5, p. 726–739, 1 set. 2017.

SOUZA, L. A. et al. Análise dos principais parâmetros que influenciam a compostagem de resíduos sólidos urbanos. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 8, n. 3, p. 194–212, 2020.

STEWART, C. E. et al. Soil carbon saturation: Evaluation and corroboration by long-term incubations. 2008.

TAIZ, L. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal** . 6. ed. Artmed, 2017.

TATSUMI, C. et al. Natural farming diversifies resource-utilisation patterns and increases network complexity in soil microbial community of paddy fields. 2023.

TERUO HIGA. **Agricultura Natural** . 1. ed. v. 1

TOTSCHKE, K. U. et al. Microaggregates in soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 181, n. 1, p. 104–136, 11 fev. 2018.

WANG, X. et al. Aboveground litter addition for five years changes the chemical composition of soil organic matter in a temperate deciduous forest. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 161, p. 108381, out. 2021.

ZANUNCIO, A. J. V.; COLODETTE, J. L. Teores de lignina e ácidos urônicos na madeira e polpa celulósica de Eucalipto. **Revista Árvore**, v. 35, n. 2, p. 341–347, mar. 2011.

7. MATERIAL SUPLEMENTAR

S1. Tratamentos e regressões no modelo de decaimento exponencial simples com dois parâmetros

Resíduos	Equação ajustada $f=a*\exp(-b*x)$	R ²
Menor DSC		
Serapilheira	$y = 94,6521^{**(0,2907**x)}$	0,44
Amendoim forrageiro	$y = 77,6483^{**(2,2042**x)}$	0,56
Margaridão	$y = 87,5708^{**(2,0660**x)}$	0,74
Tambu	$y = 91,3994^{**(-1,7213**x)}$	0,89
Bananeira	$y = 95,7983^{**(-3,1795**x)}$	0,92
Maior DSC		
Serapilheira	$y = 96,3923^{**(0,5795**x)}$	0,60
Amendoim forrageiro	$y = 84,0436^{**(4,0864**x)}$	0,75
Margaridão	$y = 90,0965^{**(2,0895**x)}$	0,81
Tambu	$y = 92,5680^{**(-1,3216**x)}$	0,81
Bananeira	$y = 94,3648^{**(-2,9010**x)}$	0,92

S2. Tratamentos e regressões no modelo de decaimento exponencial simples com três parâmetros

Resíduos	Equação ajustada $f = y_0 + a \cdot \exp(-b \cdot x)$	R ²
Menor DSC		
Serapilheira	$y = 85,9611 + 13,7075^{*(23,0390 \cdot x)}$	0,55
Amendoim forrageiro	$y = 41,2312 + 58,5183^{*(-28,8386 \cdot x)}$	0,95
Margaridão	$y = 42,2909 + 57,0363^{*(-11,7004 \cdot x)}$	0,92
Tambu	$y = 39,8063 + 55,8390^{*(5,2580 \cdot x)}$	0,92
Bananeira	$y = 17,8160 + 80,6595^{*(5,0060 \cdot x)}$	0,93
Maior DSC		
Serapilheira	$y = 63,9532 + 33,6028^{ns(2,5384 \cdot x)}$	0,61
Amendoim forrageiro	$y = 28,5465 + 70,0185^{*(-17,4723 \cdot x)}$	0,89
Margaridão	$y = 40,1823 + 58,1049^{*(-8,5297 \cdot x)}$	0,9
Tambu	$y = 48,7107 + 47,9001^{*(5,1438 \cdot x)}$	0,85
Bananeira	$y = 22,5950 + 752538^{*(-5,3180 \cdot x)}$	0,93

S3. Teores médios iniciais e finais observados de N, P, K, Ca, Mg e S da matéria seca remanescente dos resíduos.

Resíduo	CI ⁽¹⁾	CF ⁽²⁾	QL ⁽³⁾	% ⁽⁴⁾
Nitrogênio (0-10cm)				
Serapilheira	0,112	0,118	-0,006	-5,35
Amendoim forrageiro	0,216	0,082	0,134	62,03
Tambu	0,060	0,055	0,004	6,66
Bananeira	0,209	0,061	0,148	70,81
Margaridão	0,096	0,065	0,030	31,25
Nitrogênio (10-20cm)				
Serapilheira	0,112	0,108	0,005	4,46
Amendoim forrageiro	0,216	0,051	0,166	76,85
Tambu	0,060	0,069	-0,010	-16,66
Bananeira	0,209	0,058	0,151	72,24
Margaridão	0,096	0,063	0,032	33,33
Fósforo(0-10cm)				
Serapilheira	0,004	0,003	0,001	25,0
Amendoim forrageiro	0,013	0,007	0,006	46,15
Tambu	0,004	0,003	0,001	25,0
Bananeira	0,017	0,006	0,011	64,70
Margaridão	0,011	0,007	0,004	36,36
Fósforo(10-20cm)				
Serapilheira	0,009	0,011	-0,002	-22,22
Amendoim forrageiro	0,212	0,029	0,183	86,32
Tambu	0,057	0,011	0,045	78,94
Bananeira	0,233	0,042	0,191	81,97
Margaridão	0,132	0,025	0,107	81,06
Potássio (10-20cm)				
Serapilheira	0,009	0,011	-0,002	-22,22
Amendoim forrageiro	0,212	0,016	0,196	92,45
Tambu	0,057	0,013	0,044	77,19
Bananeira	0,233	0,050	0,184	78,96
Margaridão	0,132	0,029	0,103	78,03
Cálcio (0-10cm)				
Serapilheira	0,016	0,050	-0,035	-218,75
Amendoim forrageiro	0,108	0,088	0,020	18,51
Tambu	0,041	0,036	0,005	12,19
Bananeira	0,063	0,030	0,033	52,38
Margaridão	0,072	0,064	0,008	11,11
Cálcio (10-20cm)				
Serapilheira	0,016	0,039	-0,023	-143,75
Amendoim forrageiro	0,108	0,046	0,062	57,40
Tambu	0,041	0,037	0,004	9,75
Bananeira	0,063	0,022	0,041	65,07
Margaridão	0,072	0,053	0,018	25,0
Magnésio (0-10cm)				
Serapilheira	0,004	0,012	-0,008	-200,0
Amendoim forrageiro	0,022	0,016	0,005	22,72
Tambu	13,029	0,011	13,018	99,91
Bananeira	0,030	0,010	0,020	66,66
Margaridão	0,030	0,026	0,006	20,0
Magnésio (10-20cm)				
Serapilheira	0,004	0,010	-0,005	-125,0
Amendoim forrageiro	0,022	0,008	0,014	63,63
Tambu	13,029	0,011	13,017	99,90

Bananeira	0,030	0,008	0,022	73,33
Margaridão	0,030	0,021	0,011	36,66
Enxofre (0-10cm)				
Serapilheira	0,009	0,011	-0,002	-22,22
Amendoim forrageiro	0,015	0,009	0,006	40,0
Tambu	0,009	0,006	0,003	33,33
Bananeira	0,019	0,005	0,014	73,68
Margaridão	0,011	0,007	0,004	36,36
Enxofre (10-20cm)				
Serapilheira	0,009	0,009	-0,001	-11,11
Amendoim forrageiro	0,015	0,015	0,010	66,66
Tambu	0,009	0,009	0,003	33,33
Bananeira	0,019	0,019	0,014	73,68
Margaridão	0,011	0,011	0,004	36,36

⁽¹⁾CI = Conteúdo inicial do nutriente, g. ⁽²⁾CF = Conteúdo final do nutriente no resíduo vegetal após 152 dias de incubação, g. ⁽³⁾QL = Quantidade mineralizada do nutriente. ⁽⁴⁾% = Porcentagem representativa da quantidade mineralizável.

S4. Conteúdo médio inicial e final observado de Zn, Cu, Fe Mn e B na matéria seca remanescente dos resíduos.

Resíduo	CI ⁽¹⁾	CF ⁽²⁾	QL ⁽³⁾	% ⁽⁴⁾
Zinco (0-10 cm)				
Serapilheira	0,156	0,172	- 0,016	-10,25
Amendoim forrageiro	0,238	0,181	0,057	23,95
Tambu	0,087	0,066	0,021	24,14
Bananeira	0,175	0,080	0,095	54,28
Margaridão	0,376	0,257	0,119	31,65
Zinco (10-20 cm)				
Serapilheira	0,156	0,189	- 0,033	-21,15
Amendoim forrageiro	0,238	0,114	0,124	52,10
Tambu	0,087	0,079	0,008	9,19
Bananeira	0,175	0,068	0,107	61,14
Margaridão	0,376	0,268	0,108	28,72
Cobre (0-10 cm)				
Serapilheira	0,086	0,105	- 0,019	-22,09
Amendoim forrageiro	0,091	0,076	0,015	16,48
Tambu	0,040	0,033	0,007	17,5
Bananeira	0,047	0,037	0,009	19,15
Margaridão	0,065	0,053	0,012	18,46
Cobre (10-20 cm)				
Serapilheira	0,086	0,095	- 0,009	-10,46
Amendoim forrageiro	0,091	0,044	0,046	50,55
Tambu	0,040	0,042	- 0,002	-5
Bananeira	0,047	0,037	0,009	19,15
Margaridão	0,065	0,058	0,006	9,23
Ferro (0-10 cm)				
Serapilheira	105,381	34,360	71,021	67,39
Amendoim forrageiro	5,229	25,905	- 20,376	-389,67
Tambu	1,201	9,500	-8,299	-691,00
Bananeira	3,070	17,308	-14,238	-463,77
Margaridão	2,029	9,745	-7,715	-380,24
Ferro (10-20 cm)				
Serapilheira	105,381	36,729	68,652	65,15
Amendoim forrageiro	5,529	12,159	- 6,630	-119,91
Tambu	1,201	13,358	- 12,157	-1.012,24
Bananeira	3,070	26,878	-23,808	-775,50
Margaridão	2,029	17,164	-15,135	-745,93
Manganês (0-10 cm)				
Serapilheira	0,916	1,320	- 0,404	-44,10
Amendoim forrageiro	0,288	0,418	- 0,130	-45,14
Tambu	0,371	0,355	0,016	4,31
Bananeira	1,555	0,481	1,074	69,07
Margaridão	0,548	0,420	0,128	23,36
Manganês (10-20 cm)				
Serapilheira	0,916	1,276	- 0,360	-39,30
Amendoim forrageiro	0,288	0,264	0,024	8,33
Tambu	0,371	0,455	- 0,083	-22,37
Bananeira	1,555	0,439	1,116	71,77
Margaridão	0,548	0,442	0,105	10,5
Boro (0-10 cm)				
Serapilheira	0,092	0,127	- 0,035	19,16
Amendoim forrageiro	0,178	0,122	0,056	31,46
Tambu	0,184	0,100	0,084	45,65
Bananeira	0,180	0,063	0,117	65

Margaridão	0,563	0,266	0,296	52,57
		Boro (10-20 cm)		
Serapilheira	0,092	0,105	-0,013	-14,13
Amendoim forrageiro	0,178	0,076	0,102	57,30
Tambu	0,184	0,126	0,058	31,52
Bananeira	0,180	0,069	0,111	61,67
Margaridão	0,563	0,301	0,262	46,54

⁽¹⁾CI = Conteúdo inicial do nutriente, g. ⁽²⁾CF = Conteúdo final do nutriente no resíduo vegetal após 152 dias de incubação, g. ⁽³⁾QL = Quantidade mineralizada do nutriente. ⁽⁴⁾% = Porcentagem representativa da quantidade mineralizável.

CAPÍTULO 3

MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO: QUANTIDADE, QUALIDADE E DÉFICIT DE SATURAÇÃO DE CARBONO EM SOLOS DE CAFEZAIS MANEJADOS SOB OS PRINCÍPIOS DA AGRICULTURA NATURAL

CHAPTER 3

SOIL ORGANIC MATTER: QUANTITY, QUALITY, AND CARBON SATURATION DEFICIT IN COFFEE PLANTATIONS SOILS MANAGED UNDER THE PRINCIPLES OF NATURAL AGRICULTURE

RESUMO

O manejo da biomassa vegetal preconizado pela agricultura natural representa importante fonte de Carbono (C) e energia para os sistemas cultivados, com resultados na manutenção da capacidade produtiva dos solos. No entanto, os solos não possuem uma capacidade infinita de armazenamento de C. Quanto mais distante do Nível de Saturação de Carbono - NSC (inerente ao solo) maior deveria ser a eficiência de materiais vegetais contribuírem efetivamente para aumentos na Matéria Orgânica do Solo (MOS). Ao longo do tempo de adoção desse manejo, há um favorecimento ao aumento de C no sistema, conforme o manejo de resíduos realizado, levando a déficits de saturação de C (DSC) cada vez menores. Assim, o objetivo desse capítulo foi avaliar quantitativamente e qualitativamente as frações da matéria orgânica do solo - particulada (MOP), e associada a minerais (MOAM) em áreas de café manejadas sob os princípios da Agricultura Natural ao longo do tempo, na linha e entrelinha, bem como o DSC. O trabalho foi realizado na propriedade sítio Pedra Redonda. As coletas foram realizadas em 4 talhões da propriedade, com diferentes idades de implantação e transição para o manejo sob os princípios da agricultura natural – nove, cinco, três e um ano da adoção do manejo e área de vegetação natural. Amostras foram coletadas na camada de 0-5cm e realizado o fracionamento físico da MOS - MOP e MOAM, e analisados em cada fração, o teor de C e Nitrogênio (N). Foi realizado ainda, análise de termoquimólise para caracterização dos compostos orgânicos. Nas áreas com maior tempo de manejo na Agricultura Natural (com 9 e 5 anos), observou-se que, tanto o C-MOP quanto o C-MOAM na entrelinha são semelhantes à vegetação natural. O mesmo padrão é observado para o N-MOP e o N-MOAM. Quanto ao manejo de resíduos, nas áreas em análise, a entrelinha é utilizada para essa finalidade, exceto no talhão araras (com 1 ano), onde os resíduos são aplicados diretamente na linha. Essa distinção também se estende à composição molecular da matéria orgânica, evidenciando que os compostos nas áreas com maior tempo de cultivo e manejo se aproximam mais da composição da vegetação natural. Em geral a MOP é composta de alcanos, alcanóis, derivados de cutina, lipídeos e ácidos graxos e a MOAM é composta de alcanos, alcanóis de cadeia longa, ácidos graxos, cutina e alcenos. Já o DSC no solo não teve diferença entre as áreas manejadas. O uso de resíduos adotado para manejar o solo vem proporcionando melhorias em relação a dinâmica de carbono e nitrogênio, mantendo equilíbrio entre as entradas e saídas de carbono, com tendência a se assemelhar a condição natural à medida que aumenta tempo de manejo.

Palavras-chave: Agroecossistemas, Carbono, Nitrogênio, Manejo agroecológico, TMAH-GC-MS.

ABSTRACT

The management of plant biomass advocated by natural agriculture represents an important source of carbon (C) and energy for cultivated systems, resulting in the maintenance of soil productivity. However, soils do not have an infinite capacity to store C. The further away from the Carbon Saturation Level - CSL (inherent to the soil), the greater the efficiency of plant materials to effectively contribute to increases in Soil Organic Matter (SOM). Over time, with the adoption of this management, there is possibly a favoring of increased C in the system, depending on the residue management carried out, leading to decreasing Carbon Saturation Deficits (CSD). Thus, the objective of this chapter was to evaluate the fractions of soil organic matter quantitatively and qualitatively - particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MAM) in coffee areas managed under the principles of Natural Agriculture over time, in the row and between the rows, as well as the CSD. The work was carried out at Pedra Redonda farm. Samples were collected in 4 plots of the property, with different ages of implementation and transition to management under the principles of natural agriculture - nine, five, three, and one year after the adoption of management and in a natural vegetation area. Samples were collected in the 0-5 cm layer, and physical fractionation of SOM - POM and MAM was performed, and the content of Carbon (C) and Nitrogen (N) was analyzed in each fraction. Thermochemolysis analysis was performed for characterization of organic compounds. In areas with longer periods of Natural Agriculture management (with 9 and 5 years), it was observed that both POM-C and MAM-C in the inter-row were similar to natural vegetation. The same pattern is observed for POM-N and MAM-N. Regarding residue management, in the analyzed areas, the inter-row is used for this purpose, except in the "araras" plot (with 1 year), where residues are applied directly to the row. This distinction also extends to the molecular composition of organic matter, indicating that compounds in areas with longer cultivation and management times are closer to the composition of natural vegetation. In general, POM is composed of alkanes, alcohols, cutin derivatives, lipids, and fatty acids, while MAM is composed of alkanes, long-chain alcohols, fatty acids, cutin, and alkenes. The CSD in the soil did not differ between managed areas. The use of residues adopted to manage the soil under the principles of natural agriculture has been providing improvements in relation to carbon and nitrogen dynamics, maintaining a balance between carbon inputs and outputs, with a tendency to resemble natural conditions as management time increases.

Keywords: Agroecosystems, Carbon, Nitrogen, Agroecological Management, TMAH-GC-MS.

1. INTRODUÇÃO

A agricultura natural promove a vitalidade do solo (TERUO HIGA, 1989), pois compreende que o solo possui energia vital que desempenha papel importante na sustentação da vida. Todas as atividades e técnicas empregadas na agricultura natural objetivam a preservação e o aprimoramento dessa energia vital, que influencia a saúde do solo e das plantas nele cultivadas (FUKUOKA, 1985). No manejo do solo é utilizado a biomassa vegetal, proveniente da própria área, para alimentar a vida do solo e suprir as necessidades nutricionais das plantas. Entre outros materiais, utiliza-se as plantas espontâneas presentes nos sistemas agrícolas. A abordagem da agricultura natural rejeita o uso de agrotóxicos, de fertilizantes químicos, de esterco de origem animal e o revolvimento do solo, prática comum em métodos agrícolas convencionais (FUKUOKA, 1985; HUILIAN, 2006).

A agricultura natural é um dos estilos que impulsiona a transição agroecológica rumo a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. A agroecologia, enquanto ciência busca promover a transição para sistemas alimentares que preservem os recursos naturais, por meio de um processo gradual de desenho e construção de agroecossistemas complexos, considerando as particularidades de cada sistema e o bem-estar dos envolvidos (CAPORAL, 2009). A transição agroecológica diz respeito à evolução progressiva dos agricultores e consumidores e do uso progressivo dos princípios agroecológicos em detrimento dos princípios convencionais. A transição envolve alterações tecnológicas, sociais, institucionais e organizacionais do sistema agroalimentar (GLIESSMAN, 2016). A transição pode influenciar as formas como os agricultores se organizam, valorizar a sua cultura tradicional e as formas como as pessoas relacionam entre si (GUSMÁN et al., 2012; TEIXEIRA et al., 2018a). O processo de transição agroecológica pode envolver várias fases, a depender das técnicas e das práticas de manejo e do redesenho dos sistemas agroalimentares (GLIESSMAN, 2015).

Diversas práticas e técnicas empregadas no manejo dos agroecossistemas incorporam conceitos e teorias ecológicas relacionadas à biodiversidade, à compreensão da sucessão vegetal, conservação dos solos e água e à gestão eficiente da ciclagem de nutrientes, dentre outras (ALTIERI, 2012). No que se refere ao solo, atualmente, diversas práticas que visam melhorar sua qualidade se baseiam em estratégias que favorecem a cobertura e o incremento de matéria orgânica, como as adubações verdes (ESPINDOLA et al., 2005), o uso de resíduos orgânicos (SILVA et al., 2022; DĂMĂȚÎRCĂ et al., 2023) e a redução do revolvimento do solo como práticas conservacionistas (CALEGARI; COSTA, 2010).

O aporte de resíduos orgânicos é uma estratégia crucial para a manutenção e melhoria da qualidade do solo. Esses resíduos, como os restos culturais e de poda, contribuem para a formação da matéria orgânica do solo (MOS, BETTIOL et al., 2023) e influenciam o ciclo de nutrientes por meio da mineralização dos nutrientes presentes nos resíduos aportados (MALUF et al., 2015a, 2015b; DA SILVA et al., 2022; DUARTE et al., 2013; PEREIRA et al., 2023; SILVA et al., 2022; SOUZA et al., 2012).

A MOS é constituída de uma variedade de compostos provenientes da decomposição de resíduos orgânicos e microbianos, que altera as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (COTRUFO et al., 2015) e proporciona uma série de benefícios aos sistemas agrícolas, pois promove a atividade microbiana, aprimora o condicionamento físico do solo, cria efeito tampão biológico e químico, promove a regulação térmica e melhora da retenção de água (SILVA; MENDONÇA, 2007). Práticas conservacionistas, que buscam preservar ou aumentar os estoques de MOS contribuem de maneira substancial para esses efeitos benéficos em escala global.

A compreensão do acúmulo de carbono no solo, sua persistência e resposta à disponibilidade de nitrogênio podem ser mais precisas se considerar a matéria orgânica particulada (MOP) e a matéria orgânica associada a minerais (MOAM), consideradas frações mais abrangentes da matéria orgânica do solo (CASTELLANO et al., 2015; COTRUFO et al., 2015). A MOP, em sua maioria derivada de fontes vegetais, é composta por muitos compostos estruturais de carbono com baixo teor de nitrogênio (GOLCHIN et al., 1994). Sua persistência no solo é sustentada pela sua recalcitrância bioquímica, proteção física em agregados e inibição microbiana (COTRUFO et al., 2019). A MOAM é predominantemente composta por produtos microbianos mais ricos em nitrogênio e persiste no solo devido à sua ligação química aos minerais de argila e silte e à proteção física em pequenos agregados (KÖGEL-KNABNER et al., 2008). Devido a estas características, a MOP é mais suscetível a perturbações e apresenta ciclagem mais rápida em comparação com a MOAM. Essas frações podem ser separadas analiticamente por tamanho ou densidade e revelam diferenças consistentes (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992). A MOAM possui densidade maior que $1,6 \text{ g/cm}^3$ e é menor que $63 \text{ }\mu\text{m}$, enquanto a MOP leve possui densidade menor que $1,85 \text{ g/cm}^3$ e a MOP pesada possui densidade maior que $1,85 \text{ g/cm}^3$ e ambas são maiores que $63 \text{ }\mu\text{m}$ (COTRUFO et al., 2015).

Devido a sua maior estabilidade, a MOAM possui uma capacidade maior em estocar carbono em relação à MOP. A capacidade máxima de retenção de carbono, também denominada Nível de Saturação de Carbono (NSC), é definida como o ponto em que o

aumento das entradas de carbono não resulta mais no aumento da quantidade de carbono orgânico protegido por minerais e este fica em um estado estacionário. Em outras palavras, é o ponto em que o sistema atinge o equilíbrio entre a entrada e saída de carbono na fração protegida por minerais do solo. A quantidade necessária de carbono para atingir o NSC é chamada de Déficit de Saturação de Carbono (DSC, Castellano et al., 2015).

Técnicas de caracterização molecular da matéria orgânica do solo também tem sido utilizada em estudos para melhor compreender a dinâmica da MOS e as implicações das práticas de manejo nas perdas e ganhos de C e nutrientes. Dentre as técnicas, a quimólise da matéria orgânica do solo, com subsequente identificação dos fragmentos por cromatografia gasosa tem sido utilizada na compreensão e monitoramento da qualidade da matéria orgânica do solo.

Com a técnica evita-se perdas significativas de grupos funcionais, como COOH e OH, durante o processo de quimólise, o que contribui para reduzir a formação de artefatos químicos resultantes de reações desses grupos com a própria matéria orgânica. Ao preservar a integridade das estruturas moleculares, a quimólise permite uma análise mais precisa dos componentes orgânicos do solo e oferece informações valiosas e mais detalhadas sobre a dinâmica do carbono do solo, especialmente em relação aos lipídios, a lignina (NOVOTNY; CANELLAS, 2022) e as frações da MOS, como MOP e MOAM (MASON; FILLEY; ABBOTT, 2009). A compreensão aprimorada da qualidade da matéria orgânica do solo contribui para a implementação de estratégias de manejo mais sustentáveis do solo.

O pressuposto desta pesquisa foi: as propriedades elementares e moleculares da matéria orgânica serão tanto mais semelhantes à condição natural quanto maior o tempo de manejo que utiliza os princípios da agricultura natural. O objetivo desse capítulo foi avaliar as alterações na quantidade e qualidade da matéria orgânica utilizando a técnica da quimólise. Especificamente objetivou (i) Avaliar as alterações no C e N das frações da MOP e da MOAM; (ii) Determinar a composição molecular da MOS e; (iii) identificar os déficits de DSC. Especificamente, objetivou-se avaliar as frações da MOP e da MOAM e o déficit de saturação de C ao longo do tempo de manejo.

A pesquisa avaliou as alterações da matéria orgânica do solo (MOS) em talhões de café com diferentes tempos de transição da Agricultura Orgânica para a Agricultura Natural.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo

O trabalho foi desenvolvido no município de Araponga, localizado na região da Zona da Mata Mineira (Figura1). O território da Zona da Mata mineira, está inserido no Sudeste do Estado e no bioma Mata Atlântica. Os fragmentos desta vegetação estão intercalados com pastagem e áreas de café formando um mosaico, característico da região (GOMES et al., 2020), que ganha ainda mais forma pelo desenho das propriedades rurais, que em sua maioria são de agricultores familiares, com pequenas propriedades e alta diversidade de cultivos (TEIXEIRA et al., 2018b).

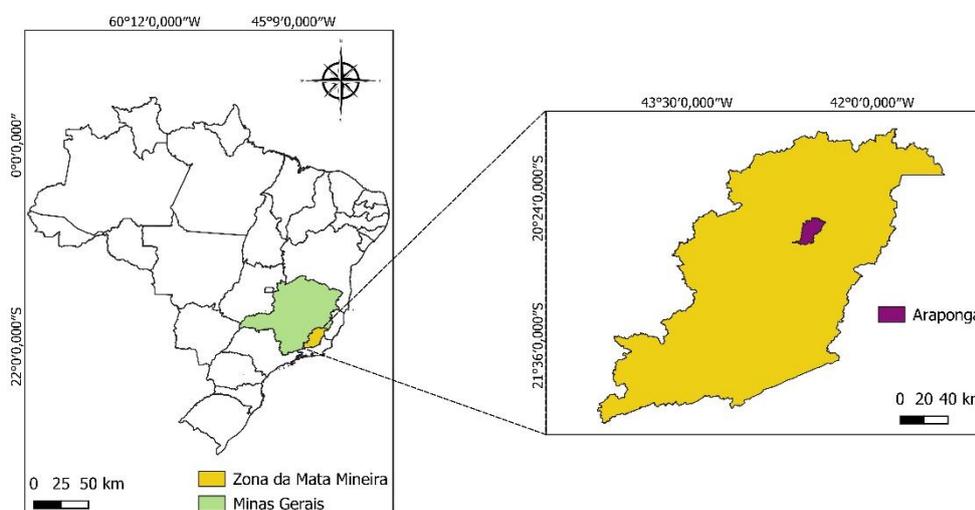


Figura 1. Localização do município de Araponga, Zona da Mata de Minas Gerais.

Os solos da região são Latossolos Vermelho-amarelo (KER, 1997). A geomorfologia é montanhosa, inserida no relevo de “mares e morros” (AB’SABER, 2007) com áreas de declive de até 45% e altitude varia de 200 a 1800 m. A temperatura média anual é de 18 °C, ideal para o cultivo e condução de café arábica (*Coffea arábica*), que se desenvolve bem entre 18 e 22 °C (GOLFARI, 1975; DE CARVALHO et al., 2021). A precipitação da região varia entre 1200 e 1800 mm (GOMES et al., 2016).

A área de estudo está no sítio denominado Pedra Redonda, em uma propriedade com manejo da agricultura familiar, no entorno do Parque Estadual da Serra do Brigadeiro. A propriedade está a 1200 m de altitude e possui 12 hectares, sendo 7 hectares cultivados com café, 5 hectares de vegetação nativa, áreas em pousio e pastagem (Figura 3). Os cafezais são distribuídos em talhões, consorciados com árvores nativas, frutíferas e espécies anuais para consumo familiar e comercialização, atualmente manejados sob os princípios da agricultura natural.

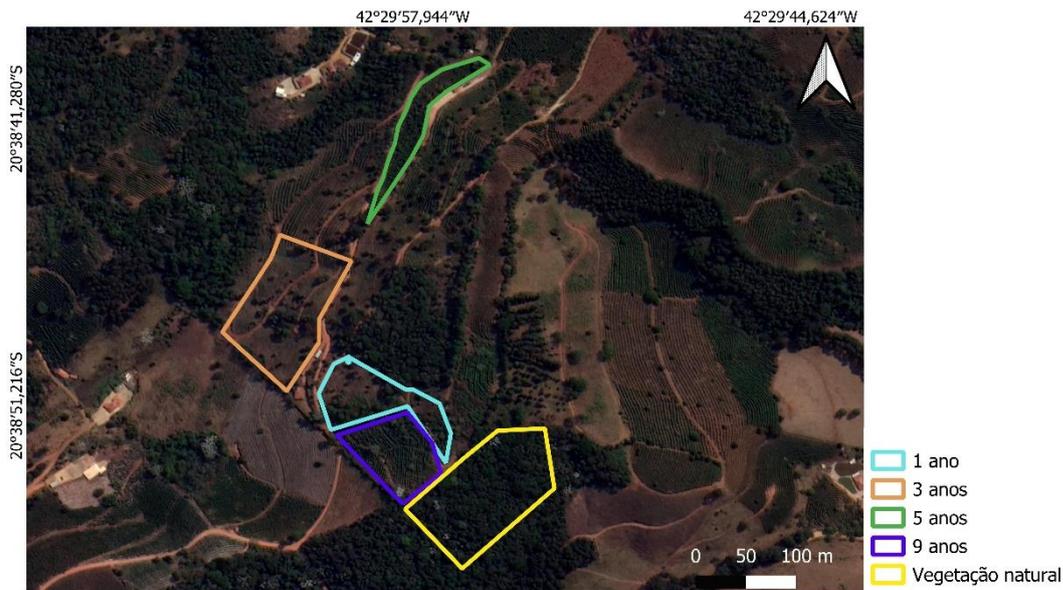


Figura 2. Talhões de café e área de vegetação natural no sítio Pedra redonda. Araponga – MG .

2.2. Histórico de manejo

O sítio Pedra Redonda tem como principal atividade a produção de café desde 1999. Nesse período, o agricultor ainda fazia uso de adubos químicos, mas nunca fez uso de agrotóxicos. A partir de 2002, ele iniciou um processo de transição para o cultivo orgânico, adotando práticas como a utilização de esterco de boi, cama de frango, torta de mamona e farelo de osso na adubação, além do plantio de espécies arbóreas em conjunto com o café. Ao longo dos anos ele foi aumentando suas áreas de lavouras e atualmente possui nove talhões de café. Os cafezais mais recentes possuem espaçamentos planejados para inserção de árvores. No entanto, em 2014, ele começou o processo de transição para a agricultura natural em um dos talhões de café. Em 2018 ele iniciou à transição de todos os talhões para o manejo de acordo com os princípios da agricultura natural. Para a pesquisa foram selecionados quatro talhões, em diferentes idades de manejo sob os princípios da agricultura natural e uma área de vegetação nativa adjacente, com vegetal natural (Figura 2, Tabela 1).

Tabela 1. Descrição dos talhões de cafezais manejados sob agricultura natural na propriedade Sitio Pedra Redonda.

Identificação do Talhão	Ano da Implantação¹	Nº de plantas	Espaçamento (m)	Variedade Utilizada	Adubação antes da transição	Ano de transição²	Tempo de manejo natural
T1	2021	1000	4,5 x 1,5	Arara	Desde a implantação: manejo natural	-	1 ano
T3	2018	1800	2 x 1	Catiguá	Sistema orgânico desde a implantação: Cama de frango	2020	3 anos
T5	2001 e 2002	1800	2,3 x 1,2	Catuaí vermelho	Sistema orgânico desde implantação: Esterco de boi e uma aplicação de cama de frango	2018	5 anos
T9	2000	800	2,3 x 1,2	Catuaí vermelho	Sistema orgânico desde a implantação: Esterco de boi	2014	9 anos

Os talhões escolhidos foram manejados inicialmente de acordo com os princípios da agricultura orgânica, exceto o talhão de um ano que foi implantado seguindo os princípios da agricultura natural, seguidos atualmente em todos os talhões.

Os talhões com nove e cinco anos de manejo sob os princípios da agricultura natural foram inicialmente adubadas com esterco de boi, mas a última recebeu uma aplicação de cama de frango. O talhão com 3 anos de manejo natural era anteriormente adubado com cama de frango. A área com um ano de manejo, implantando no final de 2021, de acordo com os princípios da agricultura natural. Esta área anteriormente estava em pousio, com pastagem colonizado por samambaias (*Pteridium aquilinum*) e algumas árvores pioneiras devido à proximidade com a vegetação nativa.

A adubação das lavouras de café é realizada duas vezes ao ano, utilizando em média de 20 a 30kg de resíduos por planta. A primeira aplicação ocorre em fevereiro, enquanto a segunda acontece após a safra, entre setembro e outubro, aproveitando a disponibilidade de tempo e resíduos nesse período.

Na adubação das lavouras de café, são utilizados diversos resíduos, incluindo a serapilheira da vegetação nativa e resíduos de árvores que estão plantadas nas lavouras (ver tabela 4 do capítulo 1). Essas espécies além de servirem como biomassa para adubação desempenham outras funções no sistema como, barreira natural, quebra-vento, controle biológico, comercialização de alguns frutos e alimentação da família, animais domésticos e silvestres. O agricultor também incorpora as podas das árvores e arbustos, bem como a vegetação herbácea, como braquiária e margaridão (*Thitonia diversifolia*), amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*), bananeira (*Musa sp.*) e vegetação espontânea. O manejo dos resíduos é feito considerando o estágio ideal das plantas, visando um maior aproveitamento. O agricultor normalmente adiciona os resíduos nas entrelinhas, exceto na área manejada a 1 ano, onde os resíduos são aplicados diretamente na linha.

2.3. Definição das áreas de coleta e amostragem de solo

Para a caracterização química e textural (Tabela 2), os solos foram amostrados em 2022, na profundidade de 0-5cm na linha e na entrelinha de café, com auxílio de um trado de sonda. A entrelinha do café é considerada o espaçamento entre uma a linha de plantio e outra dentro de uma lavoura, já a linha corresponde ao local de plantio das plantas de café (coleta realizada na projeção das copas). A coleta foi realizada em 4 faixas dentro de cada talhão, compondo as repetições. Foram coletadas seis amostras simples para compor

uma composta em cada faixa. As amostras foram secas ao ar (TFSA), homogeneizadas e passadas em peneiras com malha de 2 mm e analisadas (Tabela 2).

Tabela 2. Caracterização química e classe textural do solo coletado em cafezais manejados com 1, 3, 5 e 9 anos utilizando os princípios da agricultura natural, em Araponga, Minas Gerais.

Propriedades	T1		T3		T5		T9		Vegetação Natural
	EL ¹	L ²	EL	L	EL	L	EL	L	
pH em H ₂ O	5,31	5,41	5,63	5,65	6,21	6,35	5,77	6,06	4,67
P (mg/dm ⁻³)	6,2	37,9	2,7	12,0	12,0	16,8	5,2	5,7	5,0
K (mg/dm ⁻³)	90	109	179	163	439	376	195	309	72
Ca ²⁺ (cmol _c /dm ⁻³)	2,98	3,04	3,82	4,27	5,47	5,82	5,57	5,22	0,09
Mg ²⁺ (cmol _c /dm ⁻³)	0,41	0,64	1,57	1,55	2,18	2,61	2,42	2,17	0,12
Al ³⁺ (cmol _c /dm ⁻³)	0,30	0,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,68
H+Al (cmol _c /dm ⁻³)	12,2	11,7	8,6	8,6	7,6	6,0	9,4	7,4	22,5
SB (cmol _c /dm ⁻³)	3,62	3,96	5,85	6,24	8,78	9,39	8,49	8,18	0,39
t (cmol _c /dm ⁻³)	3,92	4,25	5,85	6,24	8,78	9,39	8,49	8,18	3,07
T (cmol _c /dm ⁻³)	15,82	15,66	14,45	14,84	16,38	15,39	17,89	15,58	22,89
V (%)	22,9	25,3	40,5	42,0	53,6	61	47,5	52,5	1,7
m (%)	7,7	6,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	87,3
P-rem (mg/L)	10,6	11,6	15,1	17,0	15,7	15,1	17,5	18,5	8,2
Cu	0,55	1,63	0,60	0,50	0,56	0,54	0,43	0,47	0,39
Mn	10,1	22,4	17,8	23,1	36,6	37,4	17,7	15,9	3,3
Fe	81,4	95,8	65,2	64,0	56,3	46,3	44,5	29,3	101,4
Zn	2,55	11,32	2,66	3,16	3,75	4,01	3,56	3,66	2,25
Classe textural	Argiloso	Argiloso	Argilo-arenoso	Argilo-arenoso	Argiloso	Argiloso	Argiloso	Argiloso	Argiloso

pH em água. Carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) obtidos através da proporção dos teores de C e N nas frações MOP e MOAM, determinados em espectrômetro de massa da razão isotópica (IRMS). P e K - Extrator Mehlich-1. Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺ - Extrator: KCl 1 mol/L. H + Al - Extrator Acetato de Cálcio 0,5 mol/L a pH 7,0. Soma de bases trocáveis (SB). Capacidade de troca de catiônica efetiva (t) e a pH 7,0 (T). Índices de saturação por bases (V) alumínio (m). P-rem - Fósforo remanescente. Classificação textural (QUIRIJIN DE JONG VAN LIER, 2010). ¹ Entrelinha e ² linha: Posição de amostragem dos solos nos cafezais

2.4. Fracionamento físico da Matéria Orgânica do Solo (MOS)

Para avaliar a contribuição dos resíduos para as frações da MOS e a eficiência desses resíduos na transferência de C e N para o solo, foi realizado o fracionamento físico da MOS em MOP e MOAM (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992). Inicialmente, uma subamostra de solo (10 g) foi dispersa com 30 mL de solução de hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}), em uma proporção (1:3 m:v) por 15 h em um agitador horizontal. Em seguida, realizou-se o peneiramento úmido com o auxílio de uma peneira com 53 μm de malha. O material retido é denominado de MOP (fração areia e matéria orgânica de partículas macro-orgânicas) e a fração que passou pela peneira é a MOAM (frações argila, silte e matéria orgânica dissolvida e ligada a minerais). Após o fracionamento, as frações foram secas em estufa a 60° até atingirem peso constante e preparadas para determinação dos teores totais de Carbono (C-MOP e C-MOAM) e Nitrogênio (N-MOP e N-MOAM) em espectrômetro de massa da razão isotópica (IRMS).

2.5. Estimativa do Nível de Saturação de C e Déficit de Saturação de C do solo

A estimativa do nível de saturação de carbono (NSC) do solo foi obtida através da adaptação do cálculo proposto por Six et al., 2002. Esta equação pode ser utilizada para inferir o total de Carbono Orgânico do Solo (COS) retido na fração argila + silte em solos dominados por filossilicatos 1:1 (por exemplo, Latossolos). A equação ajustada para determinar o nível de saturação de C é apresentada a seguir:

$$\text{NSC: } 4,932 + 0,20 \times (s + a), \quad \text{Equação 6}$$

em que, NSC representa o nível de saturação ou proteção de C (g kg^{-1} de solo) estabilizado pelas frações silte e argila (C-MAM em g kg^{-1} de solo). Sendo (s + a) a fração $<53 \mu\text{m}$ (silte + argila), expresso como uma porcentagem (%) da fração de terra fina.

A partir da estimativa do NSC foi estimado o déficit de saturação de carbono (DSC), obtida pela equação abaixo, conforme SOUZA et al., 2017.

$$\text{DSC (\%)} = \frac{\text{NSC} - \text{COS}}{\text{NSC}} \times 100 \quad \text{Equação 7}$$

em que, COS é o carbono orgânico do solo real na fração argila + silte em (g kg^{-1} de solo).

2.6. Composição bioquímica das frações MOP e MOAM

Para a determinação da composição bioquímica da MOP e MOAM, aplica-se a hidrólise e a metilação termicamente assistida acoplada à cromatografia gasosa com espectrometria de massa (TMH-GC-MS), também conhecida como termoquimólise. Para

o trabalho, adotou-se uma versão modificada do procedimento descrito por Chefetz et al. (2000). As amostras das frações MOP (200 mg) e MOAM (100 mg) foram submetidas ao processo de metilação assistida por hidróxido de tetrametilamônio (TMAH) (200 μ L). As amostras, juntamente com a solução de TMAH em metanol (25 % m:v), foram submetidas à secagem em evaporador de solventes, utilizando fluxo contínuo de nitrogênio à 38 °C, seguida por tratamento térmico em mufla a 300 °C por 30 minutos. Posteriormente, foram ressuspensas em diclorometano (3 mL), coletadas com seringa de vidro e filtradas por meio de filtro hidrofílico de 0,45 μ m. Adicionalmente, 50 μ L do padrão interno de nonadecanoato de metila (C19:0) foram acrescentados. As amostras foram, então, submetidas a nova etapa de secagem no evaporador de solventes e armazenadas a -18 °C. Para a análise, as amostras foram novamente ressuspensas em diclorometano (200 μ L), armazenadas e posteriormente submetidas à cromatografia gasosa acoplada a um espectrômetro de massas (GC-MS), utilizando um equipamento Shimadzu GP 2010SE. O Hélio (He) foi utilizado como gás de arraste. A coluna capilar Rtx – 5 MS (5 % bifenil, 95 % dimetilpolisiloxano) de dimensões 30 m x 0,25 mm x 0,25 μ m foi empregada, e a injeção da amostra foi de 1 μ L. As condições cromatográficas abrangeram uma temperatura inicial de 60 °C, com uma taxa de aquecimento de 15 °C min^{-1} até atingir 150 °C. A partir desse ponto, a taxa de aquecimento foi ajustada para 4 °C até alcançar a temperatura final de 300 °C, a qual foi mantida por 5 minutos. O injetor e a fonte de íons foram mantidos a 300 °C e 200 °C, respectivamente.

O espectrômetro de massas operou em modo de impacto eletrônico a 70 e V, com uma varredura na faixa de 35-700 m/z. A identificação dos compostos baseou-se na biblioteca National Institute of Standards and Technology (NIST), utilizando um índice de similaridade de 85%. Os grupos siloxanos e suas respectivas áreas de pico foram excluídos da análise de abundância relativa devido à sua origem associada à derivação da coluna Rtx.

Os compostos orgânicos foram classificados nos seguintes grupos orgânicos: (i) derivados de cutina, cujas cadeias carbônicas principais dos ésteres e ácidos carboxílicos tinham 16 e 18 C (KOLATTUKUDY, 1981); (ii) ácidos graxos, aqueles menores que 20 átomos de C na cadeia principal; (iii) alcanol de cadeia longa (> 20 átomos de C); (iv) alcanol de cadeia média (com 18 e 20 átomos de carbonos); (v) alcanol de cadeia curta (19 átomos de C ou \leq 17 átomos de C); (vi) alcanos (7 a 14 átomos de C); (vii) alcanos (15 a 26 átomos de C); (viii) alcanos (27 a 33 átomos ímpares de C); (ix) outros alcanos (alcanos de cadeia longa); (x) alcenos; (xi) outros lipídios (lipídios que não se

enquadraram em nenhum grupo); (xii) compostos nitrogenados (moléculas orgânicas que contém funções nitrogenadas); (xii) outros.

2.7 Análises estatísticas

Os dados obtidos de C-MOP, C-MOAM, N-MOP, N-MOAM, DSC e relação C/N dos solos foram submetidos ao teste de normalidade de Jarque-Bera (p -valor $< 0,05$) e ao teste de homoscedasticidade de Levene (p -valor $< 0,05$). Quando os pressupostos da estatística paramétrica não foram cumpridos, as variáveis foram transformadas. Para os dados de C-MOAM a transformação foi efetuada por Box-Cox ($\lambda = 0,50$), e para os dados de C/N-MOAM, os dados foram ajustados pela transformação ordinal (Rank), pois não se ajustaram à análise paramétrica. Os dados foram submetidos análise de variância (ANOVA) pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade e as médias foram comparadas pelo teste SNK a 5% de probabilidade, utilizando o programa SPEED Stat 3.0 (CARVALHO et al., 2020).

Os compostos recuperados pela TMAH-GC-MS foram reunidos em grupos em função das suas abundâncias relativas (Figura S1), e processados por análise de componentes principais (PCA) para verificar o agrupamento das áreas e compostos mais importantes para distinção ou similaridade das áreas de uso e manejo. Todo o processamento de dados foi realizado utilizando o software estatístico R versão - 4.3.1.

3. RESULTADOS

3.1 C e N para as frações MOP e MOAM

O Carbono da Matéria Orgânica Particulada (C-MOP) e Carbono da Matéria Orgânica Associada aos Minerais (C-MOAM) foram maiores ($p < 0,05$) no solo da área com vegetação nativa em relação às áreas de manejo sob os princípios da agricultura natural, tanto na linha quanto na entrelinha (Figura 3). Os teores de C-MOP e C-MOAM foram similares ($p < 0,05$) nas linhas e entrelinhas de café, exceto os teores de C-MOAM que foram maiores ($p < 0,05$) nas áreas com 9 e 5 anos (Figura 3).

O Déficit de Saturação de Carbono (DSC) foi maior na linha e entrelinha para todas as áreas de manejo natural em relação à vegetação nativa (Figura 3). O baixo valor identificado na vegetação natural (DSC = 59,52% - Tabela suplementar 1) indicou que esta possui alto valor de carbono. Os valores do déficit de saturação de carbono foram similares ($p > 0,05$) nas linhas e nas entrelinhas do café.

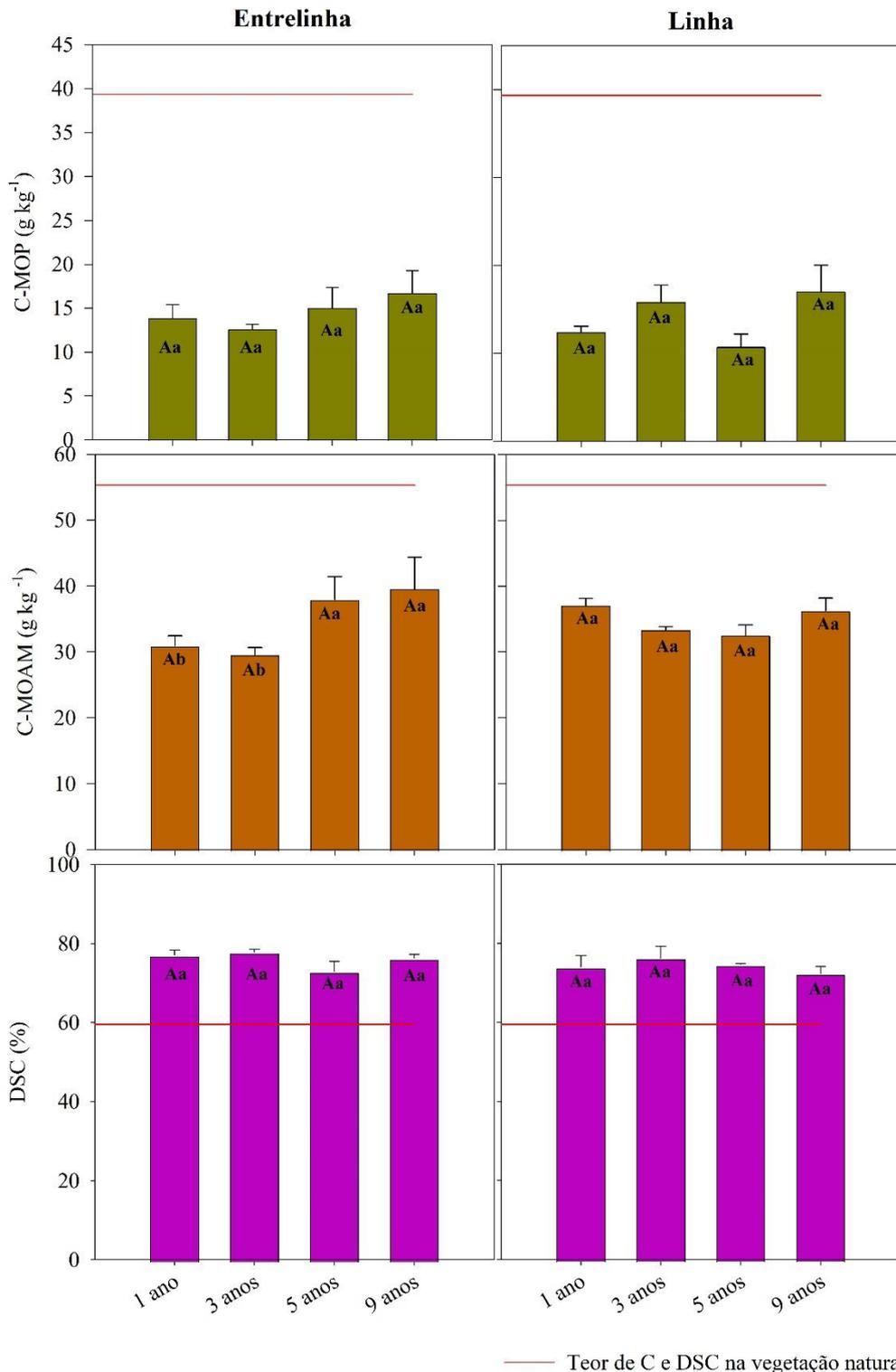


Figura 3. Carbono (g kg^{-1}) associado as frações de matéria orgânica do solo particulada (C-POM), e matéria orgânica associada a minerais (C-MOAM) na profundidade de 0-5cm e para o déficit de saturação de carbono (DSC) em áreas de café com 9, 5, 3 e 1 ano de manejo sob os princípios da Agricultura. Letras maiúsculas representam o efeito entre Linha e Entrelinha e letras minúsculas representam o efeito entre áreas com idades diferentes de manejo, pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Os teores de N-MOP e de N-MOAM foram maiores ($p < 0,05$) no solo da área com vegetação natural em relação às áreas de manejo sob os princípios da agricultura natural, tanto na linha quanto na entrelinha (Figura 4). Os teores de N-MOP e N-MOAM foram similares ($p < 0,05$) nas linhas e entrelinhas de café, exceto os teores de N-MOAM que foram maiores ($p < 0,05$) nas áreas com 9 e 5 anos (Figura 4). Apesar de similares ($p > 0,05$), os teores N-MOP nas áreas com 5 e 9 anos de manejo sob os princípios da agricultura natural foram de 31 a 77 % maiores em relação demais áreas avaliadas (Figura 4).

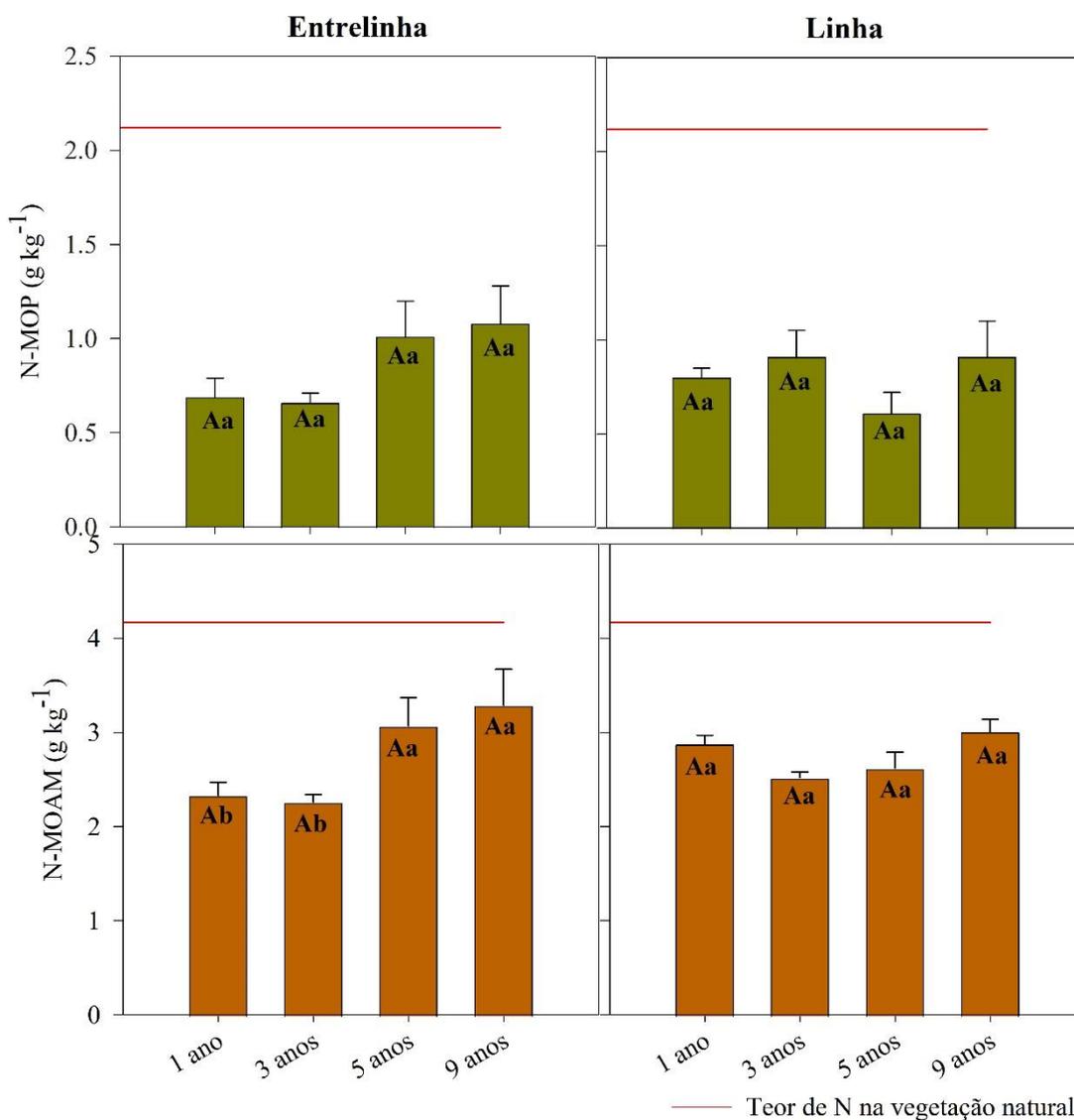


Figura 4. Nitrogênio associado (g kg^{-1}) às frações de matéria orgânica particulada (N-POM), e matéria orgânica associada a minerais (N-MOAM) em áreas de café com 9, 5, 3 e 1 ano de manejo sob os princípios da Agricultura Natural. Letras maiúsculas representam o efeito entre Linha e Entrelinha e letras minúsculas representam o efeito entre áreas com idades distintas de manejo, pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

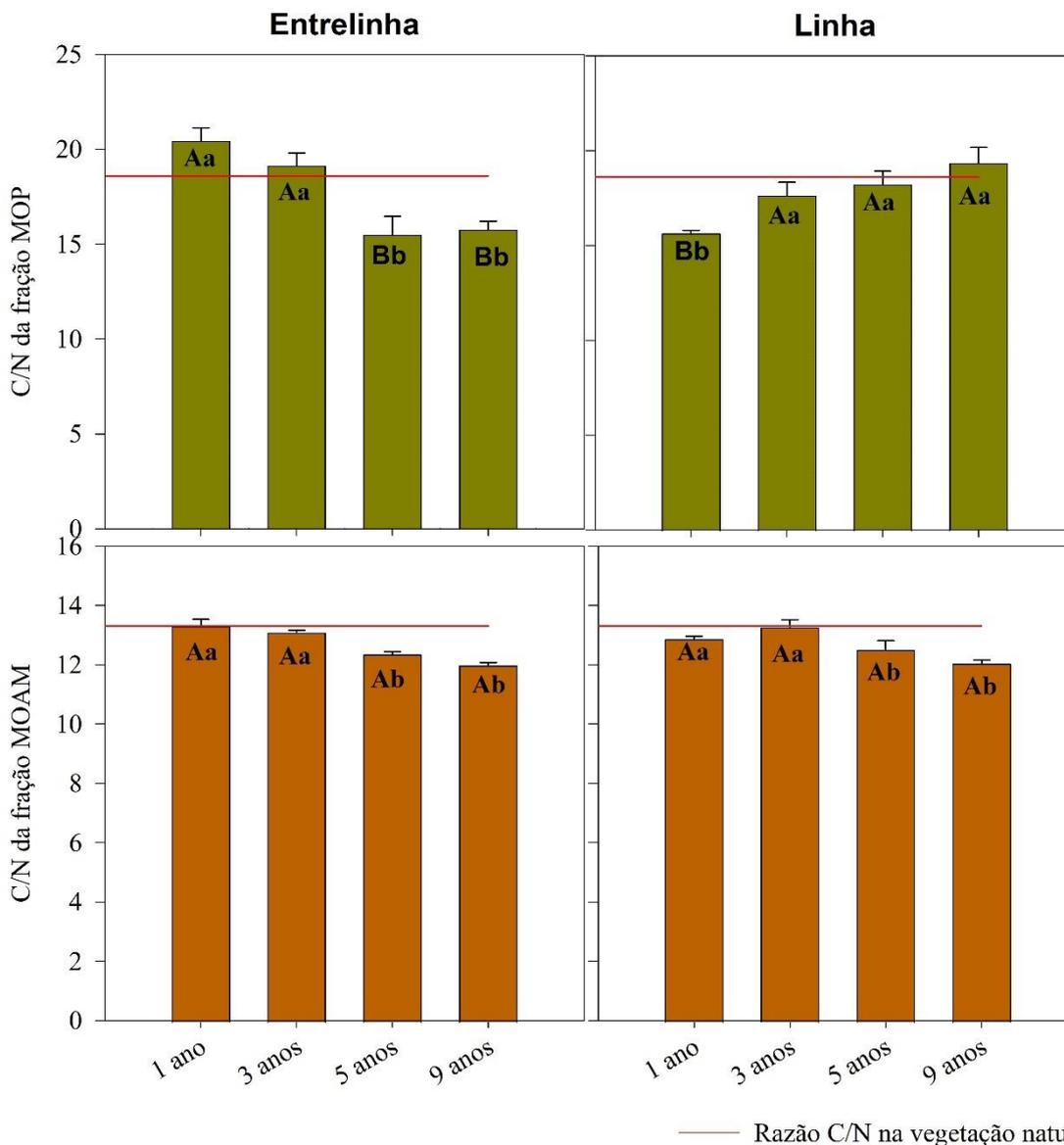


Figura 5. Relação C/N para fração de matéria orgânica particulada (POM) e para fração de matéria orgânica associada a minerais (MOAM) em áreas de café com 9, 5, 3 e 1 ano de manejo sob os princípios da Agricultura Natural (Natural, Curral, Catiguá e Arara, respectivamente). Letras maiúsculas representam o efeito ente Linha e Entrelinha e letras minúsculas representam o efeito entre áreas com idades diferentes de manejo, pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Em relação à vegetação nativa, a relação Carbono/Nitrogênio (C/N) na fração MOP foi maior ($p < 0,05$) na entrelinha das áreas com 1 e 3 anos e na linha da área com 9 anos de manejo natural (Figura 5). Na entrelinha, a relação C/N na fração MOP foi maior ($p < 0,05$) nas áreas com 1 e 3 anos, e na linha das áreas com 3, 5 e 9 anos de manejo natural (Figura 5). Em comparação à linha, a relação C/N na entrelinha foi maior ($p < 0,05$) na área com 1 ano de manejo e menores ($p < 0,05$) nas áreas com 5 e 9 anos de manejo sob os princípios da agricultura natural (Figura 5).

A relação C/N na fração MOAM das áreas manejadas foram similares ou ligeiramente inferiores à vegetação natural (Figura 5). As relações C/N na fração MOAM, nas linhas e entrelinhas, foram maiores ($p < 0,05$) nas áreas com 1 e 3 anos e manejo natural.

3.2 Composição molecular da MOS por TMAH-GC-MS

Em relação a PCA da matéria orgânica particulada (MOP), os componentes CP1 (23,4%) e CP2 (15,9%) apresentaram 39,3% da variância total dos dados. Na entrelinha, a composição molecular da MOP permitiu a formação de três agrupamentos distintos entre as áreas manejadas a 1, 3 e 5 anos (Figura 6). Na área com manejo natural a 9 anos, a composição da MOP foi semelhante à vegetação natural na linha e na entrelinha. Na linha, a área manejada a 3 anos e a vegetação natural foram mais semelhantes do que as áreas manejadas a 1, 5 e 9 anos (Figura 6).

Outros alcanos na linha da área manejada a 3 anos e da vegetação natural influenciaram positivamente a composição da MOP, enquanto nas entrelinhas os ácidos graxos e outros compostos influenciaram mais a composição da MOAM. Os demais alcanos e alcanóis (exceto os de cadeia curta) contribuíram mais para distinguir as áreas 1, 5 e 9 anos de manejo. Outros lipídios e cutina foram importantes para distinguir a área manejada a 5 anos (Figura 6).

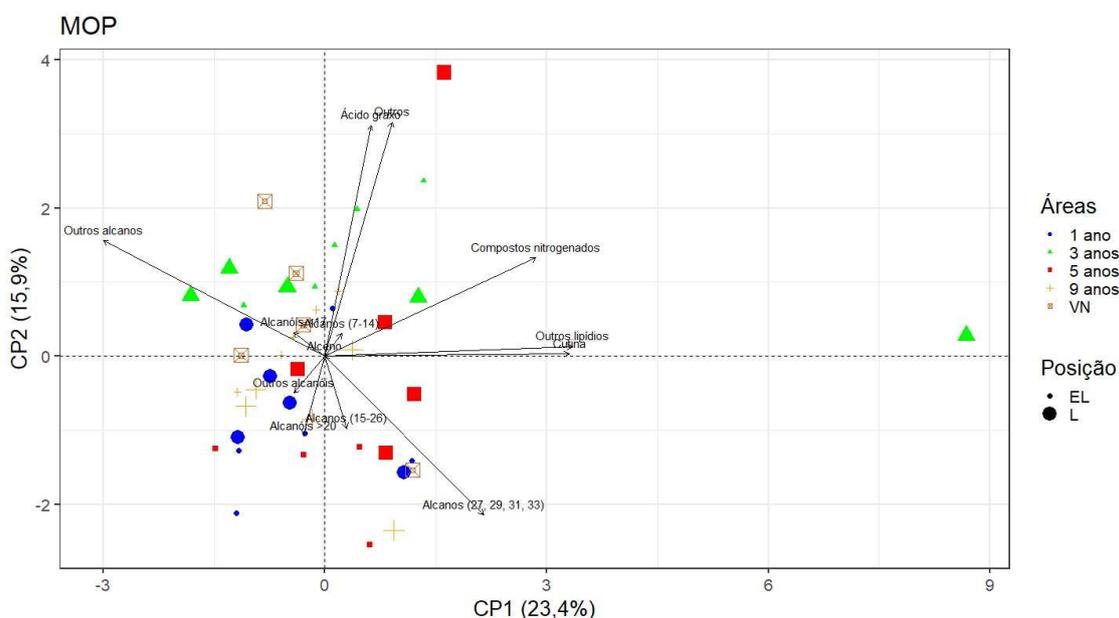


Figura 6. Dispersão gráfica das variáveis de abundância relativa dos grupos bioquímicos, da fração de matéria orgânica particulada (MOP) em Latossolo com cultivo de café manejado sob os princípios da agricultura natural com diferentes tempos de manejo (1 ano, 3 anos, 5 anos e 9 anos) e vegetação natural (VN), considerando tanto a linha (L) quanto a entrelinha (EL) de plantas de café, em Araçuaia - MG, Brasil.

Em relação ao PCA da MOAM, os componentes CP1 (39,3%) e CP2 (18,7%) apresentaram 58% da variância total dos dados. A MOAM foi muito semelhante na linha e entrelinha dos cafezais, mas foram formados três grupos distintos: a área manejada a 3 anos, as áreas manejadas a 1 e 5 anos e a área manejada a 9 anos e a vegetação natural formaram agrupamentos distintos (Figura 7). Na entrelinha, os alcanos de 15 a 26 carbonos, alcenos e cutina influenciaram positivamente a composição da MOAM na área manejada a 3 anos. Na linha, os alcanos de 7 a 14 carbonos influenciaram negativamente e outros alcanos influenciaram positivamente a composição da MOAM nas áreas com 1, 3, 5 e 9 anos de manejo. Em alguns pontos, os ácidos graxos e alcanóis de cadeia longa (alcanóis > 20) influenciaram positivamente a área manejada a 9 anos (Figura 7).

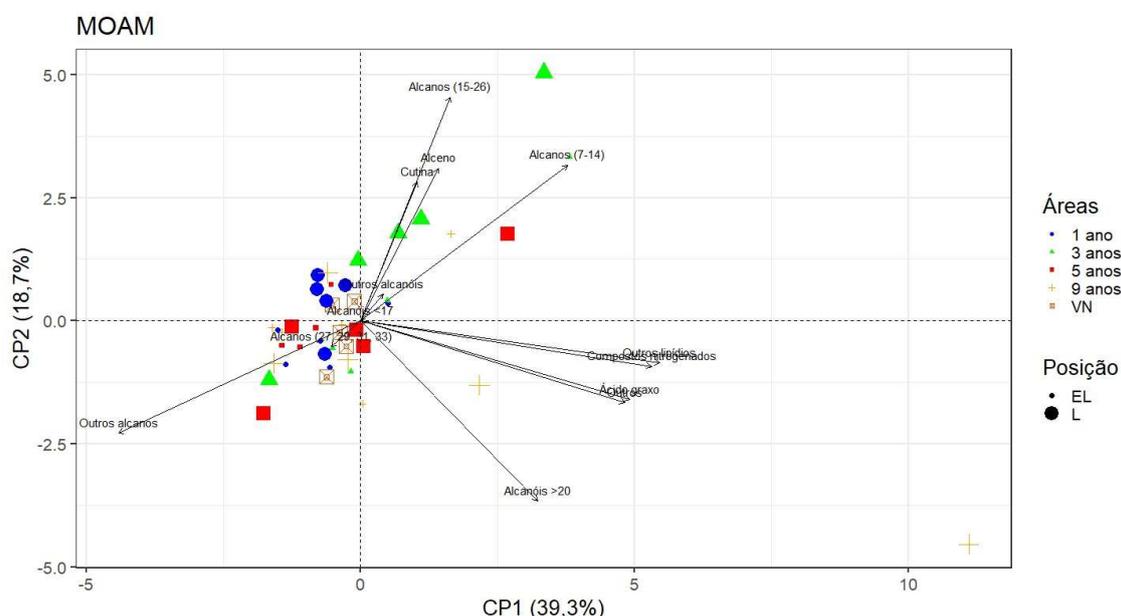


Figura 7. Dispersão gráfica das variáveis de abundância relativa dos grupos bioquímicos, da fração de matéria orgânica particulada (MOAM) em Latossolo com cultivo de café manejado sob os princípios da agricultura natural com diferentes tempos de manejo (1 ano, 3 anos, 5 anos e 9 anos) e vegetação natural (VN), considerando tanto a linha (L) quanto a entrelinha (EL) de plantas de café, em Araponga - MG, Brasil.

4. DISCUSSÃO

A similaridade encontrada entre os teores de C-MOP não significa que esta fração não seja sensível ao manejo. A fração MOP é reciclada mais rapidamente e as alterações em seus estoques, promovidas pelo manejo são percebidas a curto prazo (BAYER et al., 2002). Os resultados mostraram que, o aporte de resíduos ao longo do tempo, levou a formação continuada de matéria orgânica na fração mais lábil de forma similar nas diferentes áreas, independente do tempo de manejo. Com apenas um ano da adoção do manejo natural, as condições foram favoráveis à formação continuada dessa fração. Esta fração dá suporte a atividade biológica do solo e favorecer o fluxo de C para as frações

mais estáveis (C-MOAM). A ausência de compostos orgânicos lábeis suficientes para atender às demandas microbianas causa um estímulo aos processos de oxidação de C associados a frações mais estáveis, resultando em perdas de estoques de MOS (CAUSARANO et al., 2008; SALTON et al., 2011), o que certamente não ocorreu nas áreas estudadas, porque houve aporte continuado de resíduos.

A MOAM representa a matéria orgânica em um avançado grau de transformação (BAYER et al., 2004) e normalmente é menos sensível às alterações de manejo, principalmente em curto prazo, como mostrou os dados, pois, nas entrelinhas, as áreas com 9 e 5 anos de manejo apresentaram maiores teores de C-MOAM em relação áreas com 3 e 5 anos de manejo seguindo os princípios na agricultura natural. Segundo SILVA et al. (2022), aplicações de diferentes resíduos vegetais utilizados em solos tropicais, como no caso estudado, há contribuições de C derivado do solo e dos resíduos para as frações MOAM.

Os resultados indicaram que as áreas manejadas estão com valores próximos no NSC, independente do tempo de manejo seguindo os princípios da agricultura natural (Figura 3). O histórico de manejo com o uso de adubos orgânicos de origem animal aliado ao manejo atual pode estar contribuindo a proximidade do NSC.

A similaridade entre os teores de N-MOP nas linhas e nas entrelinhas nos diferentes tempos de manejo decorre em função da natureza da MOP. A MOP é um compartimento dinâmico, com nutrientes relativamente desprotegidos e decorrente das recentes adições de resíduos de plantas (JESUS et al., 2012). O aporte contínuo de resíduos fornece nitrogênio em quantidade suficiente para que, mesmo com suas perdas rápidas, todas as áreas possuam teores parecidos. Isso significa que a ciclagem de nitrogênio está se equivalendo ao aporte de resíduos, que favorece a atividade microbiana (MORALES et al., 2016).

Os maiores teores de N-MOAM nas áreas com 5 e 9 anos de manejo, assim como C-MOAM, indicam que o tempo de manejo na agricultura natural está alterando as frações mais persistentes da MOS. A MOAM é majoritariamente constituída por produtos microbianos ricos em N e persiste no solo devido à ligação química aos minerais e à proteção física em pequenos agregados (COTRUFO et al., 2019). A adição de resíduos de alta qualidade nutricional e relação C/N baixa, como de biomassa de amendoim forrageiro e bananeira utilizados nos cafezais, favorece a atividade microbiana no local, e com o tempo, forma matéria orgânica estável, o que permite maior acúmulo de N proveniente da biomassa de microrganismos.

Os microrganismos são fundamentais para a saúde dos agroecossistemas, pois eles são fonte e depósito de nutrientes em todos os ecossistemas, participam ativamente na estruturação do solo, na formação de húmus, na fixação biológica de nitrogênio e na solubilização de nutrientes para as plantas (MOREIRA; SIQUEIRA, 2000). O uso de plantas leguminosas como de cobertura do solo, a exemplo do amendoim forrageiro, é importante devido a associação simbiótica com bactéria do gênero rizóbio, que fixam N_2 e aumentam a concentração deste nutriente no solo (CARDOSO et al., 2014).

A relação C/N do solo é frequentemente usada para avaliar a capacidade do solo em armazenar carbono, onde sistemas com uma relação C/N mais alta são geralmente considerados capazes de acumular mais carbono em comparação com o nitrogênio (COTRUFO et al., 2015). Os resultados da pesquisa indicaram uma situação diferente, pois a relação C/N aumentou em solos com menor teor total de carbono (tabela suplementar 1), o que talvez tenha ocorrido devido ao tempo de manejo dos solos. Normalmente a relação C/N tende a diminuir com maiores aportes de fontes disponíveis de N ou materiais de melhor qualidade. Assim, o menor tempo de aporte de resíduos, levou a maior relação C/N das áreas, na linha. Entretanto, na linha, a relação C/N da MOP da área manejada a 1 ano apresenta diferenças devido ao alto aporte de resíduos exclusivamente na linha de plantio. Os valores similares da relação C/N da MOAM ocorrem porque esta fração é menos susceptível a mudanças em curto prazo, pois ela é composta em grande parte por produtos que persiste no solo devido à ligação química aos minerais e à proteção física em pequenos agregados (KÖGEL-KNABNER et al., 2008)

O pressuposto de que o manejo dos cafezais de acordo com os princípios da agricultura natural levaria a semelhança da composição química da MOS à condição natural (vegetação natural) se confirmou parcialmente. Na entrelinha, as áreas com maior tempo de manejo (5 e 9 anos), a MOP e a MOAM, mas especialmente MOP, mostraram uma leve tendência de aproximação com a vegetação natural. Isso indica que a adição de resíduos da vegetação natural nas entrelinhas do café, ao longo do tempo, tem tornado a composição da MOS do agroecossistema semelhante à composição do ecossistema natural, especialmente no que se refere MOP, que possui características mais semelhantes ao resíduo vegetal adicionado (COTRUFO et al., 2013). O agricultor adiciona resíduos nas entrelinhas, exceto na área manejada a um ano, por isto as principais alterações foram observadas nas entrelinhas, principalmente nas áreas com manejo mais antigo.

Na linha, a maior abundância de alcanos de cadeia longa (Outros alcanos) na área manejada a 3 anos e na vegetação natural indicam diferenças no resíduo aportado e na

comunidade microbiana, pois estes compostos são predominantes em vegetais superiores e fungos (OTTO; SIMPSON, 2007). De modo semelhante, a composição de alcanos 15-26 (BUURMAN; PETERSE; ALMENDROS MARTIN, 2007) e alcanóis (VAN BERGEN et al., 1998) com longas cadeias carbônicas, mais abundante também na área de 3 anos e vegetação natural, também refletem a constituição do material vegetal adicionado (ceras, suberina, cutina, fungos). Essa distinção também se estende à composição molecular da matéria orgânica, evidenciando que os compostos nas áreas com maior tempo de cultivo e manejo se aproximam mais da composição da vegetação natural.

Mesmo com diferenças na composição dos resíduos, como a MOAM alterou menos em relação a MOP, sugere-se que o manejo seguindo os princípios da agricultura natural ainda não alterou fortemente a composição molecular da matéria orgânica, pois ainda não produziu formas mais estáveis no tempo de manejo de 1 a 9 anos, que são considerados de curto e médio prazo. Entretanto, já se observa tendência de aproximação entre as áreas manejadas e a vegetação natural, pois na entrelinha, com maior tempo de manejo na agricultura natural (5 e 9 anos) houve tendência da C-MOP, N-MOP, e C-MOAM e N-MOAM se assemelharem com vegetação natural.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O manejo seguindo os princípios da agricultura natural, com o tempo, leva semelhança entre os solos dos agroecossistemas e ecossistemas, pois na entrelinha do café, a composição da matéria orgânica das áreas com maior tempo de manejo sob os princípios da agricultura natural tendeu a se assemelhar mais à vegetação natural.

O aporte constante de resíduos vegetais, seguindo os princípios da agricultura natural, está proporcionando maiores teores de carbono e nitrogênio, mantendo equilíbrio entre as entradas e saídas destes elementos, com tendência a se assemelhar a condição natural à medida que aumenta tempo de manejo. Isto se refletiu na alteração do C e N nas frações MOP e MOAM, que aumentaram ao longo do tempo, na entrelinha.

Isso sugere que o manejo, com aportes constantes de resíduos, está refletindo na manutenção da fração mais suscetível a perdas (MOP), havendo um balanço entre o que é perdido, e o que é formado.

Há incrementos dos tores de C-MOAM, fração mais estável da matéria orgânica, o que também foi observado no DSC (déficit de saturação de carbono), que tendeu a diminuir conforme aumentou o tempo de manejo.

6. REFERÊNCIAS

- ALTIERE, M. **Agroecologia: bases científicas para uma agricultura sustentável**. 3. ed. Rio de Janeiro : Expressão Popular, 2012.
- AZIZ NACIB AB'SABER. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. 4. ed. Ateliê editorial, 2007.
- BAYER, C. et al. Stocks and humification degree of organic matter fractions as affected by no-tillage on a subtropical soil. **Plant and Soil**, v. 238, p. 133–140, 2002.
- BAYER, C. et al. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 7, p. 677–683, jul. 2004.
- BETTIOL, W. et al. **Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical Wagner Bettiol**. Brasília - DF: Embrapa, 2023.
- BUURMAN, P.; PETERSE, F.; ALMENDROS MARTIN, G. Soil organic matter chemistry in allophanic soils: a pyrolysis-GC/MS study of a Costa Rican Andosol catena. **European Journal of Soil Science**, v. 58, n. 6, p. 1330–1347, 26 dez. 2007.
- CALEGARI, A.; COSTA, A. Sistemas conservacionistas de uso do solo. Em: PRADO, R.; TURETTA, A. P.; ANDRADE, A. (Eds.). **Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais**. 1. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010. p. 491.
- 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, maio 1992.
- CAPORAL, F. R. Agroecologia: uma nova ciência para apoiar a transição a agriculturas mais sustentáveis. p. 30, 2009.
- CARDOSO, R. A. et al. Influência da adubação verde nas propriedades físicas e biológicas do solo e na produtividade da cultura de soja. **Semina: Ciências Biológicas e da Saúde**, v. 35, n. 2, p. 51–60, 29 jul. 2014.
- CARVALHO, A. M. X. DE et al. SPEED stat: A free, intuitive, and minimalist spreadsheet program for statistical analyses of experiments. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 20, n. 3, 2020.

- CASTELLANO, M. J. et al. Integrating plant litter quality, soil organic matter stabilization, and the carbon saturation concept. **Global Change Biology**, v. 21, n. 9, p. 3200–3209, 1 set. 2015.
- CAUSARANO, H. J. et al. Soil Organic Carbon Fractions and Aggregation in the Southern Piedmont and Coastal Plain. **Soil Science Society of America Journal**, v. 72, n. 1, p. 221–230, 1 jan. 2008.
- CHEFETZ, B. et al. Characterization of Organic Matter in Soils by Thermochemolysis Using Tetramethylammonium Hydroxide (TMAH). **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 2, p. 583–589, mar. 2000.
- COTRUFO, M. F. et al. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? **Global Change Biology**, v. 19, n. 4, p. 988–995, 5 abr. 2013.
- COTRUFO, M. F. et al. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. **Nature Geoscience**, v. 8, n. 10, p. 776–779, 7 out. 2015.
- COTRUFO, M. F. et al. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. **Nature Geoscience**, v. 12, n. 12, p. 989–994, 18 dez. 2019.
- DA SILVA, J. P. et al. Decomposition and nutrient release from legume and non-legume residues in a tropical soil. **European Journal of Soil Science**, v. 73, n. 1, p. e13151, 1 jan. 2022.
- DĂMĂȚÎRCĂ, C. et al. Residue incorporation and organic fertilisation improve carbon and nitrogen turnover and stabilisation in maize monocropping. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 342, p. 108255, fev. 2023.
- DE CARVALHO, A. F. et al. Microclimate and soil and water loss in shaded and unshaded agroforestry coffee systems. **Agroforestry Systems**, v. 95, n. 1, p. 119–134, 1 jan. 2021.
- DUARTE, E. M. G. et al. Decomposition and nutrient release in leaves of Atlantic Rainforest tree species used in agroforestry systems. **Agroforest Syst**, v. 87, p. 835–847, 2013.
- ESPINDOLA, J. A. A. et al. Adubação Verde com Leguminosas. 2005.

GLIESSMAN, S. Transforming food systems with agroecology. **Agroecology and Sustainable Food Systems**, v. 40, n. 3, p. 187–189, 2016.

GOLCHIN, A. et al. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ^{13}C Cp/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. **Soil Research**, v. 32, n. 2, p. 285, 1994.

GOLFARI, L. **Zoneamento Ecológico do Estado de Minas Gerais Para Reflorestamento**. Belo Horizonte, Brasil: 1975.

GOMES, L. C. et al. Agroforestry systems can mitigate the impacts of climate change on coffee production: A spatially explicit assessment in Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 294, 1 jun. 2020.

GOMES, L. DE C. et al. Trees modify the dynamics of soil CO_2 efflux in coffee agroforestry systems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 224, p. 30–39, 15 ago. 2016.

GUZMÁN, G. I. et al. Participatory Action Research in Agroecology: Building Local Organic Food Networks in Spain. **Journal of Sustainable Agriculture**, p. 120904081413002, 4 set. 2012.

HUILIAN, X. **Nature farming in Japan**. Trivandrum, India: Reserch Signpost, 2006.

JESUS, G. L. DE et al. Doses e fontes de nitrogênio na produtividade do eucalipto e nas frações da matéria orgânica em solo da região do cerrado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 201–214, fev. 2012.

KER, J. C. LATOSSOLOS DO BRASIL: UMA REVISÃO. **Geonomos**, 1 jul. 1997.

KÖGEL-KNABNER, I. et al. Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 171, n. 1, p. 61–82, 31 fev. 2008a.

KÖGEL-KNABNER, I. et al. Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 171, n. 1, p. 61–82, 31 fev. 2008b.

KOLATTUKUDY, P. E. Structure, Biosynthesis, and Biodegradation of Cutin and Suberin. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 32, n. 1, p. 539–567, jun. 1981.

MALUF, H. J. G. M. et al. Disponibilidade e recuperação de nutrientes de resíduos culturais em solo com diferentes texturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1690–1702, dez. 2015a.

MALUF, H. J. G. M. et al. Decomposição de resíduos de culturas e mineralização de nutrientes em solo com diferentes texturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1681–1689, dez. 2015b.

MASANOBU FUKUOKA. A teoria da Agricultura Natural . Em: **Agricultura Natural: Teoria e prática da filosofia verde**. [s.l.] Nobel, 1985. p. 93–140.

MASON, S. L.; FILLEY, T. R.; ABBOTT, G. D. The effect of afforestation on the soil organic carbon (SOC) of a peaty gley soil using on-line thermally assisted hydrolysis and methylation (THM) in the presence of ¹³C-labelled tetramethylammonium hydroxide (TMAH). **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 85, n. 1–2, p. 417–425, maio 2009.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: 2006.

NOVOTNY, E. H.; CANELLAS, L. P. Caracterização da matéria orgânica do solo. Em: REZENDE, R. R. N.; OLIVEIRA, M. O. (Eds.). **O solo: estrutura e composição**. 1. ed. São Carlos - SP: Editora Cubo, 2022. p. 153–196.

OTTO, A.; SIMPSON, M. J. Analysis of soil organic matter biomarkers by sequential chemical degradation and gas chromatography – mass spectrometry. **Journal of Separation Science**, v. 30, n. 2, p. 272–282, 2 fev. 2007.

PEREIRA, D. G. C. et al. Litter decomposition and nutrient release in different land use systems in the Brazilian semi-arid region. **CATENA**, v. 231, p. 107345, 1 out. 2023.

QUIRIJIN DE JONG VAN LIER. **Física do Solo**. 1. ed. Sociedade Brasileira de Ciência do solo.2010.

SALTON, J. C. et al. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1349–1356, out. 2011.

- SILVA, J. P. DA et al. Combined legume and non-legume residues management improve soil organic matter on an Oxisol in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, 12 dez. 2022.
- SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. Em: NOVAIS, R. F. et al. (Eds.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 275–374.
- SIX, J. et al. **Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils**. **Plant and Soil**, 2002.
- SOUZA, H. N. DE et al. Protective shade, tree diversity and soil properties in coffee agroforestry systems in the Atlantic Rainforest biome. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 146, n. 1, p. 179–196, 1 jan. 2012.
- SOUZA, I. F. et al. The mechanisms of organic carbon protection and dynamics of C-saturation in Oxisols vary with particle-size distribution. **European Journal of Soil Science**, v. 68, n. 5, p. 726–739, 1 set. 2017.
- TEIXEIRA, H. et al. Understanding Farm Diversity to Promote Agroecological Transitions. **Sustainability**, v. 10, n. 12, p. 4337, 22 nov. 2018a.
- TEIXEIRA, H. M. et al. Farmers show complex and contrasting perceptions on ecosystem services and their management. **Ecosystem Services**, v. 33, p. 44–58, 1 out. 2018b.
- TERUO HIGA. **Agricultura Natural** . 1. ed. v. 1. 1989.
- VAN BERGEN, P. F. et al. Organic geochemical studies of soils from the Rothamsted Classical Experiments—IV. Preliminary results from a study of the effect of soil pH on organic matter decay. **Organic Geochemistry**, v. 29, n. 5–7, p. 1779–1795, nov. 1998.
- ZHANG, K.; MALTAIS-LANDRY, G.; LIAO, H.-L. How soil biota regulate C cycling and soil C pools in diversified crop rotations. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 156, p. 108219, maio 2021.

7. MATERIAL SUPLEMENTAR

Tabela S1. Teores de Carbono Orgânico Total (COT), Nitrogênio Total (NT) e Déficit de Saturação de Carbono (DSC) das áreas manejadas sob os princípios da agricultura natural.

ÁREA ¹		COT (g/kg ⁻¹)	NT (g/kg ⁻¹)	DSC (%)
T1	EL	47,97	3,24	77,06
	L	51,03	3,58	73,97
T3	EL	40,36	2,86	77,83
	L	46,02	3,19	76,27
T5	EL	50,41	3,87	72,96
	L	47,64	3,62	74,63
T9	EL	52,99	4,09	75,28
	L	55,44	4,20	72,34
Vegetação natural	-	94,67	6,29	59,52

⁽¹⁾ Tempo de manejo sob os princípios da agricultura natural: T1 - 1 ano, T3 - 3 anos, T5 - 5 anos e T9 - 9 anos.

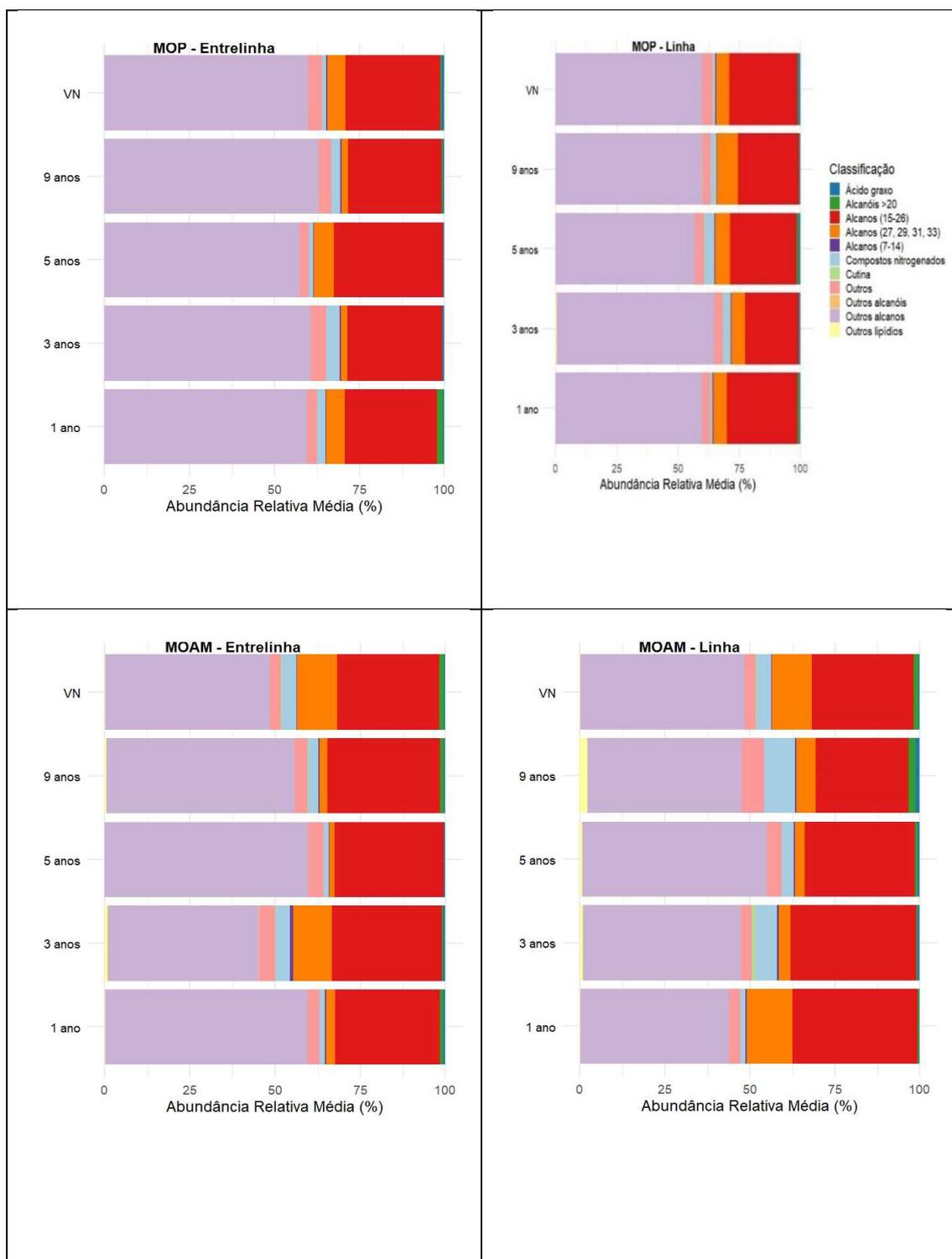


Figura S2. Distribuição da abundância relativa dos grupos de compostos bioquímicos identificados pela TMAH-GC-MS, na fração de matéria orgânica do solo particulada (MOP) e associada a minerais (MOAM) dos sistemas de uso (Arara – AR, Catiguá – CT, Curral - CR, e Natural - NT) em Latossolo com cultivo de café conduzidos com os princípios da agricultura natural com diferentes tempos de manejo (AR - 1 ano, CT - 3 anos, CR - 5 anos e NT - 9 anos) e uma vegetação natural (VN), considerando tanto a linha (L) quanto a entrelinha (EL) dos cultivos, em Araponga - MG, Brasil.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O agricultor, ao adotar os princípios da agricultura natural ao longo de duas décadas, relata benefícios significativos para a saúde do solo e de todos os organismos presentes no sistema. Essa abordagem não apenas contribui para a conservação dos agroecossistemas, mas também melhora a qualidade de vida da sua família. O sucesso alcançado se destaca pela ênfase na potencialização dos processos ecológicos, eliminando a dependência de insumos externos e priorizando a mão de obra familiar. No entanto, ressalta-se que esse processo é lento e contínuo, e não está vinculado apenas ao contexto produtivo e práticas conservacionistas, mas também à interação com outros participantes na rede de comercialização.

A decomposição de resíduos de amendoim forrageiro e bananeira durante seis meses destacou-se na eficiente liberação de nutrientes. A composição bioquímica influenciou diretamente na dinâmica de liberação. A serrapilheira, apesar de imobilizar a maioria dos nutrientes, persistiu no solo e liberou quantidades superiores de B (Boro) em comparação com outros resíduos. A composição dos resíduos não impactou o teor de carbono nas diferentes frações do solo, mas diferenças no déficit de saturação de carbono (DSC) foram observadas, sugerindo uma relação com a qualidade dos resíduos. Um período de avaliação possivelmente insuficiente pode ter limitado esses resultados, especialmente em relação ao carbono no solo. Recomenda-se a realização de um experimento de incubação com uma mistura desses resíduos em condições de campo para uma compreensão mais abrangente e representativa das práticas agrícolas, permitindo inferências mais precisas sobre os padrões de liberação de nutrientes.

Ao longo do tempo, as frações MOP apresentaram estabilidade nos teores de C e N, em contraste com a MOAM, indicando uma dinâmica equilibrada com entradas e saídas de carbono e nitrogênio em resposta ao manejo. Observa-se uma tendência de formação de matéria orgânica estável, associada à MOAM. O DSC não variou entre as áreas, mas há uma leve tendência de diminuição com o aumento do tempo de manejo. A composição da matéria orgânica nas áreas sob os princípios da agricultura natural tende a se assemelhar mais à vegetação natural, especialmente na entrelinha, em locais com maior tempo de manejo.